Материалы

XI-й Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2022»
(МНТК-ИМТОМ – 2022»)

Часть 2

8 декабря 2022 года

г. Казань

Министерство промышленности и торговли Республики Татарстан
Акционерное общество «Казанский научно-исследовательский институт авиационных технологий»
Казанский (Приволжский) Федеральный университет
Казанский национальный исследовательский технический университет имени А.Н. Туполева – КАИ (КНИТУ - КАИ)
Казанский национальный исследовательский технологический университет
Казанский государственный энергетический университет

Материалы

XI-й Международной научно-технической конференции

«ИННОВАЦИОННЫЕ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ОБОРУДОВАНИЕ И МАТЕРИАЛЫ – 2022»

(МНТК «ИМТОМ – 2022»)

Часть 2

8 декабря 2022 года

Казань
2022

УДК 67

ББК К34

М34

Ответственность за содержание тезисов возлагается на авторов.

М34 Материалы XI-й Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2022» (МНТК «ИМТОМ–2022»). Ч. 2. – Казань, 2022. – 274 с., ил.

Материалы состоят из 4 разделов в соответствии с секциями Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2022» (МНТК «ИМТОМ-2022»): «Высокоэффективные материалы, технологии и оборудование в машиностроении», «Инновационные разработки и экономика в машиностроении», «Химическое машиностроение», «Энергетическое машиностроение. Электротехническое и теплоэнергетическое оборудование».

Будет полезно научным работникам, технологам и инженерам соответствующих специальностей.

ISBN 978-5-6047701-2-2 *(т. 2)*
ISBN 978-5-6047701-0-8

СЕКЦИЯ № 3

«Химическое машиностроение»

Модераторы:

Гаврилов Алексей Викторович – декан Механического факультета ФГБОУ ВО «КНИТУ», доцент, к.т.н.

Поникаров Сергей Иванович – зав. кафедрой «Машин и аппаратов химических производств» ФГБОУ ВО «КНИТУ», профессор, д.т.н.

ИЗУЧЕНИЕ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ МЕТАЛЛОВ ОБУГЛЕННЫМ ДЕФЕКАТОМ

Азимова Д.А., докторант
Салиханова Д.С., проф., д.т.н.

Институт общей и неорганической химии АНРУз, Узбекистан, Ташкент,
salihanova79@mail.ru

Реальные сточные воды – это не чистые стабильные растворы, а гетерогенная смесь растворенных, коллоидных и взвешенных в воде примесей органического и неорганического происхождения. Методы очистки сточных вод можно разделить на механические, химические, физико-химические и биологические, когда же они применяются вместе, то метод очистки и обезвреживания сточных вод называется комбинированным. Применение того или иного метода в каждом конкретном случае определяется характером загрязнения и степени вредности выделяемых примесей [1].

В работе [2] изучены адсорбционная поведения ионов металлов на целлюлозных поверхностях, полученных из целлюлозных текстильных отходов легкой промышленности. Ионообменные смолы на основе целлюлозы получен гидролизом исходного отхода серной кислотой с последующей нейтрализацией до различных значений pH и сушкой при 80 °C. Средневзвешенный размер частиц используемых сорбентов был определен на основе фракционного состава порошкообразных сорбентов и составил 0,57 мм (pH = 1,5 – 3) и 0,14 мм (pH = 5 – 7). ИК-анализ элементного состава частиц выявил наличие связанных сульфатных групп в порошковом сорбенте с pH = 1,5-3. Результаты экспериментов показали, что модификация поверхности целлюлозного отхода серной кислотой повысила эффект адсорбции ионов Ni, Fe и Pb из водной среды. Сродство сульфокислотных смол к катионам обычно зависит от размера ионов и заряда катиона. Установлено, что значительную роль в адсорбционных свойствах полученных сорбентов играет электростатическое взаимодействие между поверхностными функциональными группами. Показано, что адсорбционная способность изучаемых металлов возрастает в ряду $Fe^{3+} < Pb^{2+} < Ni^{2+}$. Результаты исследований позволяют сделать вывод о целесообразности применения модифицированных отходов целлюлозных текстильных отходов легкой промышленности для очистки сточных вод от ионов металлов.

Таким образом, методы очистки производственных сточных вод очень разнообразны. Однако применение одного какого-либо метода очистки, в связи со сложным многокомпонентным составом сточных вод, будет недостаточно. Поэтому представляется целесообразным осуществлять многостадийную очистку стоков, где завершающей стадией является адсорбционная очистка, характеризующаяся высокой эффективностью, простым технологическим оформлением, применением доступных и достаточно дешевых реагентов.

В сахарном производстве в процессе дефекации образуется в значительных количествах осадок (дефекат), который утилизируется в качестве удобрения [3].

Отрасли применения таких веществ могут быть самые разнообразные: химическая (производство минеральных удобрений) и фармацевтическая промышленность, сельское хозяйство (кормовые добавки), металлургия (кальцийсодержащие легирующие добавки к сталям) и др.

Дефекат отличается своим составом, в зависимости от разновидности сырья и производства в основном в сухом сырье (при влажности 25-30%) содержится [4]:

- Известь — 60-70%;
- Органические вещества – 10-15%;
- Азот – 0,2- 0,7%;
- Фосфорная кислота– 0,2 -0,9%;
- Калий 0,5-1%
- Незначительное количество серы, магния и микроэлементов.

Образующиеся в процессе производства сахарной свеклы крупнотоннажные отходы стали серьезной экологической проблемой многих стран. На сегодняшний день только небольшая часть дефеката используется для минерализации почв, большая же часть вывозится в отвалы.

В работе [5] описан способ термической обработки дефеката при 600ºС, при этом происходит сгорание адсорбированных на поверхности органических веществ и образование продукта ($CaCO_3$+$C_{сажа}$), обладающего хорошими адсорбционными свойствами по отношению к жирам. Термолизный дефекат предложен для очистки сточных вод молочных комбинатов от жиров. Разработан способ очистки сернокислотных сточных вод от ионов железа, свинца и сурьмы, основанный на взаимодействии глюконата кальция, получающегося из дефеката при его обработке серной кислотой, с примесями воды $PbSO_4$, $FeSO_4$, $HSbO_3$ с образованием нерастворимых осадков.

Из литературных источников видно, что дефекат может быть использован в качестве адсорбента для очистки сточных вод загрязненных промышленными отходами. Исходя из вышеизложенных в данном работе изучен влияния термически переработанного дефеката на степень очистки сточных вод от загрязняющих ионов.

В первом этапе работы определены количественные и качественные характеристики сточных вод пруда хвостохранилища и оборотной воды цеха БИОКС ГМЗ-3, по результатам которых установлено, что они в несколько раз превышают ПДК.

С этой целью обуглена отход сахарного производства дефекат [6].Так как в составе дефеката [7] входят органические примеси, то при термообработке приводит к сгоранию органических веществ не до конечных продуктов - NO_2, H_2O,CO_2, а только до стадии обугливания и получения углеродных частичек, оседавших на поверхности $CaCO_3$, при котором получен модифицированный дефекат обладающих высокими адсорбционными свойствами.

Исходя из вышеизложенных в следующем этапе работы исследовали влияния термически модифицированного дефеката на степень очистки сточных вод от ионов Mn, Ni, Cu, Zn, As, Se, Sr, Mo, Cd, Hg, Pb, Th, U, Cr, Co. Образцы сточной воды объемом 500 мл обрабатывали различными дозами (2-5% от общей массы) термически модифицированным дефекатом. Данные влияния по удалению различных загрязняющих веществ от дозы модифицированного дефекта приведены в таблице.

Таблица

Результаты масс-спектрометрического анализа сточных до и после очистки (мг/л)

Эле-мен ты	Вода прудка (исходная)	После очистки вода прудка (доза 2% от общей массы)	Вода прудка после очистки (доза 5% от общей массы)	Оборотная вода БИОКС (исходная)	После очистки оборотная вода БИОКС (доза 2% от общей массы)	После очистки оборотная вода БИОКС (доза 5% от общей массы)	ПДК для технических вод
Be	0,00036	0,00001	0,00001	0,00030	0,00003	0,00002	0,0002
Mn	1,30	0,00170	0,00120	41,00000	0,02025	0,01500	0,1
Ni	66,00	13,00000	7,90000	8,20000	0,08673	0,06000	0,1
Cu	21,0	11,00000	8,20000	0,43000	0,02249	0,01900	1,0
Zn	0,07600	0,00460	0,00360	0,27000	0,00560	0,00360	1,0
As	0,88000	0,01000	0,00800	1,10000	0,09625	0,06900	0,05
Se	1,00000	0,27000	0,26000	0,41000	0,09723	0,08400	0,01
Sr	4,80000	0,90000	0,84000	3,00000	0,82857	0,68000	7,0
Mo	2,80000	0,06100	0,05600	0,40000	0,00525	0,00390	0,25
Cd	0,00085	0,00016	0,00014	0,00098	0,00018	0,00016	0,001
Hg	0,00007	0,00007	0,00004	0,00008	0,00003	0,00002	0,0005
Pb	0,00013	0,00003	0,00002	0,00620	0,00010	0,00008	0,03
Th	0,00015	0,00002	0,00000	0,00046	0,00025	0,00013	-
U	2,40000	0,00060	0,00010	0,64000	0,00540	0,00090	0,7
Cr	0,02300	0,01400	0,00900	0,02600	0,02456	0,01900	0,5
Co	21,00	7,00000	6,30000	3,70000	0,01333	0,01200	0,1

Из таблицы видно, что с увеличением дозы от 2 до 5% можно очистить производственные сточные воды до норм ПДК. Особенно нужно обратит внимание на очистку элементов т.к. Mn -99,9%; As -99,1%; Mo-98%; U-100%; Be,Al -97,2%.

Установлено, что модифицированный дефекат полученный при 650 ^{0}C очищает производственные сточные воды до безвредности экологии и эти воды можно использовать для технических нужд комбината.

Результаты проведенных исследований, показало, что по ряду показателей удалось добиться эффективного снижения содержания загрязняющих веществ, остаточные концентрации которых удовлетворят требованиям технических вод. Например: если в исходном сточной воде прудка хвостохранилища содержания элементов: Mn -1,3 мг/л; Ni - 66 мг/л; Cu - 21 мг/л; As – 0,88 мг/л; Se – 1,0 мг/л; Sr-4,8 мг/л;, U – 2,4 мг/л;, Co - 21 мг/л то после обработки термически переработанным дефекатом их содержания в воде снизился до Mn – 0,0017 мг/л; Ni - 13 мг/л; Cи - 11 мг/л; As – 0,01 мг/л; Se – 0,27 мг/л; Sr-0,9 мг/л;, U – 0,0006 мг/л;, Co - 7 мг/л т.е степень очистки для этих элементов лежит в пределах 75-85%.

Таким образом, проведенное исследование показало, что использования обугленного дефеката значительно снижают содержания тяжелых металлов в сточной воде.

Литература

1. Аширов А.Г. Ионообменная очистка сточных вод, растворов и газов. Л.: Химия. 1983.- 295 с.

2. Pugacheva I.N., Karmanov A.V., Zueva S.B., De Michelis I., Ferella F., Molokanova L.V., Vegliò F. Heavy metal removal by cellulose-based textile waste product. Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol. [Russ. J. Chem. &Chem. Tech.]. 2020. V. 63. N 2. P. 105,110.

3. https://ru.wikipedia.org/wiki Ручин А.Б. Применение метода вермикультивирования для биодеградации твердых отходов // Молодой ученый. 2013. №3. С. 168–171.

4. Благадырёва, А.М. Оценка эффективности применения термически модифицированного дефеката для очистки сточных вод от нефтепродуктов и объяснение механизма процесса водоочистки // Экология, энерго- и ресурсосбережение, охрана окружающей среды и здоровья человека, утилизация отходов: тез. докл. Международной научно-практической конференция, 2009 г. Харьков, Т.2. С.333 -334.

5. Свергузова, Ж.А. Очистка модельных растворов и эмульсий от молочного жира, сыворотки и аспарагина модифицированным дефекатом // Геосистемы: факторы развития, рациональное использование, методы управления: материалы Международной научной конференции; под ред. д.г.н., проф. С.Я. Сергина. Туапсе: Стерх, 2008. С. 218-219.

6. Р.М.Усманов, А.Б.Абдикамалова, И.Д.Эшметов, Д.С.Салиханова Коллоидно-химические основы создания композиционных материалов на основе местных отходов для очистки кислых сточных вод. // Монография,- Ташкент: Навруз, 2020. - 155 С.

7. Usmonov R.M., KuldashevaSh.A., Salihanova D.S., Eshmetov I.D., Abdurakhimov S.A. Cleaning of waste water for fatty production by waste of sugar production - defecate//Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. № 9–10. 2018. -p.p. 82-86.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМОВ ТЕРМО - И ХИМИЧЕСКОЙ АКТИВАЦИИ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОАГУЛЯНТА-АДСОРБЕНТА ПРИ ОЧИСТКЕ СТОКОВ ТЕКСТИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

[1]Аймурзаева Л.Г., [2]Жумаева Д.Ж., [3]Айтбаева Х.Б., [1]Жумабаев Б.А.

[1]Нукусский государственный педагогический институт имени Ажинияза
[2]Институт общей и неорганической химии Академии наук Республики Узбекистан
[3]Нукусский филиал Самаркандского государственного ветеринарного медицинского университета животноводства и биотехнологии

В настоящее время в мире рациональное использование водных ресурсов является одним из важных и основных направлений в деятельности человека в области охраны окружающей среды. Все возрастающая потребность в воде для функционирования промышленных предприятий, в том числе текстильной и легкой промышленности, деятельность которых приводит к увеличению объёма производственных сточных вод настоятельно ставит вопрос о повышении степени очистки вод производств различного профиля. Из этого следует необходимость расширения научных исследований по разработке новых способов очистки, усовершенствованию ныне существующих технологий, в том числе и реагентного метода с применением адсорбентов с целью возврата воды в технологический цикл самих предприятий.

Для очистки сточных вод текстильных производству использовали ряд методов исследований. Это химические, физико-химические, биологические, адсорбционные, комбинированные и др. Но в основном применяли методы адсорбции с помощью полученных коагулянтов-адсорбентов серии АПАК на основе местного пестроцветного Ангренского каолиновой глине и природного мирабилита.

На основе лабораторных исследований были определены оптимальные технологические параметры получения коагулянта-адсорбента.

При термообработке шихты в муфельной печи при 600-650°С в течение 1-1,5 ч происходит обезвоживание каолина, ослабляется связь между ионами кристаллической решетки каолинита и он полностью превращается в метакаолинит. При этом активное соединение каолинита $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ легко реагирует с натрия сульфатом Na_2SO_4 с образованием сульфатов алюминия и железа на поверхности адсорбента.

При термохимическая активация смеси каолина и природного мирабилита идут процессы по нижеследующим уравнениям:

$$Na_2SO_4 \cdot 10H_2O = Na_2SO_4 + 10H_2O \qquad \mathbf{200°C \div 250°C}$$

$$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O = Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \qquad \mathbf{550°C \div 600°C}$$

$$\left.\begin{array}{l} Al_2O_3 \cdot SiO_2 + Na_2SO_4 = Al_2(SO_4)_3 + Na_2SiO_3 \\ \\ Fe_2O_3 + Na_2SO_4 = Fe_2(SO_4)_3 + Na_2SiO_3 \end{array}\right\} \mathbf{600°C \div 650°C}$$

При температуре 200°С÷250°С происходит обезвоживание натрия сульфата с выделением десяти молекул воды и переходом натрия сульфата в активную форму. При повышении температуры до 550°С каолинит также теряет две молекулы воды и начинает переходит в активную форму в виде метакоалинита. При нагреве каолина с сульфатом натрия при 600±50°С активная поверхность каолинита вступает в реакцию с сульфогруппой натрия сульфата. При этом на поверхности глинистых частиц образуются сульфаты алюминия и железа.

Для получения коагулянта-адсорбента в качестве сырья выбраны Ангренский пестроцветный каолин, природный мирабилит, а также чистый реагент сульфат натрия. Для определения оптимального режима термохимическая обработки их смеси в оптимальных соотношениях были обожжены в интервале температуры 400÷700°С.

Результаты эксперимента приведены в таблице 1, где показано количественное образование сульфатов алюминия и железа.

Таблица 1

Влияние температуры обжига на количество образования $Al_2(SO_4)_3$ и $Fe_2(SO_4)_3$

Наименование коагулянта-адсорбента серии АПАК	Каолин, гр	Мирабилит, гр	Na_2SO_4, гр	H_2O, мл	Температура активация, °С	Al2(SO4)3 ÷ Fe2(SO4)3, %
АПАК-1	1	1.7			400	0 ÷ 0
АПАК-2	1	1.7			500	1,0 ÷ 0,3
АПАК-3	1	1.7			600	22,0 ÷ 2,8
АПАК-4	1	1.7			700	17,0 ÷ 1,2
АПАК-5	1		1	0.75	400	0 ÷ 0
АПАК-6	1		1	0.75	500	1,2 ÷ 0,7
АПАК-7	1		1	0.75	600	23,0 ÷ 2,9
АПАК-8	1		1	0.75	700	19,0 ÷ 1,9

Из таблицы видно, что наибольшее количество сульфата алюминия и железа образуются при 600°С образцы АПАК-3 и АПАК-7. Так как, для получения АПАК-7 был использован чистый натрий сульфат, с целью удешевления конечного продукта был выбран для дальнейших исследований образец АПАК-3, который был получен на основе природного мирабилита.

Литература

1. https://acs-nnov.ru/stochnye-vody.html. Ссылаясь на источник https://zinref.ru/000_uchebniki/00800ecologia/000_lekcii_ecologia_04/487.htm

2. В.Н. Ануфриев, Очистка сточных вод предприятий текстильной промышленности, Водоснабжение и водоотведение №1 (43), 2015 г. С. 87-89

3. Аймурзаева Л.Г., Жумаева Д.Ж. Технология получение адсорбента-коагулянта на основе ангренского каолина и мирабилита// Журнал Universum: Химия и биология- Москва, 2022- №2 (92).

4. Аймурзаева Л.Г., Жумаева Д.Ж., Эшметов И.Д., Фузайлова Ф.Н., Абдурахимов А.Х., Барноева С.Б. Минералогический состав и физико - химические характеристики каолинов Ангренского месторождения //UNIVERSUM: Химия и биология: Электронный научный журнал, 2022 г. выпуск №9 (99).

РАЗРАБОТКА ЭКСТРАКЦИОННОЙ УСТАНОВКИ И МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА ЭКСТРАКЦИИ

Арсланова Гульшат Ринатовна, Гурьянов Денис Анатольевич.

Казанский национальный исследовательский технологический университет
94arslanovagulshat@mail.ru

Аннотация: В работе представлена установка для экстракции растительного сырья и математическое описание процесса экстракции фенольных соединений из коры и листьев деревьев семейства «Salicaceae». Описана методика проведения экспериментальных исследований и процесса экстракции.

Annotation: The paper presents an installation for the extraction of plant materials and a mathematical description of the process of extraction of phenolic compounds from the bark and leaves of trees of the Salicaceae family. The technique for carrying out experimental studies and the extraction process is described.

Ключевые слова: установка, математическое описание, экстракция

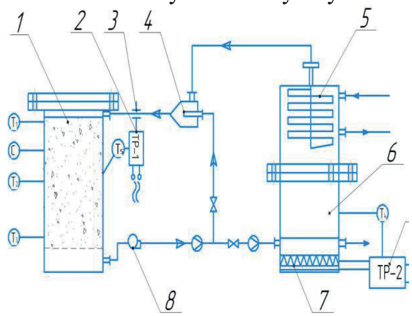
Key words: installation, mathematical description, extraction

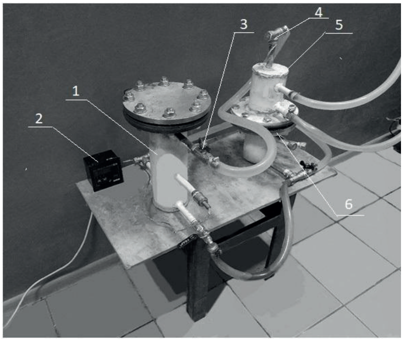
В настоящее время экстракция отдельных компонентов из различных видов растительного сырья является одним из распространённых технологических процессов во многих отраслях промышленности. Особое внимание уделяется исследованиям в области физиологии и биохимии растительного сырья, связанных с разнообразием и биологическим действием фенольных соединений — веществ вторичного метаболизма, образующихся в растениях [4].

Главной стадией в процессе извлечения фенольных соединений является процесс экстракции. Суть процесса заключается в выделении полезных веществ из твердого тела путем избирательной растворимости.

Для определения содержания фенольных соединений в листьях и коре деревьем семейства «Salicaceae» была разработана установка для циркуляционной экстракции (рис.1). Для исследования использовали измельченное сырье - кора и листья ивы (Salix) и осины (Populus tremula) семейства (Salicaceae), проходящее сквозь сито с диаметром отверстий 2 мм.

Измельченный материал помещался в экстрактор установки, в который также подавался экстрагент (водно-этанольный раствор). Экстрагент, проходя через слой сырья сверху вниз, пропитывал его, насыщался экстрактивными веществами и, при помощи циркуляционного насоса 8, поступал в нижнюю часть испарителя 6, где нагревался и выпаривался. Образовавшиеся пары экстрагента поднимались в конденсатор паров 5, где конденсировались. Конденсат эжекторным насосом 4, через нагревательный элемент 3, вновь подавался в верхнюю часть экстрактора 1. Оставшийся выпаренный экстракт сливался и поступал на сушку.





а) б)

Рис. 1. Экспериментальная установка для экстракции растительного сырья: принципиальная схема (а) и внешний вид (б): 1 – экстрактор; 2 – регулятор температуры; 3 – проточный нагревательный элемент; 4 – эжекторный насос; 5 – конденсатор паров;
6 – испаритель; 7 – индукционная плита; 8 – циркуляционный насос.

Сырье и экстрагент имели начальную температуру 20 ºС. Экстрагент, концентрация этанола в котором варьировалась от 40 до 80 %, подавался в верхнюю часть экстрактора посредством работы циркуляционного насоса, прокачивающего экстрагент через проточный нагревательный элемент. Температура экстрагента варьировалась от 25 до 75 ºС [5].

Математическое описание процесса экстракции фенольных соединений состоит из уравнения движения жидкости в капилляре частицы с принудительной циркуляцией экстрагента, которое запишется в виде полной скорости движения жидкости (м/с) [2]:

$$V_n = \frac{cos\theta}{4}\frac{\sigma}{\mu_{ж}}\frac{r}{l_ч} - \varphi_{тр}\cdot g\cdot\cos\varphi\cdot\tau + \frac{r^2\Delta p}{2\mu_{ж}l_{ж}}. \quad (1)$$

где r – радиус капилляра, м; θ– краевой угол смачивания пропитывающим раствором поверхности материала; $l_ч$ - толщина частицы, м; $\mu_{ж}$– вязкость пропитывающего раствора, Па·с; σ - поверхностное натяжение пропитывающего раствора, Н/м; τ– время пропитки, с; $\varphi_{тр}$– коэффициент трения; g– ускорение свободного падения, м/с^2; φ – угол наклона частиц; Δp – разность давлений снаружи и внутри частицы, Па.

В уравнении (1) первое слагаемое – скорость, приобретаемая жидкостью от сил капиллярного всасывания, второе – скорость, теряемая жидкостью от сил трения, третье - скорость, приобретаемая жидкостью от сил, возникающих при наличии принудительной циркуляции (закон Пуазейля).

Изменение содержания экстрагента в частице описывается уравнением:

$$\frac{dC_э}{dl_ч} = -\frac{j_{ж}}{k_m\cdot\rho_{0ч}}. \quad (2)$$

Учитывая, что поток жидкости в частице определяется поперечными размерами пор или пористостью частицы ε и скоростью жидкости v_n:

$$j_{ж} = v_n\rho_{ж}\varepsilon \quad (3)$$

в котором v_n, определяется по (1), можно записать:

$$\frac{dC_э}{dl_ч} = -\frac{v_n\rho_{ж}\varepsilon}{k_m\cdot\rho_{0ч}}. \quad (4)$$

Поделив обе части (4) на $d\tau$, или, если учесть, что $dl_ч = v_n d\tau$, получим:

$$\frac{dC_э}{d\tau} = -\frac{v_n\rho_{ж}\varepsilon}{k_m\cdot\rho_{0ч}}\frac{dl_ч}{d\tau} \quad (5)$$

или

$$\frac{dC_э}{d\tau} = -\frac{{v_n}^2\rho_{ж}\varepsilon}{k_m\cdot\rho_{0ч}}. \quad (6)$$

В уравнении (6) коэффициент массопроводности (м^2/с) k_m можно определить расчетным или экспериментальным путем.

Изменение температуры частицы во время принудительного обтекания нагретым экстрагентом описывается выражением:

$$\frac{\partial l_{сл}}{\partial\tau} = a\cdot\frac{\partial^2 t_{сл}}{\partial {l_{сл}}^2} \quad (7)$$

с начальным условием

$$t_{сл}(0, l_{сл}) = t_{сл\,нач} \quad (8)$$

и граничным условием

$$\alpha(t_э - t_{сл}) = -\lambda_{сл}\left.\frac{\partial t_{сл}}{\partial l_{сл}}\right|_{l_{сл}=0}, \quad (9)$$

где коэффициент теплоотдачи может быть определен как [3]:

$$\alpha = 0.01\frac{\lambda}{h}(\mathrm{Re}\cdot\mathrm{Pr}\cdot Ga)^{1/3} \qquad (10)$$

в случае турбулентного обтекания, ккал/м^2·час·°С и:

$$\alpha = 0{,}67\frac{\lambda}{h}\mathrm{Re}^{1/3}\cdot\mathrm{Pr}^{1/2}\cdot Ga^{2/9} \qquad (11)$$

в случае ламинарного, ккал/м^2·час·°С.

Безразмерные критерии, входящие в (10), (11), имеют следующие значения: $\mathrm{Re} = \frac{4\delta^*}{\mu g}$, где δ – плотность орошения в кгс/м·сек, то есть количество жидкости, орошающей 1 м периметра частицы в сек; $\mathrm{Pr} = \frac{3600 C_э \mu g}{\lambda}$; $Ga = \frac{gh^3}{\nu^2}$, где h – высота поверхности, м.

Коэффициент температуропроводности a в (7) определяется по формуле:

$$a = \frac{\lambda_{сл}}{c_{сл}\rho_{сл}}. \qquad (12)$$

Поток диффундирующего растворенного вещества (экстрактивные вещества) опишется согласно первому закону Фика (кг/м^2·с) и определится как:

$$j_{эв} = -D_{эв}\frac{dC_{эв}}{dl_ч}, \qquad (13)$$

где $C_{эв}$ – концентрация экстрактивных веществ, %; $D_{эв}$ – коэффициент диффузии, зависящий от параметров растворителя, проникающих частиц и температуры, см^2/с, $l_ч$ – длина частицы.

Выразив из (13) $C_э$ и дифференцируя по $\partial\tau$, получим:

$$\frac{dC_{эв}}{d\tau} = -\frac{j_{эв}}{D_{эв}}\frac{dl_{сл}}{d\tau}, \qquad (14)$$

где $j_{эв} = \frac{dG_{эв}}{A_{уд} m_{сл} d\tau}$, а $\frac{dl_{сл}}{d\tau} = v_п$ – скорость движения жидкости, определяемая по уравнению (1), $G_{эв}$ – количество диффундирующих экстрактивных веществ, г; τ – продолжительность процесса диффузии, с; $m_{сл}$ – масса слоя, г; $A_{уд}$ - удельная поверхность частиц материала, м^2/г.

В упрощенном виде уравнение (14) запишется в виде [1]:

$$\frac{dC_{эв}}{d\tau} = -\frac{j_{эв} v_п}{D_{эв}}. \qquad (15)$$

Коэффициент диффузии $D_{эв}$ (для каждого вида экстрактивных веществ имеет свои значения), который можно назвать коэффициентом массопроводности, по своей величине значительно ниже коэффициента свободной диффузии вследствие уменьшения площади переноса вещества (влияние пористости и капиллярной структуры пористого тела).

Литература

1. Аксельруд Г. А., Лысянекий В. М. Экстрагирование. Система твердое тело-жидкость. – Ленинград: Химия, 1974. – 256 с.

2. Измайлов А. В., Мальцев П. М., Мицкевич Э. Г. Математическое моделирование установившихся состояний противоточных экстракционных процессов // Теоретические основы химической технологии. –1975. – № 5. – С. 651-653.

3. Матвеенко Е. В. Математическая модель процесса экстракции древесной зелени *Juniperus sibirica burgsd* водным раствором этилового спирта // Материалы международной заочной научной конференции «Проблемы современной аграрной науки». – Красноярск, 2015. – С. 169-174.

4. Просвирников Д. Б., Арсланова Г. Р., Сафина А. В., Сафин Р. Г., Зиатдинова Д. Ф. Сравнительное исследование фенольных соединений листьев и коры деревьев семейства «Salicaceae» // Деревообрабатывающая промышленность. – 2021. – № 3. – С. 55-66.

5. Safin R. G., Prosvirnikov D. B., Arslanova G. R. Parametric Multidimensional Modeling of Extraction Processes in the Wood Chemical, Food and Pharmaceutical Industries // Proceedings of the 7th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2021). – 2021. –pp. 286-297.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТВЕРДОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ ИЗ СТ45

Аскарова Рушания Наилевна, ryshka08@gmail.com
Шайхетдинова Рамиля Сайдашевна, rami21@yandex.ru
Бронская Вероника Владимировна, dweronika@mail.ru

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Аннотация: С целью максимально эффективного использования рабочего инструмента, ресурсов предприятия и сокращения времени на стабильный выпуск готовой продукции необходимо определить оптимальные параметры для механической обработки нелегированных конструкционных углеродистых сталей. Совершенствование технологии обработки Ст45 на станках с ЧПУ, в частности, определение зависимости скорости резания на твердость и шероховатость поверхности влияют на рентабельность машиностроительных предприятий.

Ключевые слова: коэффициент шероховатости, твердость, механическая обработка.

Abstract: In order to maximize the efficient use of working tools, enterprise resources and reduce the time for stable production of finished products, it is necessary to determine the optimal parameters for machining non-alloy structural carbon steels. Improving the technology of processing steel on CNC machines, in particular, determining the dependence of the cutting speed on the hardness and surface roughness affect the profitability of machine-building enterprises.

Keywords: roughness coefficient, hardness, mechanical processing.

Одной из задач машиностроительных предприятий является сохранение устойчиво высокого уровня производительности и качества выпускаемой продукции при сокращении времени изготовления каждого изделия. Согласно новой концепции устойчивого производства, существует три основных компонента: экологичность, социальная направленность и экономическая составляющая [1-5]. Твердость и шероховатость поверхности можно отнести к качеству продукта, которое напрямую влияет на производительность, а значит и на прибыльность. Известно, что механическая обработка, в частности резание и шлифование на станках приводит к поверхностному упрочнению материала. Предложенная зависимость имеет большое значение для построения прогнозов и для анализа взаимозависимости параметров резания механическими свойствами изготавливаемой продукции из сталей марок Ст45.

Рассмотрим влияние параметров механической обработки на станках с ЧПУ на твердость и коэффициент шероховатости на примере зубчатого колеса из стали марки Ст45

График зависимости коэффициента шероховатости от скорости резания и скорости подачи на основе экспериментальных данных представлен на рис. 1.

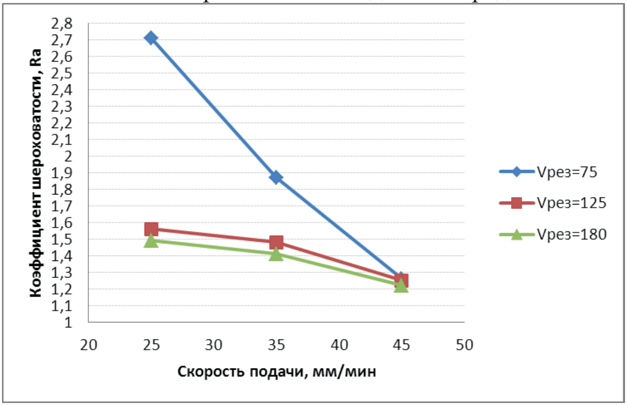


Рис. 1. График зависимости коэффициента шероховатости от скорости резания и скорости подачи.

Видно, что при наименьшей скорости резания коэффициент шероховатости сильно зависит от скорости подачи, при этом наилучший результат достигается при самой максимальной Vпод. При скоростях резания 125 и 180 об/мин и различных режимах подачи, коэффициент шероховатости меняется не критично от 1,22 до 1,56, при этом заметим, что наилучший результат все же достигается при наибольших скоростях резания и подачи. Также из эксперимента можно сделать вывод, что скорость резания практически не влияет на степень шероховатости, если скорость подачи будет достаточно высокой.

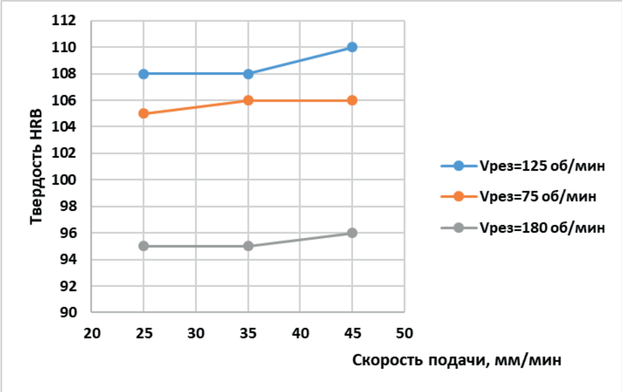


Рисунок 2. График зависимости твердости от скорости резания и скорости подачи

Анализируя данные, представленные на рис. 2, можно сделать вывод, что скорость подачи, в каждом случае, несущественно влияет на твердость получаемой поверхности. Более значительное влияние на твердость оказывает скорость резания, так при скорости резания 180 об/мин HRB показывает свои минимальные значения от 95 до 96. Это можно объяснить тем, что при такой скорости резания на поверхности обрабатываемого изделия температура повышается значительно выше критической точки Ac3 на диаграмме состояния сплавов Fe-Fe3C. При такой температуре для доэвтектоидных сталей, как правило, наблюдается небольшое снижение твердости вследствии перегрева, то есть происходит местная закалка с перегревом, что приводит к снижению твердости на 10-12% от максимально возможного значения.

При минимальной скорости резания 75 об/мин, то есть при более низких оборотах режущего инструмента, температура поверхности обрабатываемого изделия не достигает закалочных температур, тем не менее твердость повышается, относительно исходного образца, но не более чем на 15%.

Наиболее высокие значения твердости наблюдаются при скорости резания 125 об/мин, где температура поверхности на короткое время достигает необходимых закалочных значений $T \approx 835^{o}C$, что приводит к наибольшему увеличению твердости на обработанной поверхности.

На основе этой работы можно говорить о том, что при оптимальных значениях скорости резания и скорости подачи были достигнуты наилучшие характеристики поверхности с более низкой шероховатостью поверхности и хорошей твердостью. Оптимизация рабочих процессов, в частности параметров резания на станках с ЧПУ, может в значительной мере сократить время изготовления и на порядок увеличить качество выпускаемой продукции на машиностроительных предприятиях, что в свою очередь повысит эффективность и экономичность производственного процесса в целом.

Литература

1. Goutam D.R. et.al , Analysis of Surface Roughness and Hardness in Titanium Alloy Machining with Polycrystalline Diamond Tool under Different Lubricating Modes, Materials Research, 17(4): 1010-1022, 2014.

2. Skeeba V, Ivancivsky V., Improving the efficiency of surface-thermal hardening of machine parts in conditions of combination of processing technologies, integrated on a single machine tool base, Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты), 23(3), 45-71, 2021

3. Domnita F. F., Research of environment –friendly techniques influence on gear accuracy in context of sustainable manufacturing, proceedings of the romanian academy, Series A, Vol. 14, pp. 56–63, Number 1,2013

4. Крячко А.А., Обработка металлов: давление, в сборнике: Новые технологии - нефтегазовому региону, материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. 2018. С. 71-73.

5. Анкудинов В.О., Шайхетдинова Р.С., Бронская В.В., Харитонова О.С., Аминова Г.А. Анализ прочностных характеристик защитного покрытия трубопроводов в зависимости от температуры // В сборнике: Наука, технологии, общество - НТО-2021. сборник научных статей по материалам Всероссийской научной конференции. Красноярск, 2021. С. 111-115.

6. Богданов Д.С., Луков Д.К., Автоматизация технологических процессов механической обработки металлов, в сборнике: Научные исследования: ключевые проблемы III тысячелетия, сборник научных трудов по материалам XXI Международной научно-практической конференции. 2018. С. 28-31.

7. Аскарова Р.Н., Рязанова В.А. Металлы и сплавы

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА В СПИРАЛЬНОМ ВАКУУМНОМ НАСОСЕ ПРИ РАСЧЕТАХ ОТКАЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Ахметова Камила Ильшатовна[1,2], Тюрин Алексей Викторович[1,2],
Райков Алексей Александрович[1], Бурмистров Алексей Васильевич[1],

[1]Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, Республика Татарстан, 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68
[2]АО Вакууммаш, 420054, г. Казань, ул. Тульская, 58

Аннотация: В работе рассматриваются причины изменения величины радиального зазора и порядок перехода от температурных полей спиральных элементов к величине тепловых деформаций. Разработана методика определения величины радиального зазора при расчетах индикаторных диаграмм с учетом действительного профиля спирали. Проведена оценка адекватности методики на основе сравнения расчетных и экспериментальных индикаторных диаграмм.

Abstract: The paper considers the reasons for the change in the radial gap and the order of transition from the temperature fields of spiral elements to the magnitude of thermal deformations. A method for determining the radial clearance value in the calculations of indicator diagrams, taking into account the actual profile of the spiral, has been developed. The adequacy of the methodology was assessed based on a comparison of calculated and experimental indicator diagrams.

Ключевые слова: спиральный насос, индикаторные диаграммы, радиальный зазор, температурные поля, тепловые деформации.

Характеристики насоса вакуумного спирального (НВСп) во многом зависят от величины радиального зазора между спиральными элементами [1, 2]. Поэтому важно вести расчет характеристик, оперируя максимально точной величиной радиального зазора в рабочих условиях. Для этого необходимо определить величину, на которую может изменяться радиальный зазор под действием различных факторов. В работах [3, 4] было установлено, что газовые силы, действующие на рабочие элементы насоса в условиях вакуума, не могут вызвать значительных изменении радиального зазора. Совершенно по-другому выглядит ситуация с тепловыми деформациями. В виду того, что спирали изготавливаются из материала В95 или аналогичных сплавов, в основе которых используется алюминий, имеющий достаточно высокий коэффициент теплового расширения, тепловые деформации нужно обязательно учитывать [5].

В качестве объекта исследования используется спиральный насос НВСп-12 с геометрической быстротой действия 15 м^3/ч [6].

В основе расчета тепловых деформаций лежит расчет процесса теплообмена газа со спиральными элементами, для этого в математической модели применяется известное выражение [7]:

$$dQ = \alpha F_{CT}(T_{CT} - T_{\Gamma})d\tau \ , \qquad (1)$$

где α – коэффициент теплоотдачи, $F_{\text{ст}}$ – площадь поверхности стенки, $T_{\text{ст}}$ – температура стенки, $T_{\text{г}}$ – температура газа, τ – время.

Температурные поля спиральных элементов определяются с помощью термодинамической модели рабочего процесса НВСп [8], основанной на использовании метода конечных элементов, реализованного в пакете MATLAB [9].

После расчета температурного поля спиральных элементов эти данные снова передаются в математическую модель. Для этого температурное поле преобразуется в зависимость средней температуры стенок рабочего объема от угла поворота вала. Затем проводятся итерационные расчеты с контролем сходимости по температуре пера спирали. Полученные зависимости температур стенок от угла поворота снова заносятся в термодинамическую модель, и расчет повторяется для уточнения результатов.

В результате расчета находятся температурные поля подвижного (рис. 1) и неподвижного спиральных элементов. Стоит отметить, что максимальная температура спиралей наблюдается ближе к центру, точнее за один виток до конца спирали. Это связано с обратными перетеканиями горячего газа с нагнетания и его повторным сжатием. Еще стоит отметить, что уровень температур выше у подвижного спирального элемента, так как он располагается в вакуумной полости, в отличии от неподвижного, который обдувается вентилятором со стороны атмосферы и интенсивно отдает тепло в окружающую среду.

Далее полученные температурные поля используются для расчета тепловых деформаций. Для этого применяется метод конечных элементов, реализованный в пакете Ansys Fluent [10]. В результате находятся тепловые деформации (рис 2).

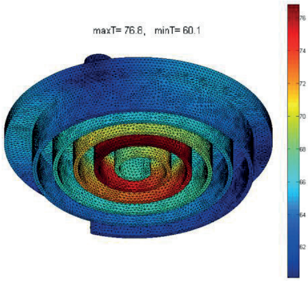


Рис. 1 – Температурное поле подвижного спирального элемента ($P_{вх}$ = 20 кПа, n = 1500 об/мин)

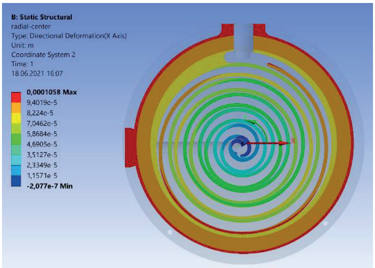
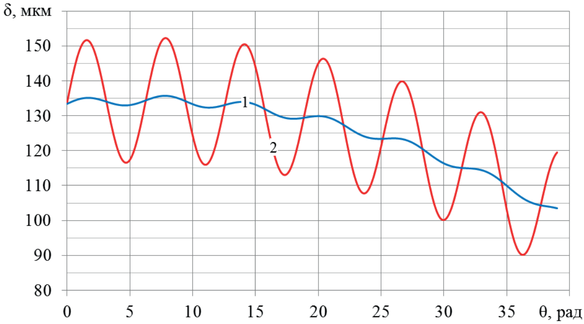


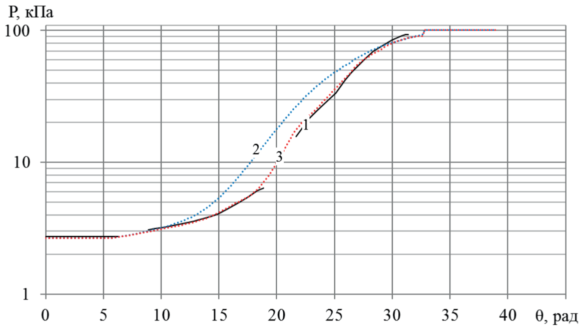
Рис. 2 – Радиальные тепловые деформации ($P_{вх}$ = 20 кПа, n = 1500 об/мин)

На основе полученных величин тепловых деформаций вычисляется величина радиального зазора по углу поворота приводного вала (кривая 1 на рис.3). Далее величина зазора вносится в математическую модель, и расчет повторяется по алгоритму, описанному выше. В результате проведения нескольких итераций рассчитываются индикаторные диаграммы с учетом изменения радиального зазора от тепловых деформаций.



1 – зазор с учетом тепловых деформаций;
2 – зазор с учетом тепловых деформаций и обмеров
Рис. 3 – Изменение радиального зазора НВСп
(e = 4,59 мм, n = 1500 об/мин, $P_{вх}$ = 2,66 кПа)

Приведенное на рис. 4 сравнение экспериментальных (кривая 1) и расчетных (кривая 2) индикаторных диаграмм показало, что недостаточно учитывать только величину тепловых деформаций, поскольку на результаты накладывается еще отклонение действительного профиля спирали от теоретического за счет погрешности изготовления. Чтобы учесть последний фактор для нахождения наиболее точной величины радиального зазора необходимо использовать в качестве величины начального приближения результаты обмеров профильной части спиральных элементов (рис. 3). В данной работе для этих целей применялась координатно-измерительная машина ZEIZZ. Отметим, что расчет индикаторной диаграммы по данной методике дает наилучшее согласие с экспериментом (рис.4).



1 – эксперимент; 2 – расчет с учетом тепловых деформаций;
3 – расчет с учетом тепловых деформаций и обмеров
Рис. 4 – Индикаторная диаграмма НВСп
(e = 4,59 мм, n = 1500 об/мин, $P_{вх}$ = 2,66 кПа)

Нужно отметить, что на рис. 3 начало шкалы по оси абсцисс соответствует началу спирали на периферии. Также подчеркнем, что представленные графики относятся к радиальному зазору, образованному внутренней поверхностью подвижной спирали и внешней поверхностью неподвижной. Поскольку температура подвижной спирали растет быстрее неподвижной, то данный зазор при работе насоса увеличивается. Зазор же между внешней поверхностью подвижной спирали и внутренней поверхностью неподвижной, напротив будет уменьшаться от центра спирали к периферии. Таким образом, график для этого зазора будет подобный рис. 3, только наклон кривой 1 будет противоположный.

Литература

1. Райков, А.А. Моделирование тепловых деформаций спиральных элементов безмасляного вакуумного насоса / А. А. Райков, Р. Р. Якупов, С. И. Саликеев, А. В. Бурмистров // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. - 2015, – № 3 (102). - С.92-102.
2. Burmistrov, A. Mathematical model of working process of oil free scroll vacuum pump : Influence of leakage and heat transfer on pumping characteristics / Burmistrov A., S. Salikeev, Raykov A., M. Fomina // Vakuum in Forschung und Praxis. - 2017. - Vol. 29. - Is. 6. – P. 28-31.
3. Райков, А.А. Силовые деформации рабочих элементов безмасляного спирального вакуумного насоса / А. А. Райков, Р. Р. Якупов, А. В. Бурмистров, С.И. Саликеев // Известия ВУЗов. Машиностроение. – 2015, №1 (658) – С.57-63.
4. Райков А. А., Бронштейн М. Д., Бурмистров А. В., Саликеев С. И. Радиальные и осевые газовые силы в безмасляных спиральных вакуумных насосах // Вестник Казанского Технологического Университета. – 2014. – Т. 17, № 2. — С. 267—270.
5. Бурмистров А.В. Улучшение характеристик спирального вакуумного насоса за счет компенсации тепловых деформаций / А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев, А.А. Райков, А.В. Тюрин // Вакуумная техника и технология.
6. Капустин, Е.Н. Создание высокотехнологичного производства безмасляных спиральных вакуумных насосов в России / Е.Н. Капустин, А.Е. Капустин, А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев // Вестник Казанского технологического университета. – 2014, Т.17. - № 19 - С. 280 -283.
7. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. – Москва : Энергия, 1977. — 344 с. –2019. – Т. 29. – № 1. – С. 9-13.
8. Якупов, Р.Р. Расчёт процесса теплообмена в математической модели спирального вакуумного насоса / Р.Р. Якупов, А.А. Райков, С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров // Материалы XVII Международной научно-технической конференции по компрессорной технике, Казань, 2017. – С. 72-78.

9. Кетков Ю.Л, Кетков А.Ю., Шульц М.М. MATLAB 7: программирование, численные методы. Учеб. пособ. СПб.: БХВ-Санкт-Петербург, 2005. 752 с.
10. Ansys, Inc. license file for Kazan National Research Technology University c/n 657938.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НАСАДКИ MELLAPAK В ПРОЦЕССЕ ОЧИСТКИ СЕРОВОДОРОДСОДЕРЖАЩИХ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ

Баутдинова Алина Рашитовна – магистр кафедры каф. машин и аппаратов химических производств КНИТУ
Осипов Эдуард Владиславович – канд. техн. наук, доц. каф. МАХП КНИТУ

Ключевые слова: абсорбер, материальный баланс, тепловой баланс, насадка, гидравлический расчет

Аннотация: В статье представлена методика расчета определения диаметра и высоты насадки на основе материального и теплового баланса абсорбера.

Abstract: The article presents a method for calculating the diameter and height of the packing based on the material and heat balance of the absorber.

В последнее время в промышленности растет интерес к насадочным аппаратам, увеличивается количество внедрений колонн с насадками, поскольку в них обеспечивается лучший контакт обрабатываемых газов с абсорбентом, чем в полых распылителях, благодаря чему интенсифицируется процесс массопереноса и уменьшаются габариты очистных устройств.

Целью данной работы является подбор насадочного устройства для очистки сероводородсодержащего воздуха, согласно расчетам материального и теплового баланса абсорбера с использованием 45% водного раствора метилдиэтаноламина (МДЭА).

Газ, содержащий сероводород, подается в нижнюю часть аппарата, а очищенный газ выводится из верхней части аппарата на дальнейшую переработку. Водный раствор метилдиэтаноламина подается в верхней части аппарата, а насыщенный раствор МДЭА покидает абсорбер снизу и подается в десорбционную колонну на регенерацию. [1]

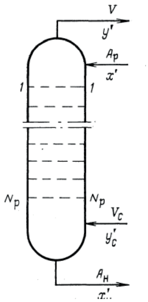


Рис. 1 – Схема для расчета материального баланса абсорбера

Количество раствора МДЭА в ед. времени определяется по формуле:

$$A_p = v_p * \rho_p, \qquad (1)$$

где ρ_p – плотность 45%-го водного раствора МДЭА при температуре входа в аппарат t_1 = 40 ˚С.

Расход газов, поглощенных раствором МДЭА определяется по формуле:

$$G_K = \sum G_{ci} - \sum G_i, \qquad (2)$$

Расход насыщенного кислыми компонентами водного раствора МДЭА определяется по следующей формуле:

$$A_H = A_P + G_K, \qquad (3)$$

Результаты расчетов материального баланса абсорбера представлены в таблице 1.

Таблица 1. Материальный баланс абсорбера

Материальный баланс абсорбера			
Поток, поступающий в абсорбер	Кол-во, кг/ч	Поток, выводимый из абсорбера	Кол-во, кг/ч
Неочищенный газ Vc	259323,71	Очищенный газ V	250857,56
Регенерированный р-р МДЭА A_P	181125	Насыщенный р-р МДЭА A_H	189591,15
Σ	440448,71	Σ	440448,71

Тепловой баланс абсорбера составляется для определения температуры, при которой насыщенный раствор МДЭА выводится из аппарата. Уравнение теплового баланса имеет вид:

$$Q_{V_c} + Q_{A_p} + Q_a = Q_V + Q_{A_H}, \qquad (4)$$

где Q – количество тепла соответствующего материального потока, кВт; Q_a – количество тепла, выделяемого при абсорбции компонентов, кВт; Q_{V_c} – количество тепла, вносимого в аппарат газовым сырьем при температуре 30˚С; Q_{A_p} – приход тепла с регенерированным водным раствором МДЭА равен:

Тепловой баланс представлен в таблице 2.

Таблица 2. Тепловой баланс абсорбера

Тепловой баланс абсорбера				
Обозначение потока	Кол-во, кг/ч	Темп-ра, ˚С	Энтальпия, кДж/кг	Кол-во тепла, кВт
Приход				
Q_{Vc}	259323,71	30	449,495	32379,053
Q_A	181125	40	123,6	6218,625
Q_a	3879,886	-	1905	2053,106
Σ	-	-	-	40650,784
Расход				
Q_V	250857,56	30	483,241	33673,539
$Q_{Ан}$	189591,15	43	132,486	6977,245
Σ	-	-	-	40650,784

Поглощение в абсорбере кислых компонентов раствором МДЭА описывается следующими уравнениями химических реакций:

2RNH2 + H2S → (RNH3)2S (5)

(RNH3)2S + H2S → 2RNH3HS (6)

Изменение изобарного потенциала реакции рассчитывается по уравнению:

$$\Delta G_j = \Delta H_j^0 - T\Delta S^0, \tag{7}$$

где ΔH° - изменение энтальпии образования, кДж/моль; ΔS° - изменение энтропии реакции, кДж/(моль·К).

Расчет состава, выводимого из аппарата, представлен в таблице 3.

Таблица 3. Расчет состава насыщенного абсорбента

Расчет состава насыщенного абсорбента						
Компонент	Мольная масса Mi	Количество		Содержание		Mici'
		gi, кг/ч	ni= gi/Mi	ci=gi/Σgi	ci'=ni/Σni	
RNH2 (МДЭА)	119,0	25286,88	212,49	0,8574	0,6494	77,28
H2S	34,0	3783,825	111,29	0,1283	0,3401	11,56
(RNH3)2S	156,2	250,586	1,60	0,0085	0,0049	0,77
RNH3HS	95,1	172,383	1,81	0,0058	0,0055	0,53
Σ	-	29493,67	327,20	1,0000	1,0000	90,14

Диаметр абсорбера в наиболее нагруженном нижнем его сечении рассчитываем по формуле:

$$D_a = \frac{\frac{1800\,L}{\rho_ж} + \sqrt{(K_0 C + 35) * \frac{3600\,G}{\sqrt{\rho_п * (\rho_ж - \rho_п)}}}}{K_0 C + 35} = 2{,}43\text{м} \quad (8)$$

По каталогу для диаметра 2500 мм выбираем насадку Mellapak со следующими параметрами: удельная поверхности: ε=170 м^3/ м^3; свободный объём насадки: a=0,95; тип стали: нержавеющая (12Х18Н10Т); гофрированный угол: 45˚.

рис.2 – Внешний вид насадки Mellapak 250Y

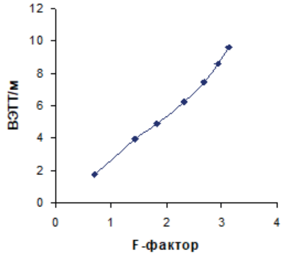


рис.3 – Массообменные характеристики насадки Mellapack 250 Y

Гидравлическое сопротивление сухой (неорошаемой) насадки [2]:

$$\Delta P_c = \lambda * \frac{H}{d_э} * \frac{w^2 * \rho_y}{2 * \epsilon^2}, \quad (9)$$

где λ - коэффициент сопротивления сухой неорошаемой насадки, зависит от режима движения газа в насадке.

Критерий Рейнольдса для газа в верхней и нижней частях колонны соответственно определяется по следующей формуле:

$$R_{ey} = \frac{W_п^2 * d_э * \rho_y}{\epsilon * \mu_y} \quad (10)$$

$$R_{ey} = \frac{R_{ey\,в} + R_{ey\,н}}{2} = 46773{,}75 \quad (11)$$

Следовательно, режим движения турбулентный. Для турбулентного режима коэффициент сопротивления сухой насадки в виде регулярно уложенной насадки будет составлять 0,163.

Гидравлическое сопротивление орошаемой насадки в верхней и нижней части колонны [3]:

$$\Delta P = \Delta Pсух * (1 + k * U), \quad (12)$$

где U - плотность орошения, м^3/ (м^2 ·с); k - опытный коэффициент (для правильно уложенных насадок k = 0,04).

Общее гидравлическое сопротивление насадки:

$$\Delta P = \Delta P_в + \Delta P_н = 1710{,}83 \text{ Па}. \quad (13)$$

Высота единицы переноса в жидкой фазе [4]:

$$h_x = 0{,}258 \Phi c Pr_x^{0{,}5} Z^{0{,}15}, \quad (14)$$

где c и Ф — коэффициенты, определяемые из экспериментальных зависимостей, приведенных в справочной литературе; Z — высота слоя насадки, которая из условия прочности опорной решетки и нижних слоев насадки, а также из условия равномерности распределения жидкости по насадке не должна превышать 3 м.

Высота единицы переноса в паровой фазе [4]:

$$h_y = \frac{0{,}0175 \psi Pr_y^{0{,}5} d^{1{,}24} Z^{0{,}33}}{(L_s f_1 f_2 f_3)^{0{,}6}} \quad (15)$$

где y — коэффициент, определяемый из экспериментальных зависимостей, приведенных в справочной литературе; d — диаметр колонны, м.

$$f_1 = \mu_x^{0{,}16}; \quad (16)$$

$$f_2 = \left(\frac{1000}{\rho_x}\right)^{1{,}25}; \quad (17)$$

$$f_3 = \frac{(72{,}8 * 10^{-3})^{0{,}8}}{\sigma} \quad (18)$$

Число единиц переноса определяем по F-фактору из рисунка 3:

- для верхней части колонны nв = 6;
- для нижней части колонны nн = 2.

Высота насадки в верхней части колонны:

$$H_в = h_{оув} * nв \quad (19)$$

Высота насадки в нижней части колонны:

$$H_н = h_{оун} * nн \quad (20)$$

Общая высота насадки в колонне:

$$H_{обн} = H_в + H_н = 4{,}204 \text{ м} \quad (21)$$

Таким образом, исходя из расчетов материального и теплового балансов, была подобрана насадка типа Mellapak Y, диаметром 2500 мм и высотой 4,3 м. Для определения общей высоты насадки был выполнен гидравлический расчет с определением турбулентного режима движения газа в насадке, по массообменным характеристикам насадки определили число единиц переноса для верхней и нижней частей колонны, а высоту единиц переноса определили как тангенс угла наклона касательной для верхней и нижней частей колонны.

Литература

1. Кузнецов А.А., Судаков Е.Н. Расчеты основных процессов и аппаратов переработки углеводородных газов, М., Химия, 1983, с. 224.

2. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов. Л.: Химия, 2007, с. 575.

3. Лаптева Е.А. Энергосбережение на технологической установке разделения этаноламинов: ГОУ ВПО Казанский государственный энергетический университет. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, Казань, 2009, с.169.

4. Дытнерский Ю.А., Процессы и аппараты химической технологии. 2-е изд., перераб. и дополн.- М.: Химия, 2010, с. 493.

КРИОГЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МАЛОТОННАЖНОГО ПРОИЗВОДСТВА СПГ

Визгалов Сергей Владимирович, Евстигнеева Екатерина Андреевна, Петрушин Виктор Сергеевич

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»
email: sv_kstu@rambler.ru

Представлен обзор и анализ основных применяемых в России технологий малотоннажного производства СПГ, для потребления на внутреннем рынке. Разработана методика термодинамического расчета цикла с азотным газовым охлаждением природного газа, получаемого из магистрального трубопровода. Представлены некоторые результаты расчетов в виде графических зависимостей удельного расхода азота и мощности от температуры предварительного охлаждения азота, сделаны выводы.

Малотоннажное производство СПГ, Цикл с азотным газовым охлаждением, Термодинамический расчет, Характеристики цикла

A review and analysis of the main low-tonnage LNG production technologies used in Russia for consumption in the domestic market is given. A method for thermodynamic calculation of a cycle with nitrogen gas cooling of natural gas obtained from a main pipeline has been developed. Some calculation results are presented in the form of graphical dependences of the specific nitrogen consumption and power on the nitrogen pre-cooling temperature, and conclusions are drawn.

Cycle with nitrogen gas cooling, thermodynamic calculation, cycle characteristics

Как указывается в ряде работ [1, 2] расширение сферы применения сжиженного природного газа (СПГ) как энергоносителя требует непрерывного развития производства этого вида энергоресурса по всей территории России, что осуществляется в рамках строительства мини или малотоннажных заводов СПГ, производительностью одной линии до 1,5 т/час, порядка 10-15 тыс. тонн СПГ в год. Их главными особенностями являются достаточная простота цикла, применение по возможности серийного оборудования, блочная поставка на место монтажа в состоянии заводской готовности и минимальное время на ввод в эксплуатацию.

В таких установках нашли применение главным образом две группы криогенных циклов: циклы, в которых природный газ охлаждается внешним источником – хладагентом, циркулирующим в замкнутом контуре и циклы с использованием части самого природного газа как хладагента, без привлечения каких-либо посторонних веществ.

Начиная с 2010 года в России вводятся заводы малотоннажного производства СПГ, работающие по азотному газовому циклу, их преимуществами являются довольно низкие удельные затраты энергии на единицу жидкого продукта. Среди них можно назвать объекты ООО «Газпром СПГ технологии» - завод СПГ в Пермском крае (н.п. Канюсята), введенный в 2014 году и комплекс по производству, хранению и отгрузке сжиженного природного газа (КСПГ) в республике Татарстан (н.п. Садилово), введенный в 2022 году.

Данные заводы отличает высокая степень автономности, в качестве потребляемого ресурса выступает лишь природный газ, поступающий на завод от в частности узла замера, редуцирования и подготовки газа.

Принципиальная схема КСПГ, работающего по технологии полного сжижения природного газа с внешним азотным охлаждением представлена на рис. 1, термодинамический цикл по сжижаемому продукту - на рис. 2.

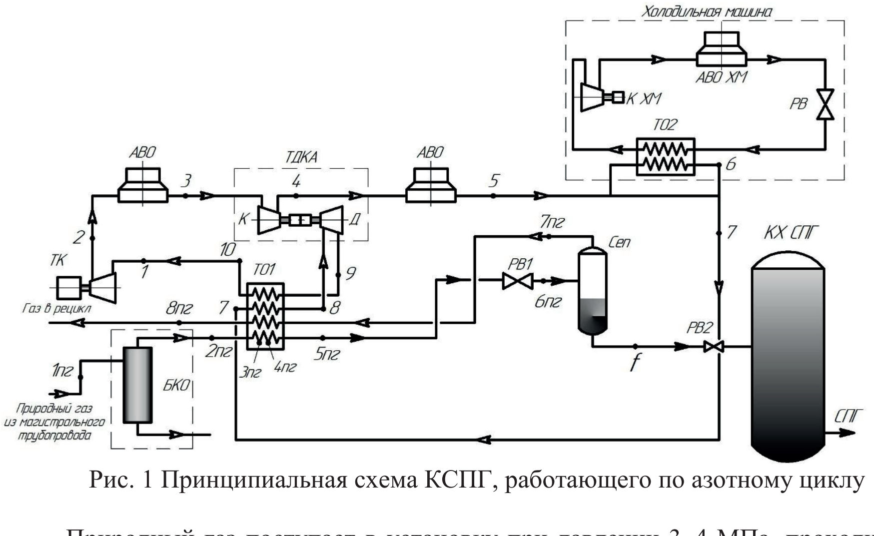


Рис. 1 Принципиальная схема КСПГ, работающего по азотному циклу

Природный газ поступает в установку при давлении 3–4 МПа, проходит очистку, осушку в *БКО*, затем охлаждается, переходит в жидкое состояние и переохлаждается в многопоточном теплообменнике *ТО1* за счет газообразного азота и обратного потока паров из сепаратора *Сеп*, далее природный газ дросселируется в *РВ1* до давления 0,15–0,3 МПа и в состоянии влажного пара поступает в сепаратор, пары низкого давления образуют обратный поток, жидкость сливается в криогенное хранилище КХ СПГ, откуда выдается потребителю.

Азот циркулирует в газовом цикле: сжимается в турбокомпрессоре *ТК*, теплота сжатия отводится к воздуху в аппаратах воздушного охлаждения АВО, затем идет поджатие азота компрессоре турбодетандерно-компрессорного агрегата (ТДКА), далее азот последовательно охлаждается воздухом и в теплообменнике внешней холодильной машины до точки 7, затем поступает в основной теплообменник *ТО1*, где продолжает охлаждаться перед подачей в турбодетандер ТДКА, расширяясь в нем азот приобретает самую низкую температуру в цикле и поступает на охлаждение природного газа в *ТО1*, откуда нагревшись всасывается в ТК.

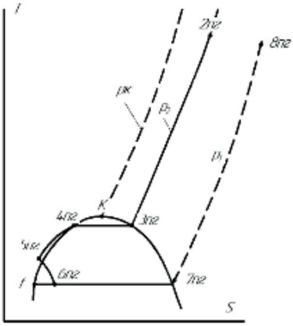


Рис. 2. Схема цикла сжижения природного газа в диаграмме T-s

В качестве исходных данных при составлении расчетной термодинамической модели выступали заданная производительность по СПГ, давление на потоке природного газа до и после его дросселирования в сепаратор, а также давление и температура на всасывании в азотный турбокомпрессор, температуры азота после воздушных теплообменников АВО и характеристики азотного турбокомпрессора, КПД ТДКА.

Исследовалось влияние предварительного охлаждения газа в теплообменнике ТО2, а конкретно температуры азота T_7 и температуры природного газа на выходе из теплообменника ТО1 $T_{5пг}$ на характеристики установки.

Некоторые из полученных характеристик установки в виде зависимостей удельного расхода азота $\overline{m}_{Аз}$, суммарной мощности N представлены на рис. 3, 4. Характеристики получены при давлении природного газа на входе 3,4 МПа, давлении в сепараторе 0,16 МПа, при трех значениях температур на выходе его из теплообменника ТО1 (точка 5пг): -155°C, -150°C, -145°C. В зависимости от температуры $T_{5пг}$ также изменяется коэффициент ожижения: 0,99; 0,951; 0,936.

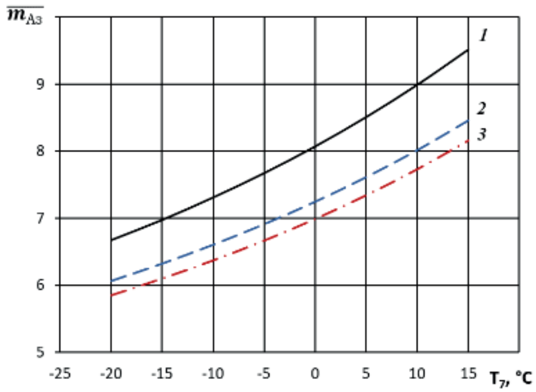


Рис. 3. Зависимость удельного расхода азота от температуры предварительного охлаждения T_7 при $T_{5пг}$=-155°C; 2- $T_{5пг}$=-150°C; 3- $T_{5пг}$=-145°C

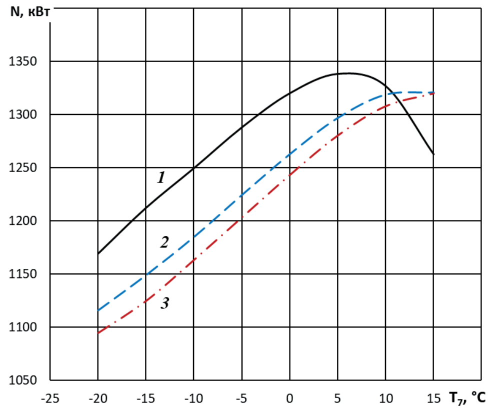


Рис. 4. Зависимость мощности установки от температуры предварительного охлаждения T_7 (обозначения как на рис. 3)

Из анализа полученных характеристик можно отметить, что понижение температуры природного газа перед основным теплообменником ТО1 приводит к снижениям как удельного и абсолютного расхода азота в цикле, производительности компрессора, так и затрачиваемой мощности установки в целом. Однако кривые N=f(T_7) имеют максимум, зависящий от температуры $T_{5пг}$.

Понижение температуры природного газа на выходе из теплообменника $T_{5пг}$ с одной стороны способствует повышению коэффициента ожижения, но также приводит к росту расхода азота и затрат мощности в цикле, так как при этом требуется большая холодопроизводительность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Визгалов С. В., Хисамеев И. Г. Методика и результаты расчета малотоннажного цикла среднего давления с турбодетандером, работающем на перепаде давления для сжижения природного газа // Вестник Международной академии холода. 2021. № 1. С. 22-27. DOI: 10.17586/1606-4313-2021-20-1-22-27.

2. Кондратенко А.Д. и др. Российские малотоннажные производства по сжижению природного газа / А.Д. Кондратенко, А.Б. Карпов, А.М. Козлов, И.В. Мещерин //Нефтегазохимия, 2016, № 4. С. 31-36.

3. Бармин И.В., Кунис И.Д. Сжиженный природный газ вчера, сегодня, завтра/ под ред. А.М. Архарова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 256 с.

4. Федорова Е.Б. Современное состояние и развитие мировой индустрии сжиженного природного газа: технологии и оборудование. – М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2011. – 159 с.

РАЗРАБОТКА И ОСВОЕНИЕ НОВОЙ ТЕХНИКИ ВАКУУМНОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

А.И. Власенков[1,2], А.А. Исаев [1,2], А.В. Бурмистров [2], С.И. Саликеев [2], Е.Н. Капустин [1]

[1] АО Вакууммаш, Россия, г. Казань, ул. Тульская, 58;
[2] Казанский национальный исследовательский технологический университет,
e-mail: isaevaa050391@yandex.ru

Аннотация. В связи с возрастающими потребностями промышленности в безмасляных средствах откачки АО «Вакуумаш» проводит разработку и осваивает производство нескольких линеек новых для России вакуумных насосов.
Благодаря этому появится ряд безмасляных высокопроизводительных винтовых, двухроторных типа и турбомолекулярных вакуумных насосов.

Annotation. Due to the increasing needs of the industry for oil-free pumping means, JSC "Vacuumash" is developing and mastering the production of several lines of vacuum pumps new to Russia. Thanks to this, a number of oil-free high-performance screw, twin-rotor type and turbomolecular vacuum pumps will appear.

Ключевые слова: насос типа Рутс, винтовой насос, турбомолекулярный насос, разработка, производство.

Вакуумное машиностроение является одной из важнейших отраслей промышленности и по своей сути - драйвером развития всех высокотехнологичных направлений производства. От успехов вакуумного машиностроения зависит состояние практически всех сфер промышленного производства, от легкой и пищевой отраслей до электронной и оборонной промышленностей.

Безусловно, основой вакуумной отрасли является производство средств откачки – вакуумных насосов и агрегатов, обеспечивающих получение и поддержание вакуума. На данный момент на территории России основным производителем вакуумных насосов является АО «Вакууммаш» (г. Казань). Но исторически Вакууммаш производил вакуумные насосы, которые работают с использованием вакуумного масла. Это очень хорошие и надёжные насосы, но сегодня наука и промышленность предъявляют новые требования к вакууму – в нем не должны присутствовать углеводороды. Поэтому «сухие» насосы занимают всё большее место на рынке и основные тенденции развития вакуумного машиностроения связаны с разработкой и использованием безмасляных средств откачки [1].

В свете вышесказанного, а также учитывая курс на импортонезависимость, АО «Вакууммаш» совместно с Казанским национальным исследовательским технологическим университетом (КНИТУ) при поддержке Министерства образования и науки РФ в 2013 году начали проект по разработке и созданию производства первого в России безмасляного спирального вакуумного насоса. А уже в 2016 году АО «Вакууммаш» начался серийный выпуск целой линейки спиральных вакуумных насосов НВСп-4; НВСп-12; НВСп-35 и затем НВСп-60 производительностью 4; 12; 35 и 60 $м^3/ч$ соответственно [2, 3]. В настоящее время данное производство расширяется. Однако, данный тип насосов имеет ограничения по быстроте действия (не выше $60 м^3/ч$), что в не позволяет решать все задачи отечественной промышленности в таких отраслях как: химическая, фармацевтическая, металлургическая, космическая и т.д.

Поэтому на АО «Вакууммаш» с 2019 года начата разработка и освоение выпуска новых безмасляных вакуумных насосов, в том числе:

1. Винтовых вакуумных насосов НВВ-630 рис. 1а производительностью 630 $м^3/ч$ (средство создания низкого и среднего вакуума);
2. Двухроторных вакуумных насосах НВД-1000 и НВД-2100 рис. 1б и рис. 1в производительностью1000 и от 2100 до 4200 м3/ч соответственно (средство создания среднего вакуума);
3. Турбомолекулярных вакуумных насосов НВТ-400 производительностью 3200 л/с (средство высоковакуумной откачки).

Винтовые вакуумные насосы рис.1а являются лидером среди всех видов безмасляной низко- и средне-вакуумной откачки . Винтовая машина - основной конкурент системам откачки с масляным уплотнением [4]. Особенности конструкции роторного механизма позволяет использовать данный насос в «грязных» промышленных технологических процессах, даже в металлургии.

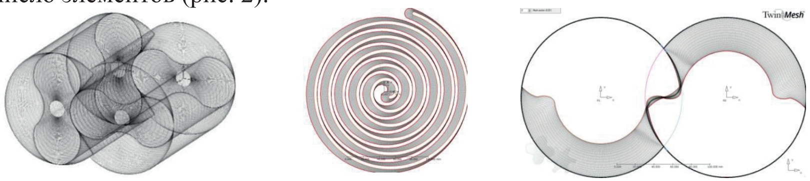
а б в

Рис. 1. CAD модель насосов: а – вакуумного винтового НВВ-630; б – двухроторного НВД-2100; в - двухроторного НВД-1000.

Двухроторные вакуумные насосы являются лидером в области создания «сухого» среднего вакуума, сочетая высокую производительность и энергоэффективность.

Особенностью первой линейки разработанных насосов НВД-1000 и НВД-2100 (рис. 1б и рис. 1в) является отсутствие перепускного клапана, который служит для предотвращения перегрузки привода насоса при работе на повышенных давлениях на входе, эту задачу решает частотно-управляемый привод на базе асинхронного электродвигателя, который автоматически снижает частоту вращения роторов при высоких входных давлениях.

Следует отметить, что при проектировании использовались математические модели разрабатываемых бесконтактных вакуумных насосов [5, 6], также методы вычислительной гидрогазодинамики, реализованные в комплекс CFD ANSYS-CFX [7] в совокупности с пакетом TwinMesh [8]. Сетка создается для ряда углов поворота роторов с постоянным шагом, при этом топология сетки остается неизменной. Затем для создания трехмерной сетки базовая сетка протягивается вдоль оси вращения с разделением на заданное число элементов (рис. 2).



а б в

Рис 2. Сеточная модель рабочей полости насосов: а – двухроторный типа Рутс, б – спиральный, в – винтовой

Кроме конструктивных и расчетно-проектировочных задач стояли не менее сложные технологические и метрологические задачи. Поэтому в последние годы АО «Вакууммаш» проводит серьёзную модернизацию станочного парка, инвестируя в новые, в том числе 5-осевые обрабатывающие центры рис. 3, рис. 4а; 4б и в еще более точные современные средства контроля геометрии изготавливаемых изделий рис. 4в.

Рис. 3. Механическая обработка роторов насоса НВВ-630 и НВД-2100, на обрабатывающем центре MAZAK Integrex i-300S

а б в

Рис. 4. а – обрабатывающий центр MAZAK Variaxis C-600; б - механическая обработка ротора турбомолекулярного вакуумного насоса НВТ-400; в - обмер роторов двухроторного вакуумного насоса НВД-2100 на контрольно-измерительной машине CONTURA G2.

На данный момент начат серийный выпуск всех перечисленных выше вновь разработанных насосов. Следующим шагом станет разработка дополняющих новый типоразмерный ряд насосов, таких как НВВ-450 с производительностью 450 м3/ч; разработка ряда ДВН с перепускным клапаном и ДВН с герметичным приводом и регулируемой частотой вращения роторов производительностью до 7000 м3/ч. Насосы данной линейки позволят удовлетворить любые потребности отечественной промышленности в безмасляном вакууме.

Список используемых источников

1. Бесконтактные вакуумные насосы: учебное пособие / А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев; Федер. Агенство по образованию. Казан. гос. технол ун-т. – Казань: КГТУ, 2010. – 104 с.

2. Капустин, Е.Н. Этапы разработки типоразмерного ряда отечественных безмасляных спиральных вакуумных насосов/ Е.Н. Капустин, А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев // Вакуумная техника и технология. –2015. – Т. 25, № 2. - С. 176-180.

3. Капустин, Е.Н. Создание высокотехнологичного производства безмасляных спиральных вакуумных насосов в России / Е.Н. Капустин, А.Е. Капустин, А.В. Бурмистров, С.И. Саликеев // Вестник Казанского технологического университета. – 2014, Т.17. - № 19 - С. 280 -283.
4. Mustafin, T.N. Analysis of the screw compressor rotors' non-uniform thermal field effect on transmission error / T.N. Mustafin, R.R. Yakupov, A.V. Burmistrov, M.S. Khamidullin, I.G. Khisameevv // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering. 2015. doi:10.1088/1757-899X/90/1/012004.
5. Саликеев, С.И. Единый подход к расчету откачных характеристик бесконтактных безмасляных вакуумных насосов / С.И. Саликеев, А.В. Бурмистров, А.А. Райков// Компрессорная техника и пневматика. - 2013, – № 4. - С.37-42.
6. Raykov, A. The working process of an oil-free claw vacuum pump : A mathematical model for analysis of the pumping characteristics / A. Raykov, S. Salikeev, A. Burmistrov, V. Alyayev, M. Fomina // Vakuum in Forschung und Praxis. - 2017. - Vol. 29. - Is. 2. – P. 45-49.
7. TwinMesh CFX Berlin license file for Kazan National Research Technological University c/n 13449
8. Ansys, Inc. license file for Kazan National Research Technology University c/n 657938

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ ИМПРЕГНАЦИИ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Гаврилов Алексей Викторович, Бурцев Сергей Анатольевич,
Гаврилова Татьяна Вячеславовна, Аляев Валерий Алексеевич

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
Россия, Республика Татарстан, 420015, г. Казань, ул. К. Маркса, 68

Аннотация: В работе предложено устройство для измерения скорости импрегнации капиллярно-пористых материалов. Метод апробирован на экспериментальной установке для пропитки различных материалов при давлениях ниже атмосферного. Описана методика проведения эксперимента. Приведены экспериментальные данные по измерению времени проникновения пропитывающей жидкости на заданную глубину.

Abstract: The paper proposes a device for measuring the rate of impregnation of capillary-porous materials. The method has been tested on an experimental installation for impregnation of various materials at pressures below atmospheric. The method of conducting the experiment is described. Experimental data on measuring the penetration times of the impregnating liquid to a given depth are presented.

Ключевые слова: импрегнация капиллярно-пористых материалов, скорость пропитки, глубина проникновения.

Во многих отраслях промышленности широко используется технология пропитки изделий из различных материалов жидкими и жидко–дисперсными средами. Главная трудность данной технологии заключается в недостаточной степени проникновения пропитывающей среды в мелкие поры и каналы. В конечном итоге это приводит к снижению качества изделий и повышению их себестоимости. Поры в пропитываемых заготовках всегда заполнены воздухом, который мешает проникновению пропитывающих составов в них. Вследствие этого, даже если процесс пропитки повторяется, обеспечить полное заполнение пор и необходимое качество изделий трудно [1].

В современной промышленности широко используются процессы вакуумной пропитки. Вакуумная пропитка – это процесс насыщения капиллярно-пористых материалов различными составами при воздействии вакуума и давления.

Измерение глубины проникновения пропитывающего состава является сложной задачей, особенно если её необходимо контролировать в ходе проведения технологического процесса (в реальном времени). Процесс значительно усложняется в случае вакуумной импрегнации.

Апробация устройства и методики его использования проводилась на экспериментальном стенде, собранном на кафедре «Вакуумной техники электрофизических установок» ФГБОУ ВО «КНИТУ [2,3].

Экспериментальный стенд (рис.1, 2) включает в себя: систему откачки на базе спирального вакуумного насоса ISP 250C; рабочую камеру; камеру с пропиточной жидкостью; ресивер; соединительную и запорную арматуру; краны для напуска жидкости; средства измерения давления и измерительный комплекс для определения скорости импрегнации.

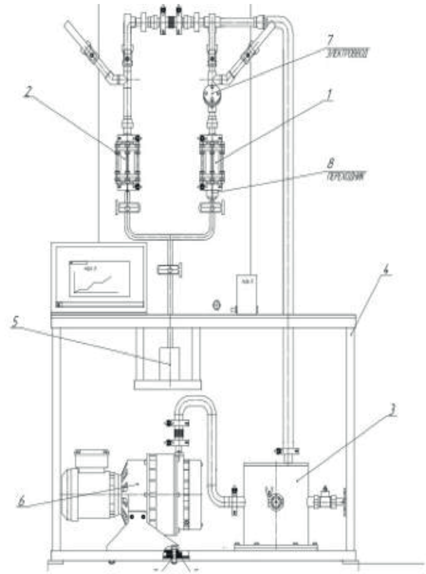


Рис. 1 – Экспериментальный стенд
1 – рабочая камера; 2 – камера для пропиточной жидкости; 3 – ресивер; 4 – рама; 5 – сосуд с пропиточной жидкостью; 6 – вакуумный насос; 7 – электроввод; 8 – вакуумный переходник

Рис. 2 – Внешний вид стенда

Рабочая камера 1, камера с пропиточной жидкостью 2 и ресивер 3 представляют собой цилиндрические камеры с быстросъемными фланцевыми соединениями стандарта KF для подключения средств откачки и измерения.

Подача и слив пропиточной жидкости в камеру 2 осуществляется при помощи системы заполнения, включающей сосуд 5, что минимизирует контакт жидкости с окружающей средой. Для вывода контактов с испытуемого образца из вакуумной камеры спроектирован электроввод. Также, разработан вакуумный переходник для возможности измерения скорости «сквозной» пропитки.

В качестве испытуемого образца использовался цилиндр из древесины диаметром 16 мм и длиной 70 мм, герметично изолированный по всей длине термоусадочной трубкой и открытый по торцам. По всей длине цилиндра через каждые 5 мм размещались заглубленные на 8 мм в образец контакты с выводами (рис.3, поз. 1), которые через вакуумный электроввод были подключены к запрограммированному модулю беспроводной связи NodeMCU DevKit v0.9. Модуль предназначался для передачи сигнала на компьютер по Wi-Fi при достижении пропиточной жидкостью определённой глубины (т.е. при замыкании контактов).

Время, за которое жидкость проникала на заданную глубину определяло скорость импрегнации.

Для апробации устройства были использованы три различных метода импрегнации:

1) Выдержка в пропитывающем растворе при атмосферном давлении;

2) «Традиционная» вакуумная пропитка (рис.3а): образец помещался в камеру 1, которая откачивалась до давления 10÷15 мм рт. ст. Затем пропиточная жидкость под действием разности давлений перетекала из камеры 2 в камеру 1, где образец выдерживался определенное время в жидкости под вакуумом. После этого жидкость перемещалась обратно в камеру 2, а в камеру 1 напускался сухой воздух до атмосферного давления;

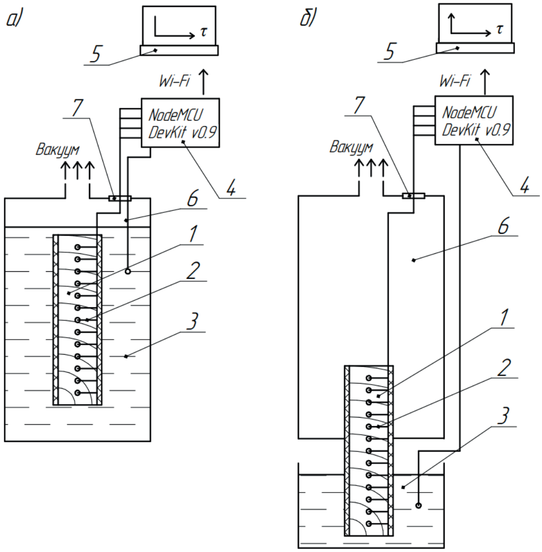


Рис. 3 – Схемы пропитки: а) «традиционная»; б) «сквозная»
1 – образец; 2 – контакты; 3 – пропиточная жидкость; 4 – модуль NodeMCU DevKit v0.9; 5 – компьютер; 6 – вакуумная камера; 7 – электроввод

3) «Сквозная» пропитка (рис.3б): один конец образца находился в сосуде с пропиточной жидкостью под атмосферным давлением, а другой - в камере 1, которая откачивалась до давления 10÷15 мм рт. ст. За счет перепада давлений жидкость проникала в поры образца, последовательно замыкая контакты.

Результаты проведенных экспериментов представлены на рис.4

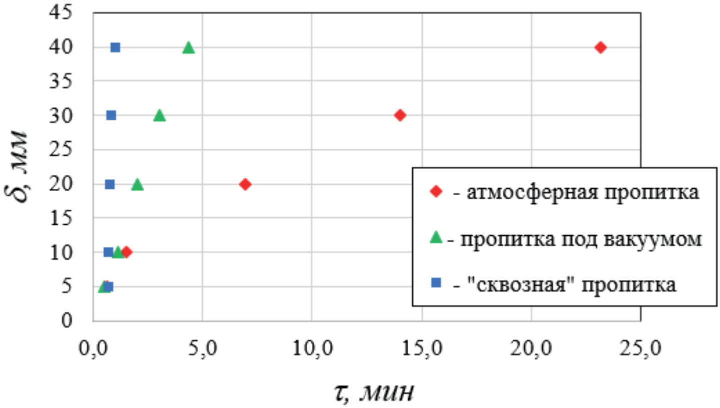


Рис. 4 – Зависимость скорости пропитки при различных методах импрегнации

Приведенные на рис. 4 экспериментальные данные измерения скорости импрегнации для различных методов пропитки показало работоспособность разработанного устройства и методики проведения измерений.

Список использованных источников

1. Гаврилов А.В. Исследование процесса вакуумно-импульсной пропитки пиломатериалов / Вестник Казанского государственного технологического университета. – 2011. - №8. – С. 65-67.

2. Игнатьев Н.В., Аляев В.А., Гаврилов А.В. Установка для импрегнации капиллярно-пористых материалов органическими соединениями при давлениях ниже атмосферного / В книге: Интенсификация тепло-массообменных процессов в химической технологии. Тезисы докладов Седьмой Российской научно-технической студенческая конференции, приуроченной к юбилейной дате 100-летию со дня рождения А.Г. Усманова. - 2020. - С. 82-84.

3. Фазуллин А.Р., Игнатьев Н.В., Гаврилов А.В., Максудов Р.Н., Аляев В.А. Исследование процесса вакуумной импрегнации капиллярно-пористых материалов / В сборнике: Вакуумная техника и технология. Десятая Российская студенческая научно-техническая конференция: материалы конференции. Казань, - 2021. С. - 163-164.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ МЕХАНИЗМА ДВИЖЕНИЯ ОППОЗИТНОГО КОМПРЕССОРА

Гаязов И.М.[1], Шарафеев Р.Ф.[2], Егоров А.Г.[2], Сагбиев И.Р.[3]

[1] Инженерно-технический центр ООО «Газпром трансгаз Казань»
[2] Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технологический университет»
[3] Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет»,

Аннотация. Предложена методика динамического расчета поршневого оппозитного компрессора с помощью препроцессора Inspire пакета программа HypewWorks компании Altair Engineering. Проведено сопоставление результатов численного моделирования с традиционным аналитическим расчетом.

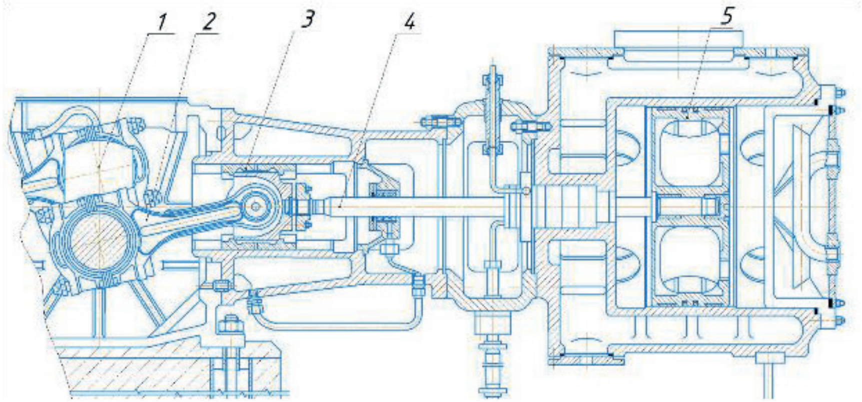
Abstract. The article proposes a method for dynamic calculation of opposed compressor using the CAE Inspire HyperWorks developed by Altair Engineering Inc. The results of numerical modeling were compared with the traditional analytical method.

Ключевые слова: оппозитный поршневой компрессор, численное моделирование, HyperWorks.

В качестве объекта исследования выбран двухрядный оппозитный поршневой компрессор базы М100, представленный на рисунке 1, со следующими характеристиками:

1) Технические характеристики:
- давление всасывания – 0,11 МПа;
- давление нагнетания – 1 МПа;
- частота вращения – 10 Гц;
- производительность – 0,5 м^3/с;

2) Геометрические характеристики:
- диаметр поршня 1-й ступени – 630 мм;
- диаметр поршня 2-й ступени –370 мм;
- диаметр штока – 60 мм;
- ход поршня – 220 мм;
- число рядов – 2.



1 – коленчатый вал, 2 – шатун, 3 – крейцкопф, 4 – шток, 5 – поршень
Рисунок 1 – Первая ступень оппозитного компрессора

Механизм движения состоит из поршней первой и второй ступеней, двух штоков, двух крейцкопфов, двух шатунов и коленчатого вала. С целью определения действующих сил на механизм движения создана его полная трехмерная модель.

Необходимые исходные данные для выполнения расчета взяты из термогазодинамического расчета: количество рядов, ход поршня, частота вращения коленчатого вала, механический КПД, число ступеней в ряду, угол опережения ряда, давление всасывания и нагнетания ступеней с учетом потерь, площади поршней в ступенях, относительное мертвое пространство для ступени, показатели политропы расширения и сжатия. По сборочному чертежу определено отношение радиуса кривошипа к длине шатуна. Массы определены на основании геометрии и известной плотности материалов.

Многотельная конструкция построена в CAD программе КОМПАС-3D и импортирована в препроцессор Inspire компании Altair Engineering [1]. Эта субплатформа входит в пакет программ HyperWorks, который позволяет проводить инженерных анализ, в том числе сборочных изделий [2], а также оптимизацию геометрии с учетом различных нагрузок [3].

Программа Inspire позволяет задавать различные силы с учетом их изменения величины во времени, например, газовые силы, действующие на поршни. Значение газовой силы определено в соответствии с индикаторной диаграммой исследуемого режима работы поршневого компрессора. Задание граничного условия произведено стандартным инструментом «линейного привода» в табличной форме в течение времени одного полного оборота (рисунок 2, 3).

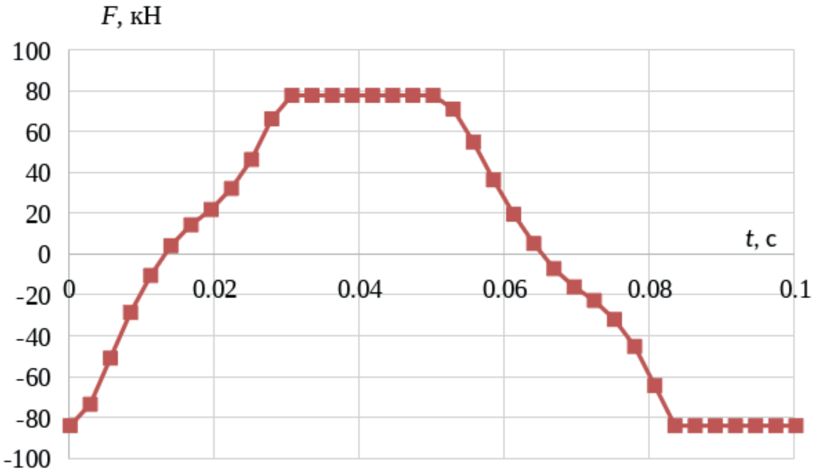


Рисунок 2 – Газовые силы, действующие на поршень

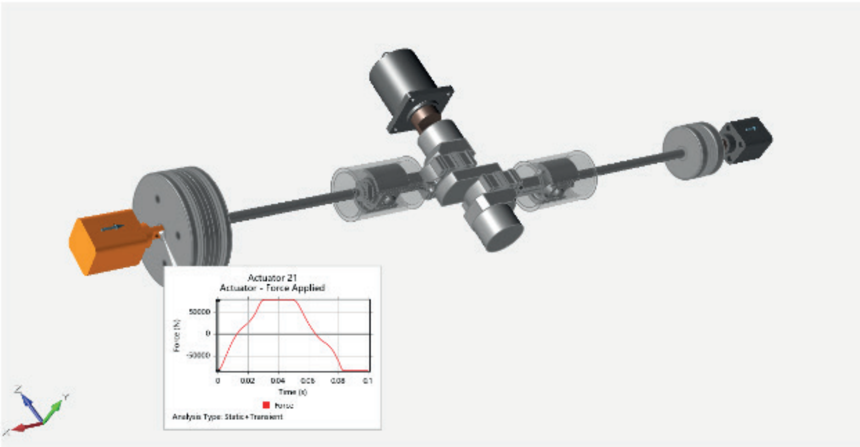
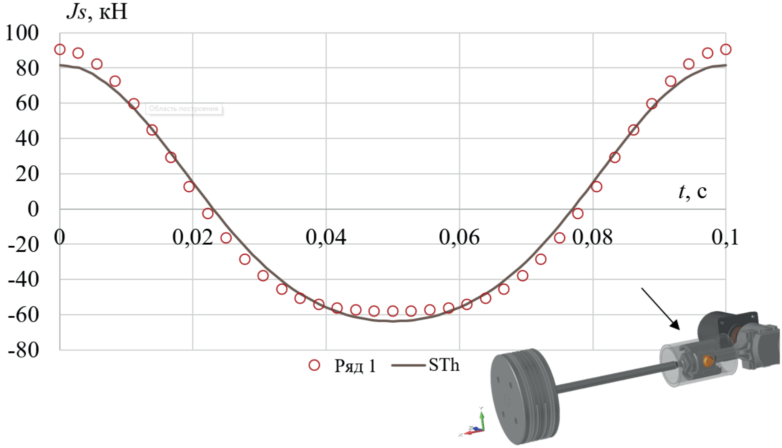


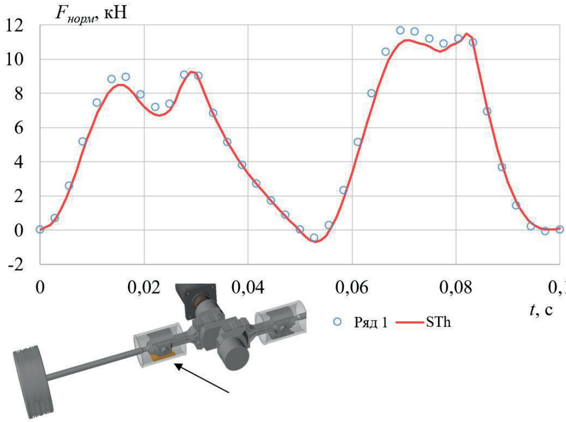
Рисунок 3 – Способ задания газовых сил за счет поступательного привода

Inspire дает возможность рассчитать возникающие силы в любой кинематической паре. На рисунке 4 демонстрируется сравнение значений сил инерций возвратно-поступательно движущихся масс, приведенные к оси крейцкопфного пальца, полученные расчетным путем по известным формулам [4] с результатами численного моделирования в Inspire.



«Ряд 1» – аналитическим метод, «STh» – численное моделирование
Рисунок 4 – Изменение сил инерций первого ряда

На рисунке 5 показано сравнение нормальной силы, действующие на боковую поверхность направляющей крейцкопфа.



«Ряд 1» – аналитическим метод, «STh» – численное моделирование
Рисунок 5 – Изменение нормальной силы первого ряда

Выводы:

1. Сравнение возникающих сил в парах трения, полученных расчетным путем по известным формулам, с результатами численного моделирования в программе Inspire показывает расхождение не более 10% в крайних положениях

поршня. Это связано с тем, что массы подвижных частей в аналитическом методе задаются с некоторыми общепринятыми допущениями.

2. Предложена методика трехмерного моделирования динамики поршневого компрессора, позволяющая уточнить традиционный аналитический подход.

3. Разработанная верифицированная модель трехмерного численного моделирования позволяет в последующем провести расчет на прочность,

а также топологическую оптимизацию деталей механизма движения с учетом динамических нагрузок.

Литература

1. Altair Inspire. URL : https://www.altair.com/inspire .

2. Влияние деталей роторной части сухого газодинамического уплотнения на деформацию вращающегося кольца / Т.А. Аит, Ф.В. Кадыров, Р.Ф. Шарафеев, И.Р. Сагбиев // Экспериментальные и теоретические исследования в современной науке: проблемы, пути решения : Материалы XVI Всероссийской научно-практической конференции: в 3-х частях, Ростов-на-Дону, 26 ноября 2018 года. Том Часть 2. – Ростов-на-Дону: Южный университет (ИУБиП), 2018. – С. 154-159.

3. Оптимизация конструкции мембранного диска муфты газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-16 в пакете программ HyperWorks / Р.Ф. Шарафеев, И.Р. Сагбиев // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы - 2019 : материалы X Международной научно-технической конференции, Казань, 05–06 декабря 2019 года. Том Часть 1. – Казань: Без издательства, 2019. – С. 475-477.

4. Пластинин П.И. Поршневые компрессоры. Том 1. Теория и расчет / П.И. Пластинин // Учебники и учеб. пособия для студентов. высш. учеб. заведений – 3-е изд., доп. – Москва: КолосС, 2006. – 456 с.

СЕПАРАЦИЯ ПИРОЛИЗНЫХ ГАЗОВ ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Загиров А.Н., магистрант второго курса ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань

Аннотация. Рассмотрен способ сепарации пиролизных газов, который осуществляется путем разделения газов на дистиллят и неконденсируемые газы. Следующим этапом является сжигание неконденсируемого газа в топке аппарата пиролиза шахтного типа, где из него образуется топочный газ, который двигаясь по рубашке передает часть своего тепла на процесс пиролиза. Пройдя аппарат пиролиза топочный газ поступает в сушильную камеру и участвует в процессе сушки древесины. Затем отработанный топочный газ после очистки жидкостью выбрасывается в атмосферу.

Abstract. A method for separating pyrolysis gases is considered, which is carried out by separating gases into distillate and non-condensable gases. The next stage is the combustion of non-condensable gas in the furnace of a shaft-type pyrolysis apparatus, where it forms flue gas, which, moving along the jacket, transfers part of its heat to the pyrolysis process. After passing through the pyrolysis apparatus, the flue gas enters the drying chamber and participates in the wood drying process. The waste flue gas is then discharged into the atmosphere after cleaning with a liquid.

Ключевые слова: Сепарация пиролизных газов, пиролизный газ, топочный газ

Keywords: Separation of pyrolysis gases, pyrolysis gas, flue gas

На сегодняшний день в мире существует немало направлений в развитии энергетики, среди которых широко применяется направление получения топлива из возобновляемых ресурсов, одним из которых является биотопливо. Способ получения данного топлива заключается в сепарировании пиролизных газов получаемых при пиролизе. При сепарировании пиролизных газов получают дистиллят и неконденсируемые газы. Переработкой дистиллята получают жидкое биотопливо. Неконденсируемые газы сжигают и используют как источник тепловой энергии для установок пиролиза или других устройств, где требуется тепловая энергия. Поэтому получение топлива из возобновляемых ресурсов методом сепарации пиролизных газов является актуальной темой исследования [1, 2].

Процесс начинается с измельчения древесных отходов, которые сушат в сушильном аппарате 2. Высушенные отходы подаются в пиролизную камеру 3, где под воздействием высокой температуры происходит термическое разложение древесины на уголь и пиролизный газ, который поступает в конденсатор-сепаратор 4.

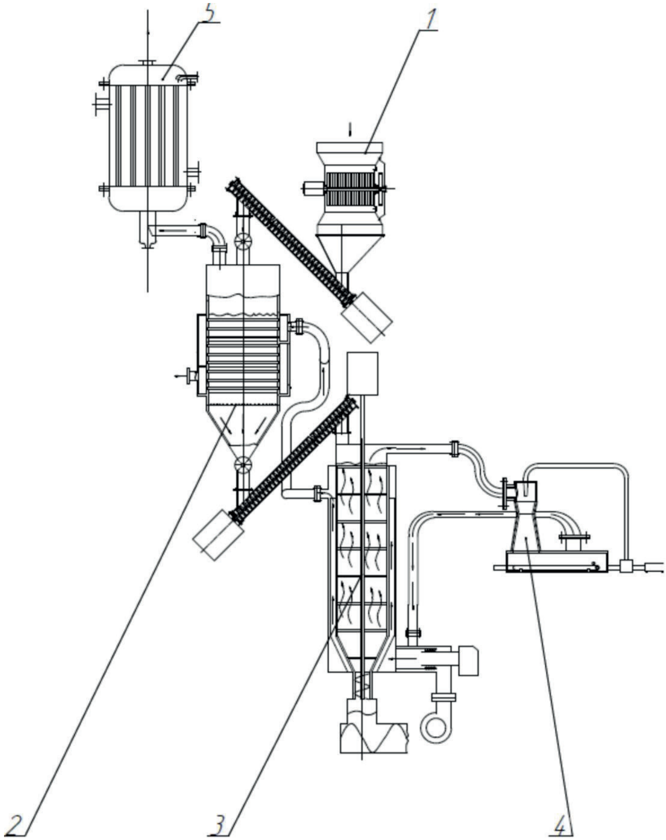


Рис. 1. Схема установки пиролиза: 1- измельчитель; 2 – сушильный аппарат; 3 – пиролизный аппарат; 4- конденсатор-сепаратор; 5 -абсорбер;

Сепарация пиролизных газов происходит в конденсатор – сепараторе 4, который работает следующим образом: (см. рис 2) через патрубок 1 пиролизный газ поступает в эжектор 9 где, газ конденсируется в жижку при помощи охлаждающей жидкости нагнетаемой с помощью насоса 8. Конденсат стекает в приемную ванну 6. В приемной ванне располагается змеевик 10, по которому циркулирует вода для охлаждения жижки. Вода подается через патрубок 4 и отводится из патрубка 5. Избыток жижки переливается через патрубок 7 в резервуар, в котором собирается жижка. В конструкции аппарата присутствует патрубок 3, который служит для отвода несконденсированных газов в топку пиролизного аппарата.

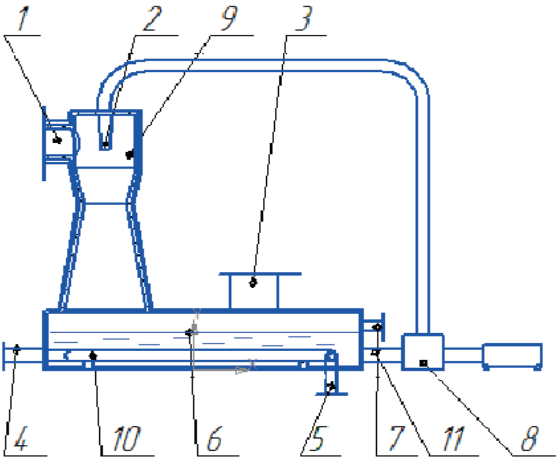


Рисунок 2.1. Схема конденсатор-сепаратор для разделения жидких и газообразных продуктов пиролиза: 1-патрубок для подачи пиролизных газов; 2 – патрубок для подачи охлаждающей жидкости; 3 - патрубок для отвода пиролизных газов; 4, 5 - патрубки для подачи и отвода охлаждающей жидкости; 6 - приемная ванна для сбора жидкости; 7- патрубок для отвода жидкости; 8 - насос; 9 - эжектор; 10 – змеевик; 11 -патрубок для подачи жидкости в эжектор.

Отведенные через патрубок 3 неконденсируемые газы, образующиеся во время конденсации пиролизного газа, поступают в топку пиролизного аппарата, где сжигаются и образуется топочный газ, который поступает в нижнею часть рубашки пиролизного аппарата. Во время движения по рубашке топочный газ отдает часть своего тепла на процесс пиролиза древесных отходов. Выход отработанных топочных газов из зоны пиролиза осуществляется через патрубок отвода топочных газов, откуда направляется в сушильный аппарат, где уже участвует в процессе сушки древесины. После сушки топочный газ отправляется на очистку в абсорбер 5.

Для очистки топочных газов применяется абсорбер – где газ промывается водой, либо другим рабочим раствором. Такой метод очистки иногда называют методом мокрой очистки. Метод мокрой очистки газов является механическим и применяется на заключительном этапе очистки. При использовании этого метода возможно удаление всех примесей из газа за счет сорбции на них токсичных компонентов. После абсорбера очищенный газ выбрасывается в атмосферу [3, 4].

Литература

1) Забелкин, С.А. Переработка древесины в жидкое топливо и его энергетическое использование [Текст]: дис...тех. наук / С.А. Забелкин; Казан. нац. исслед. технол. ун-т. –Казань. –2011. –С. 232.

2) Сафин, Р.Г. Разработка технологии получения моторного топлива из отходов деревообработки [Текст]/ Р.Г. Сафин, Н.Ф. Тимербаев, З.Г. Саттарова, Т.Х. Галеев // Вестник Казанского технологического университета. - 2012. – Т. 15. No11. - С. 205-207.

3)Технология очистки газов : учебное пособие / А. А. Мухетдинов, О. А. Сольяшинова ; Федеральное агентство по образованию, Гос. образовательное учреждение высш. проф. образования "Казанский гос. технологический ун-т". - Казань : КГТУ, 2007. - 235 с. : ил., табл.; 21 см.;

4) Козлова С.А. и др. Оборудование для очистки газов промышленных печей // Красноярск: СФУ, 2007. - 156с.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПО СЕПАРАЦИИ ПИРОЛИЗНОГО ТОПЛИВА

Загиров А.Н., магистрант второго курса ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань

Аннотация. Рассмотрено исследование пиролизного топлива. Исследование проводилось в два этапа. Первый этап исследования заключался в проведении процесса пиролиза органических отходов (древесной щепы). В результате первого этапа исследования была получена пиролизная жидкость, которая использовалась во втором этапе, суть которого заключалась в сепарации пиролизных газов методом дистилляции.

Abstract. The study of pyrolysis fuel is considered. The study was carried out in two stages. The first stage of the study consisted in carrying out the process of pyrolysis of organic waste (wood chips). As a result of the first stage of the study, a pyrolysis liquid was obtained, which was used in the second stage, the essence of which was the separation of pyrolysis gases by distillation.

Ключевые слова: Пиролизное топливо, пиролизный газ, пиролизная жидкость

Keywords: pyrolysis fuel, pyrolysis gas, pyrolysis liquid

На данный момент очень актуальна тема применения биотоплива как альтернатива топливу из не возобновляемых ресурсов. Поэтому проводится много исследований и экспериментов по получению биотоплива. В настоящее время биотопливо получают из различного сырья растительного происхождения, среди которых есть отходы лесопромышленного комплекса.

На основании этого было проведено исследование по получению пиролизного топлива из органических отходов (щепа сосны) методом сепарации пиролизных газов. Исследование проводилось в два этапа.

Первый этап заключался в получении пиролизной жидкости методом пиролиза цепы сосны. Проведение второго этапа включало в себя проведения эксперимента по разделению пиролизной жидкости на различные фракции методом сепарации пиролизных газов.

Первый этап исследования проводился следующим образом (рис. 1): в пиролизную камеру 1, расположенную в муфельной печи 2, загрузили древесные отходы. В пиролизной камере, под воздействием температуры 500 ⁰С происходил распад древесных отходов на древесный уголь и пиролизный газ, который затем поступал в конденсатор 8, через обогреваемую трубку 4 и смолоуловитель 6. В смолоуловителе расположена железная губка, которая улавливает частицы смолу уходящие вместе с пиролизными газами.

В конденсаторе 8 под воздействием охлаждающего агента (воды) пиролизные газы сепарировались в пиролизную жидкость, которая стекала в мерную колбу 10. Несконденсированные газы отводились в сборник газов 11, где замерялся их объем и скорость выделения.

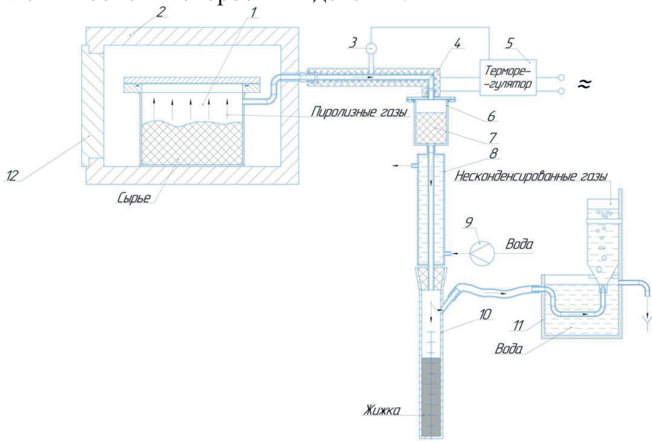


***Рис. 1** Схема экспериментальной установки: 1-пиролизная камера; 2-муфельная печь; 3 - термопара; 4 - обогреваемая трубка; 5 – терморегулятор; 6 – смолоуловитель; 7 - железная губка; 8 – конденсатор; 9 - расходомер; 10 - мерная колба; 11 – сборник газов с гидрозатвором; 12 – крышка муфельной печи*

Полученная в ходе первого этапа пиролизная жидкость применялась во время проведения второго этапа исследования. Суть второго этапа исследования по сепарации пиролизных газов заключается в том, что пиролизную жидкость, полученную во время пиролиза, подвергают нагреву и последующей дистилляции. Данные исследования проводились на лабораторной установке, изображенной на рисунке 2.

Проведение исследования начинается с того, что в емкость 2 заливают пиролизную жидкость, полученную после пиролиза. Закрывают установку фланцем, к которому присоединен термометр 4 для определения температуры и приварен канал отвода газов 3. Емкость устанавливают на нагревательную плиту 1, где происходит, нагрев пиролизной жидкости до точки кипения с выделение из неё газовых компонентов, которые отводятся через канал отвода газов 3. К каналу отвода газов 3 соединяют водяной конденсатор 5. В конденсаторе 5 происходит частичная конденсация пиролизных газов посредством хладагента (воды). Сконденсировавшаяся жидкость отводится в мерную колбу 6, где скапливается. Неконденсирующиеся газы (воздух), отводятся в мерную колбу 6 откуда газы направляются в атмосферу.

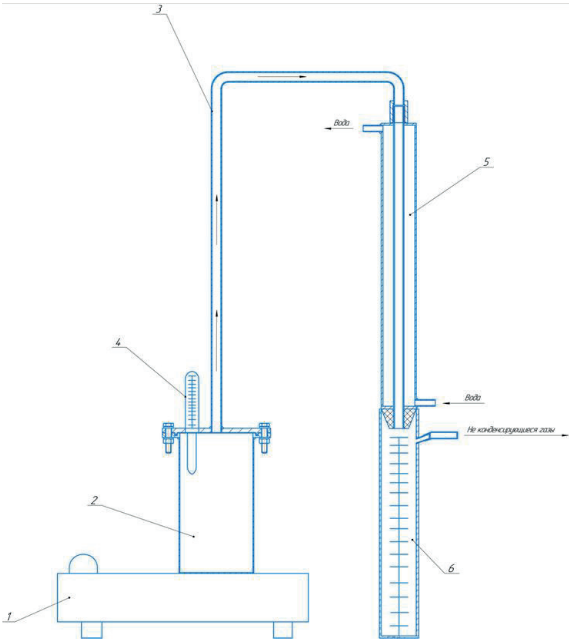


Рис. 2 *Схема экспериментальной установке по сепарации: 1- нагревательная плита; 2 – емкость; 3 – канал отвода газов; 4 – термометр; 5- конденсатор; 6- мерная колба*

Во время проведения второго этапа исследования фиксировали температуру кипения жидкости и объем дистиллята. Благодаря этому можем разделить пиролизную жидкость на фракции и своевременно меняя колбу 6 на новую. Второй этап исследования заканчивается, при перегонке 90% пиролизной жидкости. При проведении второго этапа исследования были зафиксированы следующие значения: время, температура и объём жидкости в мерной колбе, которые записывали в таблицу 1.

Таблица 1.

Данные эксперимента

Время перегонки, t_c, с	Температура кипения, T_k, ^0C	Объём жидкости, $V_ж$, мл.	Масса жидкости, m, гр.	Примечания
0	90,0	0		Негорючая фракция
1140	99,6	5		
1500	100,0	5	5,65	
1740	100,0	0		Горючая фракция
1800	100,0	10		
2520	100,0	30		
3180	101,0	40	41,90	
3300	101,0	0		Кислоты
3660	120,0	5	7,21	
			20,25	Смолистый остаток

На основании таблицы 1 строится кинетическая зависимость объемного выхода фракций из пиролизной жидкости по времени (см. рис. 3).

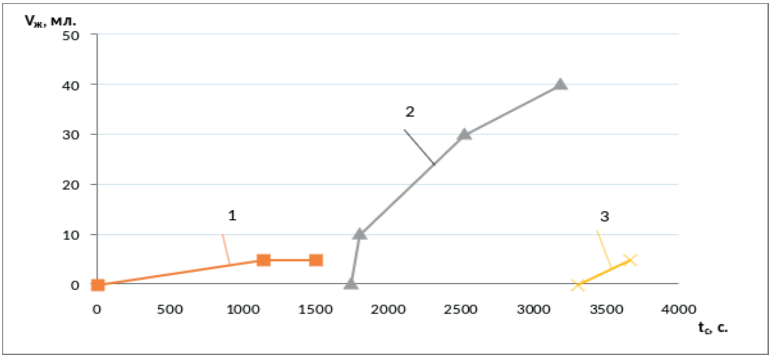


Рис. 3. *Кинетическая зависимость объёмного выхода фракций из пиролизной жидкости: 1 – 1 фракция (негорючая фракция); 2 – 2 фракция (горючая фракция); 3 – 3 фракция (кислоты)*

На рис. 3 изображен график зависимости объема сконденсировавшейся жидкости по времени дистилляции, на основании которого можно сделать вывод, что были получены 3 разные фракции. Используя для анализа таблицу 1 и график на рис. 3 можно сделать вывод, что фракции различаются по температуре кипения. Большее всего было получено жидкости горючей фракции при температуре кипения 100 ⁰С.

Литература

1. Загиров А.Н. «Наукоемкие исследования как основа инновационного развития общества» ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПИРОГЕНЕТИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ. с. 33-36
2. Загиров А.Н. «Эколого-ресурсосберегающие технологии в науке и технике» СЕПАРАЦИЯ ПИРОЛИЗНЫХ ГАЗОВ. с. 78-81
3. Загиров А.Н. «Фундаментальные и прикладные научные исследования: Актуальные вопросы, достижения и инновации» ПОЛУЧЕНИЕ ЖИДКИХ ЭНЕРГОНОСИТЕЛЕЙ ИЗ ДРЕВЕСНОГО СЫРЬЯ. с. 34-35
4. Сафин Р.Г., Родионов А.С., Загиров А.Н., Хайруллин И.Ф. методическое указание «Термохимическая переработка древесных отходов в активированный уголь и пиролизную жидкость» - Казань: Изд-во КНИТУ, 2020. – 35с.

МОДЕРНИЗАЦИЯ УСТАНОВОК НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СЕПАРАЦИИ ПРИРОДНОГО (ПОПУТНОГО НЕФТЯНОГО) ГАЗА

Зялалов Айназ Аликович, Новиков Андрей Евгеньевич,
Валеев Сергей Ильдусович

Казанский национальный исследовательский технологический
университет (ФГБОУ ВО КНИТУ), г. Казань
vsi73@mail.ru

Аннотация: в статье рассмотрены вопросы совершенствования и модернизации установок низкотемпературной сепарации газа и сепарационного оборудования, используемого в процессе низкотемпературной сепарации. Приведен обзор общего изменения конструктивных схем установок низкотемпературной сепарации газа с оценкой их преимуществ и недостатков. Показаны основные направления модернизации сепарационного оборудования блока вводных и низкотемпературных сепараторов.

Abstract: the article discusses the issues of improvement and modernization of low-temperature gas separation plants and separation equipment used in the process of low-temperature separation. An overview of the general changes in the design schemes of low-temperature gas separation plants with an assessment of their advantages and disadvantages is given. The main directions of modernization of the separation equipment of the block of introductory and low-temperature separators are shown.

Ключевые слова: сепаратор, низкотемпературная сепарация, подготовка газа.

При промысловой подготовке газа на газовых и газоконденсатных месторождениях в условиях постоянно снижающегося давления проблема обеспечения требуемых кондиций газа и максимального извлечения из него углеводородов C_2 – C_{5+}, являющихся ценным сырьем газохимии, приобретает особую актуальность.

Переработка природного и попутного нефтяного газов осуществляется с применением низкотемпературных процессов. В настоящее время, основным процессом на установках комплексной подготовки газа (УКПГ) является процесс низкотемпературной сепарации (НТС), который хорошо изучен, наиболее технологически простой среди всех низкотемпературных процессов, поэтому его использование наиболее экономически обосновано [1, 2].

Температуру потока газа в процессе низкотемпературной сепарации можно понизить за счет: изоэнтропийного расширения газа, изоэнтальпийного расширения газа или изобарного охлаждения газа. Изоэнтальпийное расширение газа в процессе низкотемпературной сепарации осуществляется с использованием эффекта Джоуля-Томсона (использование дроссельных устройств). Изоэнтропийное расширение газа осуществляется с применением турбодетандеров. В случае использования изобарного охлаждения газа принято говорить о процессе низкотемпературной конденсации.

Изоэнтальпийное расширение газа в установках НТС с дросселем является технически наиболее простым способом и первым получило массовое промышленное использование в мире в середине XX столетия. Например, в СССР НТС с дросселем начали использоваться с 1960-х годов на Оренбургском месторождении, месторождениях Средней Азии и др. [3]. Принципиальная схема установки низкотемпературной сепарации с дросселем показана на рис. 1.

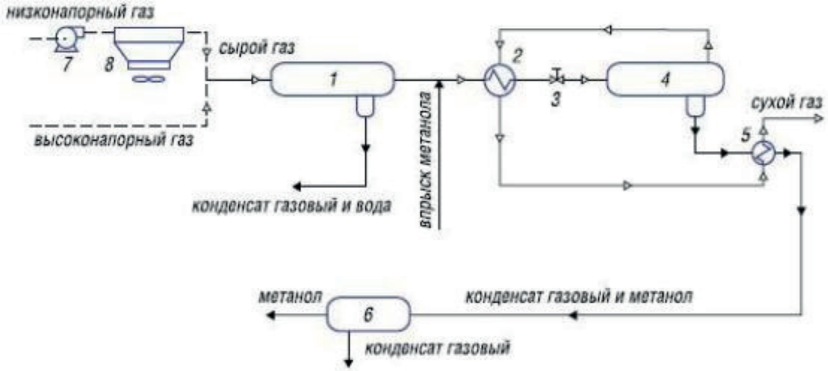


Рисунок 1 – Схема установки низкотемпературной сепарации газа с дросселем: 1, 4 – сепараторы; 2, 5 – теплообменник; 3 – дроссель; 6 – разделитель; 7 – компрессор; 8 – АВО.

Основное преимущество установок НТС с дросселем их простота и дешевизна, обусловленная низкими как капитальными, так и эксплуатационными затратами. Также достоинством является легкость регулирования технологического процесса.

Главной особенностью и недостатком установок НТС с дросселем является необходимость высокого давления на линии высоконапорного газа на входе в установку, иначе процесс дросселирования газа не обеспечивает достижения необходимых температур, достаточных для конденсации тяжелых компонентов газа. Для продления срока эффективной эксплуатации установки НТС в период снижения давления газа на устьях скважин используют внешние источники холода, а также дожимные компрессорные станции, модернизацию сепарационного оборудования.

Другим устройством, используемым в технологических схемах НТС, является эжектор. Отличие эжекторного устройства от дроссельного заключается в возможности вовлечения (эжекции) низконапорных газов концевой дегазации конденсата в основной поток.

Эжекторное устройство характеризуется простотой конструкции, малыми габаритами и надежностью эксплуатации. Рабочий перепад давления, эжекторных установок сопоставим с аналогичными параметрами дроссельной технологии. Достижение более низких температур технологически затруднено вследствие увеличения количества низконапорных газов дегазации конденсата.

Схема установки НТС с турбодетандерным агрегатом (ТДА) показана на рис. 2.

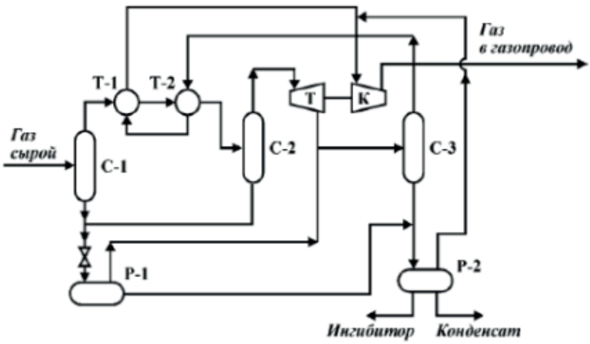


Рис. 2 – Схема установки НТС с турбодетандером: С-1, С-2, С-3 – сепараторы; Т-1, Т-2 – теплообменники; Т – турбодетандер; К – компрессор; Р-1, Р-2 – разделители жидкости.

Подключение ТДА на УКПГ возможно по двум схемам: «компрессор–детандер» («К–Д») или «детандер–компрессор» («Д–К») (как на рис. 2), что оказывает существенное влияние на технологические параметры работы установки. Подключение «К–Д» обеспечивает постоянную температуру НТС около –35 °С круглогодично. Работа технологической схемы при подключении ТДА по схеме «Д–К» позволяет более полно использовать холод окружающей среды, поэтому в зимний период достигается более глубокое охлаждение, а летом достигаемая температура составляет всего около –25 °С.

По сравнению со схемами НТС с дроссельными и эжекционными устройствами технология НТС с ТДА обладает следующими преимуществами:

- существенного снижения требуемого перепада давления для достижения необходимой температуры газа;
- достижения значительно более низких температур газа при том же перепаде давления.

В то же время ТДА обладает рядом недостатков:

- переменный режим работы по расходным и термобарическим параметрам;
- компрессор ТДА вносит теплоту в систему подготовки газа, что снижает эффект охлаждения газа в турбодетандере;
- эксплуатация ТДА требует наличия специально подготовленного персонала высокой квалификации.

В РФ происходит активное внедрение ТДА на промысловых УКПГ. Только в 2012-2015 гг. введены в эксплуатацию 37 агрегатов [3]. При этом сложности, связанные с эксплуатацией ТДА, и необходимость в больших капитальных затратах на их внедрение стимулирует активные работы по модернизации существующего сепарационного оборудования [4-8].

Литературный анализ показал, что на завершающем этапе разработки «метановых» сеноманских месторождений основное увеличение нагрузки падает на входные сепараторы установок подготовки газа, и, прежде всего, требуется их модернизация. При эксплуатации газоконденсатных месторождений при увеличении обводненности продукта и/или росте производительности требуется модернизация всего сепарационного оборудования вводных и низкотемпературных сепараторов, разделителей жидкости, другого основного оборудования УКПГ, часто связанная с изменением технологической схемы подготовки.

Основным путем модернизации сепарационного оборудования является замена сетчатых и др. отбойных элементов на высокоскоростные центробежные сепараторы, при использовании центробежных сепарационных элементов «старых» конструкций – их замена на новые современные, которые обеспечивает повышенную производительность, а при необходимости дальнейшего увеличения разделительной способности сепараторов предлагается использование после центробежных устройств новых высокоэффективных регулярных насадок.

Список литературы

1. Бекиров Т.М. Технология обработка газа и конденсата / Т.М. Бекиров, Г. А. Ланчаков. – М.: Недра, 1999. – 596 с.

2. Лапидус А.Л, Голубева И.А., Жагфаров Ф. Г., Газохимия. Первичная переработка газов. – М.: Нефть и газ, 2004 - 243 с.

3. Прокопов А.В. Современное состояние технологий промысловой подготовки газа газоконденсатных месторождений / А.В. Прокопов и др. // Вести газовой науки. – 2015, №3. – С.100-108.

4. Стуликов Д.А. Совершенствование технологического сепарационного оборудования подготовки газа // Академический журнал Западной Сибири. – 2016. – №2. – С. 26-28.

5. Корякин А.Ю. Опыт модернизации технологического оборудования подготовки газа залежей ачимовской толщи Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения / А.Ю. Корякин, В.Ф. Кобычев, В.В. Александров, И.М. Шигапов, А.И. Кагарманов // Газовая промышленность. – 2019. – Спецвыпуск №1. – С. 64-70.

6. Клюйко В.В. Совершенствование сепарационного оборудования за счет применения новых контактных устройств / В.В. Клюйко, В.З. Минликаев, Г.К. Зиберт, А.Г. Зиберт // Газовая промышленность. – 2016. – №7-8. – С. 56-60.

7. Игнатов И.В. Совершенствование технологического оборудования и схем подготовки продукции ачимовских залежей Уренгойского нефтегазоконденсатного месторождения / И.В. Игнатов, В.Ф. Кобычев, Д.Ю. Корякин, У.Р. Хажиахметов, Е.С. Григорьев, А.Т. Хусаенов, В.О. Юрасов // Газовая промышленность. – 2020. – №7. – С. 80-85.

АНАЛИЗ ПОТЕРЬ В ПРОЦЕССЕ ВСАСЫВАНИЯ ВАКУУМНОГО НАСОСА ВНЕШНЕГО СЖАТИЯ

А.А. Исаев[1,2,*], А.А. Райков[1], А.В. Бурмистров[1], С.И. Саликеев[1]

[1]Казанский национальный исследовательский технологический университет
[2]АО «Вакууммаш»
*e-mail: isaevaa050391@yandex.ru

Проведено математическое моделирование рабочего процесса безмасляного двухроторного вакуумного насоса типа Рутс при различных условиях теплообмена. Анализ полученных зависимостей температур и давлений показывает неравномерность распределение параметров газа по рабочему объему и влияние на них условий теплообмена. Получена хорошая сходимость величин коэффициента заполнения с экспериментом и результатом вычислений по эмпирической формуле.

Ключевые слова: насос вакуумный двухроторный, входной тракт, течение газа, коэффициент заполнения, потери на всасывании

Сфера применения насосов вакуумных двухроторных с внешним сжатием типа Рутс (НВД) непрерывно расширяется, причем четко обозначилась тенденция использования данных машин при повышенных давлениях и теперь давление на выходе НВД может быть и более 10 кПа, а в многоступенчатых агрегатах ступени Рутса могут работать на атмосферу [1].

При моделировании процесса откачки очень важно не просто определить общие потери в насосе, но и разложить их по составляющим. Одной из таких составляющих в НВД являются потери на всасывании. Как указывается в работе [2] эти потери в свою очередь делятся на гидравлические потери при всасывании, связанные с сопротивлением течению газа со стороны входных устройств и потери за счет подогрева газа на всасывании.

В работах [3, 4] для определения действительной быстроты действия используется коэффициент заполнения отсеченного объема, который учитывает газодинамические потери, возникающие при образовании отсеченных объемов, и может трактоваться как уменьшение плотности газа в отсеченном объеме НВД, по сравнению с плотностью газа на нижнем срезе входного патрубка.

На основании обобщения экспериментальных значений быстроты действия, полученных в условиях отсутствия обратных перетеканий (при равенстве давлений выхода и входа) в работах [3, 4] предложено уравнение для расчета коэффициента заполнения

$$k_V = \exp\left[-\frac{\alpha n}{\sqrt{kR_Г T}}(1+\frac{1}{\beta P_{ВХ}+\gamma}\right], \qquad (1)$$

где α= 0,012; β=0,11; γ=0,125 - эмпирические коэффициенты, являющиеся функцией от геометрических параметров входного тракта и самого НВД других размеров, $P_{ВХ}$ – давление на входе в НВД, T – температура газа, $R_Г$ –газовая постоянная.

Возможность использования данного уравнения для НВД других типоразмеров с профилем роторов, отличным от исследованного, не оценивалась.

При этом для определения коэффициента заполнения требуется проведение большого числа экспериментов, поэтому в данной работе этот коэффициент находится расчетным путем. Для этого использовались методы вычислительной гидрогазодинамики (CFD), а именно хорошо зарекомендовавший себя для моделирования рабочих процессов винтовых, спиральных и двухроторных насосов типа Рутс пакет ANSYS-CFX [5] с построением структурированных динамических сеток в пакете TwinMesh [6].

В результате моделирования определяется распределение давлений и температур в расчетной области при различных углах поворота ротора. На рис. 1 представлено распределение температур в рабочей полости при угле поворота роторов 80 градусов, что соответствует углу отсечения рабочей полости правого ротора. Как видно на рисунке, распределение параметров газа по рабочей полости крайне неравномерно.

На первом этапе для оценки адекватности выражения (1) моделировалась задача с равным давлением на входе и выходе. Это позволяет минимизировать влияние обратных перетеканий на рабочий процесс. В итоге находилась расчетная быстрота действия и коэффициент заполнения $S_{ВХ}/S_Г$ (отношение действительной быстроты действия к геометрической при $P_{ВХ}/P_{ВЫХ} = 1$). Отметим, что при n=3000 об/мин геометрическая быстрота действия $S_Г$ =100,3 л/с.

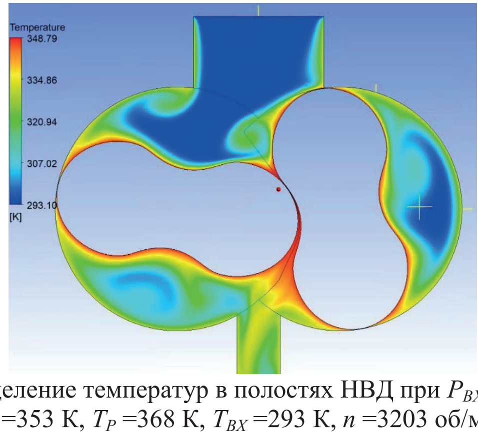


Рис.1. Распределение температур в полостях НВД при $P_{ВХ}$=$P_{ВЫХ}$ =1 кПа, $T_К$ =353 К, $T_Р$ =368 К, $T_{ВХ}$ =293 К, n =3203 об/мин

В табл. 1 сведены значения коэффициента заполнения отсеченного объема, полученные в работах [3, 4] экспериментально и рассчитанные по формуле (1), а также найденные численно в пакете ANSYS-CFX при различных условиях теплообмена. Как видно, все модели в пределах 5,3 % обеспечивают согласие с экспериментом и с расчетом по формуле (1). Это позволяет рекомендовать CFD метод для определения потерь во входном тракте НВД.

Таблица 1. Результаты расчетов

	Быстрота действия, л/с	Расхождение с экспериментом, %	Коэффициент заполнения (S_I=100.34 л/с)
Эксперимент [3, 4]	85,36	-	0,85
Наш расчет: адиабата	89,92	5,3	0,90
Наш расчет: T_K=317 К	86,38	1,2	0,86
Наш расчет: T_K=353 К	84,72	-0,76	0,84
Формула (1)			0,89

Отметим, что температура газа, а значит и стенок рабочей полости T_K оказывают существенное влияние на процесс откачки. Так на рис. 2 показаны зависимости температур газа от угла поворота ротора при различных температурах корпуса. При адиабатическом процессе температура газа практически не меняется. При наличии теплообмена за время прохождения входного тракта происходит нагрев газа с 293 К до 303 К или 310 К в зависимости от температуры корпуса. При температуре корпуса 353 К температура газа в момент образования отсеченного объема составляет 326 К, а при 317 К – 312 К. Температура газа не равномерна по объему и отличается на 25 К.

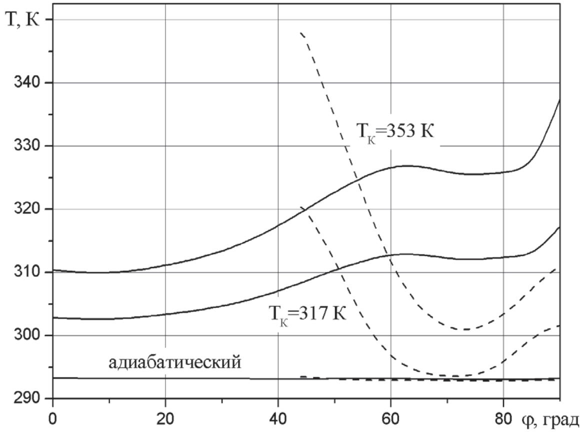


Рис. 2. Зависимость температуры от угла поворота ротора. Линия – точка в начале объема всасывания, пунктир – точка в центре объема

Таким образом, численный расчет позволяет более точно учесть влияние подогрева газа на всасывании, это влияние может достигать 15 % относительно теоретической производительности. Также можно сделать вывод о том, что общепринятое допущение при математическом моделировании о равномерности давления и температуры в замкнутой расчетной полости не всегда применимо при моделировании рабочих процессов вакуумных насосов объемного действия и необходимо дополнительно оценивать потери производительности вследствие влияния таких факторов.

Литература

1. Хабланян М.Х., Саксаганский Г.Л., Бурмистров А.В. Вакуумная техника. Оборудование, проектирование, технологии, эксплуатация. Ч.2. Вакуумные насосы: учеб. Пособие. Казань: Изд-во КНИТУ, 2016. 300 с.

2. Пластинин, П. И. Поршневые компрессоры. Том 1. Теория и расчет / Пластинин П. И. - 3-е изд. , доп. - Москва : КолосС, 2013. - 456 с.

3. Бурмистров А.В. Создание и исследование бесконтактных вакуумных насосов: дис…докт.техн.наук / А. В. Бурмистров; МГТУ им. Н.Э. Баумана. – Москва, 2006. - 363с.

4. Бурмистров А. В., Караблинов Д. Г., Бронштейн М. Д. Коэффициент заполнения отсеченных объемов двухроторного вакуумного насоса типа Рутс // Компрессорная техника и пневматика. – 2006 . -№5. - С. 48-51.

5. Ansys, Inc. license file for Kazan National Research Technology University c/n 657938

6. TwinMesh CFX Berlin license file for Kazan National Research Technological University c/n 13449

ПРОМЫШЛЕННАЯ УСТАНОВКА С ТЕПЛОВЫМ НАСОСОМ ДЛЯ ЭКСТРАКЦИИ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

INDUSTRIAL PLANT WITH HEAT PUMP FOR EXTRACTION OF PLANT RAW MATERIAL

Исмаилов Ленар Юнусович (аспирант, кафедра архитектуры и дизайна изделий из древесины, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», К. Маркса, 68, г. Казань, РФ)

Ismailov Lenar Yunusovich (postgraduate student, Department of Architecture and Design of Wood Products, Kazan National Research Technological University, 68 K. Marx Street, Kazan, Russia)

Разработана промышленная установка для переработки древесных отходов с использованием теплового насоса, позволяющего перераспределить тепловую энергию потоков. Обеспечение ресурсосберегающего эффекта данной установки рассмотрено на примере утилизации образующихся отходов переработки плодоносящих веток облепихи и извлечения ценных компонентов из ее неплодовой части.

An industrial plant for the processing of wood waste using a heat pump has been developed, which makes it possible to redistribute the thermal energy of flows. Ensuring the resource-saving effect of this installation is considered on the example of the disposal of waste generated from the processing of fruit-bearing branches of sea buckthorn and the extraction of valuable components from its non-fruitful part.

Ключевые слова: экстракция, тепловой насос, древесные отходы, облепиха.

Key words: extraction, heat pump, wood waste, sea buckthorn.

Древесина содержит большое количество биологически активных веществ, используемых в лекарственных препаратах [1-3]. При этом большинство официальных медицинских препаратов изготавливаются только из плодов и листьев древесного сырья, а фитопрепараты из ветвей и отходов деревообработки пользуются наименьшим применением в медицинской практике.

Анализ литературных источников показал, что биомасса всех частей облепихи (включая листья, ветки, побеги и даже кору) также содержит практически все известные в настоящее время биологически активные группы органических соединений и важных микроэлементов [4,5]. При соборе ягод облепихи и при проведении плановых агротехнических мероприятий, связанных с омоложением облепиховых массивов, образуется значительное количество потенциального сырья, которое вывозится в отвалы или сжигается, что снижает ресурсосберегающий потенциал комплексного использования растительных материалов [6]. В связи с этим, вопросы поиска рациональных способов выделения ценных компонентов и получение дополнительного количества БАВ, несомненно, являются актуальными и представляют интерес для научных исследований в этой области.

Целью настоящей работы является разработка промышленной установки с использованием теплового насоса для реализации ресурсосберегающей технологии экстракции ценных компонентов из древесного сырья на примере сбора ягод облепихи с последующей экстракцией ее неплодовой части.

Предлагаемый способ переработки облепихи предполагает обрезку 1/2÷1/3 частей кроны плодоносящих ветвей, их заморозку, сепарацию на ягоды и неплодовую части и последующую экстракцию древесной части. Ветви с ягодами облепихи замораживаются по принципу теплового насоса, а высвобождаемая тепловая энергия направляется на размораживание неплодовой части, ее прогрев и последующий подогрев растворителя до заданной температуры процесса экстракции. Замороженные ягоды направляются для хранения или использования в технологических процессах пищевой промышленности. А неплодовая часть облепихи, содержащая ветви и листья, направляется для экстрагирования из них ценных компонентов [7].

На рис. 1 представлена промышленная установка с тепловым насосом для экстракции древесных отходов.

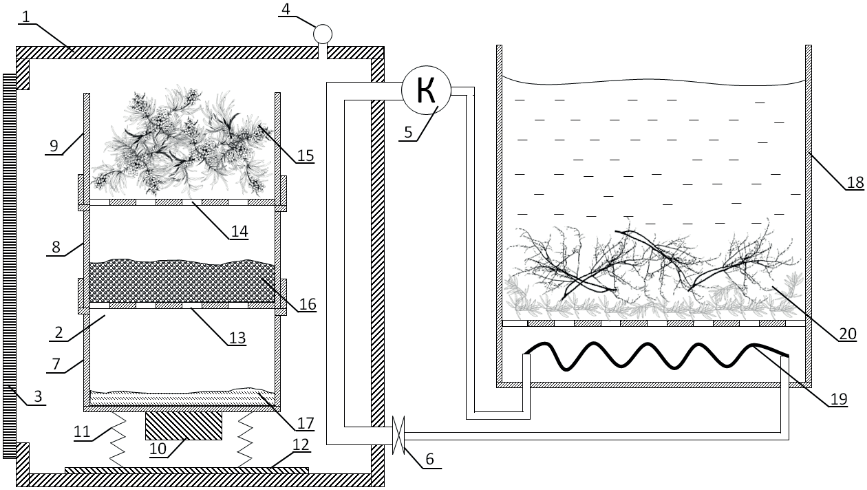


Рис. 1. Промышленная установка с тепловым насосом для экстракции древесных отходов (на примере плодоносящих веток облепихи)

Реализация данного способа позволяет повысить производительность сборки ягод облепихи, поскольку при заморозке срезанные ветви становятся хрупкими и при последующем сепарировании плоды легко разделяются от листьев, мелких веточек и побегов.

Использование принципа теплового насоса обеспечивает энергоэффективность процесса, поскольку полученная тепловая энергия, высвобождаемая при замораживании сырья, позволяет сэкономить энергозатраты на проведения процесса экстракции неплодовой части облепихи.

Промышленная установка для экстракции древесных отходов на основе принципа теплового насоса (рис.1) состоит из герметичной теплоизолированной камеры 1 и гирационного сепаратора 2. Теплоизолированная камера имеет крышку 3, снабжена термометром 4 и подсоединена к компрессору 5. В качестве рабочего тела в такой охлаждающей камере применяются легкокипящие жидкости (Например, Аммиак NH3, Фреон R-12 CCl2F2, Фреон R-22 CHF2CI, Фреон R-134A CF3CFH2), что позволяет реализовать процессы подвода и отвода теплоты по изотермам. Для этого используются процессы кипения и конденсации рабочего тела (хладагента) при постоянных значениях давлений. В теплоизолированной камере 1 понижение давления и температуры осуществляется дросселированием хладагента при его протекании через редукционный вентиль 6, проходное сечение которого может изменяться.

Хладагент из теплоизолированной камеры 1 поступает в компрессор 5, в котором адиабатно сжимается. Образующийся при этом сухой насыщенный пар поступает в конденсатор 19, где конденсируется при постоянных значениях давления и температуры. Выделяющаяся теплота отводится в экстракционную камеру 18 для размораживания и прогрева неплодовой части облепихи 20, а также для поддержания оптимальной температуры экстракции. Образовавшийся конденсат дросселируется в редукционном вентиле 6 с переменным проходным сечением, что позволяет изменять давление выходящего из него влажного пара. Полученный в результате процесса влажный насыщенный пар небольшой степени сухости попадает в теплообменник теплоизолированной камеры 1, где при постоянных значениях давления и температуры испаряется за счет теплоты, отбираемой от находящегося в камере растительного сырья.

Гирационый сепаратор 2 состоит из емкости для сбора пыли и ножек плодов 7, емкости 8 с ложным дном 13, бункера 9 с ложным дном 14 и вибратора 10. Емкость для сбора пыли и ножек плодов 7 закреплена пружинами 11 к станине 12. Емкость 8 с ложным дном 13 вставлена в емкость для сбора пыли и ножек плодов 7. Диаметр отверстий ложного дна 13 составляет половину диаметра плодов. В емкости 8 закреплен бункер 9 с ложным дном 14, диаметры отверстий которого имеют 50% превышение относительно диаметра плодов.

Обрезанные ветки с ягодами 15 промывают водой, загружают в бункер 9 гирационного сепаратора 2, помещают в герметичную теплоизолированную камеру 1, включают компрессор 5 и выдерживают в течение определенного времени до тех пор, пока ветви с ягодами не заморозятся. Пока ветви охлаждаются, их тепло отводится в экстракционную камеру, в котором экстрагируются неплодовые части облепихи. После заморозки ветвей включают вибратор 10. За счет возникающей вибрации веточки 15 перетираются между собой. В результате перетирания происходит отделение веточек 15 от плодов 16, листьев, побегов и ножек плодов 17. Далее плоды 16 просыпаются в емкость 8, задерживаются, а ножки плодов 17 попадают в емкость 7. Ветки из бункера 9, побеги, листья, ножки плодов 17 передаются в экстракционную камеру 18 для извлечения ценных компонентов.

Разработанная промышленная установка позволяет реализовать предложенную ресурсосберегающую технологию, которая упрощает сбор ягод в промышленном производстве, а также обеспечивает утилизацию неплодовой части облепихи с получением товарной продукции в виде экстрактов, что подтверждает ее ресурсо- и энергосберегающий эффект.

Список использованных источников

1. Сафина А.В., Арсланова Г.Р., Тимербаева А.Л., Зиатдинова Д.Ф. Анализ современного состояния технологий процесса экстракции биологически активных веществ из осины и ивы / Деревообрабатывающая промышленность. 2019, в.4, с.51-62

2. Мохирев А.П., Безруких Ю.А., Медведев С.О. Переработка древесных отходов предприятий лесопромышленного комплекса, как фактор устойчивого природопользования // ИВД. 2015. №2-2.

3. Сафина А.В., Исмаилов Л.Ю. Обзор исследований в области

интенсификации процессов экстракции растительного сырья / Деревообрабатывающая промышленность. 2021. № 2. С. 85-101.

4. Tkacz, K.; Wojdyło, A.; Piotr, I.; Turkiewicz, P.N. Triterpenoids, phenolic compounds, macro- and microelements in anatomical parts of sea buckthorn (Hippophaë rhamnoides L.) berries, branches and leaves. J. Food Composit. Analys. 2021, 103, 104107.

5. Gâtlan, A.M.; Gutt, G. Sea Buckthorn in Plant Based Diets. An Analytical Approach of Sea Buckthorn Fruits Composition: Nutritional Value, Applications, and Health Benefits. Int. J. Environ. Res. Public Health 2021, 18, 8986.

6. Li, TSC; Beveridge, T. H. J. Sea Buckthorn (Hippophaerhamnoides L.): Production and Utilization. In Sea Buckthorn (Hippophaerhamnoides L.): Production and Utilizati on; NRC Research Press: Ottawa, ON, Canada, 2003.

7. Сафин Р.Р., Сафин Р.Г., Разумов Е.Ю., Тимербаев Н.Ф., Зиатдинова Д.Ф., Воронин А.Е., Назмутдинова Л.Ш., Зиатдинов А.Р., Миндубаев Р.Р. Способ сборки плодов, преимущественно облепихи // Патент RU 2009 141 644 A, заявитель - Общество с ограниченной ответственностью "Научно-технический центр по разработке прогрессивного оборудования" (ООО "НТЦ РПО"), 2011.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВАКУУМНОЙ СУШКИ ТРУБНОГО УЗЛА НА КОМПРЕССОРНОЙ СТАНЦИИ

Карибуллина Фарида Рахимовна, Тазюков Фарук Хоснутдинович
КНИТУ (КХТИ)

Аннотация. Статья посвящена теоретическому исследованию процесса сушки сложных трубных узлов на примере компрессорной станции «Арская» Шеморданского ЛПУМГ. После проведения гидравлических испытаний возникают трудности с удалением жидкости, которая скапливается внутри трубных узлов. Для облегчения процесса сушки предлагается использование вакуумного насоса, с помощью которого можно создать вакуум до величины давления насыщенного пара при температуре трубопровода. В результате вся жидкость в трубном узле может быть быстро удалена до достижения необходимого уровня влажности внутри трубопровода.

The article is devoted to a theoretical study of the process of drying complex pipe units on the example of the compressor station "Arskaya" Shemordansky LPUMG. After hydraulic tests there are difficulties with removal of liquid, which accumulates inside the tube assemblies. To facilitate the drying process it is proposed to use a vacuum pump, which can be used to create a vacuum to the value of the saturated steam pressure at the temperature of the pipeline. As a result, all the liquid in the tube assembly can be quickly removed before the desired moisture level inside the pipeline is reached.

Ключевые слова: Магистральный газопровод, Трубный узел, Вакуумная сушка, Компрессорная станция.

Газ транспортируется в трубопроводах под высоким давлением. После укладки трубопровода, необходимо провести чистку и провести его опрессовку (тест давлением, для проверки прочности и герметичности соединений). Наиболее распространенным способом является проведение гидравлических испытаний. После данных испытаний и слива жидкости трубопровод остается влажным внутри. Наличие влаги приводит к загрязнению транспортируемого газа, возникновению химических реакций жидкости с газом, провоцированию процессов коррозии. Некоторые газы при реакции с водой образуют твердый осадок (зарастание трубопровода). Но не только гидравлические испытания являются следствием коррозии внутри трубопровода. Во время транспортировки и хранения элементы трубопровода подвергаются воздействию атмосферы, например, при транспортировке труб морским путем неизбежен контакт с агрессивной соляной атмосферой. Чистка и осушение трубопровода имеют решающее значение для последующей многолетней безаварийной эксплуатации.

Расчет суммарного потока газов

Для расчета быстроты откачки рассчитывается количество газов, поступающих в вакуумную систему, и строится кривая, характеризующая изменение потока газа во времени [1].

Суммарный поток газов, поступающих в рабочий объем $\boldsymbol{Q_{\Sigma}}$, определяется следующим образом:

$$\boldsymbol{Q_{\Sigma} = Q_{ПР}+Q_{НАТ}+Q_{ДИФ}+Q_{ПОВ}=p*S_0} \quad (1)$$

где $\boldsymbol{Q_{НАТ}}$ – поток газов, натекающий из атмосферы через течи и соединения, м^{3}Па/с;

$\boldsymbol{Q_{ДИФ}}$ – поток газов, обусловленный диффузионным газовыделением из глубины конструкционных материалов и обрабатываемых изделий, м^{3}Па/с;

$\boldsymbol{Q_{ПР}}$ – поток, обусловленный проницаемостью стенок вакуумной камеры, м^{3}Па/с;

$\boldsymbol{Q_{ПОВ}}$ – поток газа с поверхности рабочей камеры и элементов, расположенных в ней, м^{3}Па/с;

$\boldsymbol{p}$ – давление в рабочей камере, Па;

$\boldsymbol{S_0}$ – эффективная быстрота откачки камеры при давлении p, м^3/с.

1) Поток $\boldsymbol{Q_{ПР}}$ связан с натеканием газа в вакуумную камеру как по соединениям, так и по сплошному материалу, которые не могут обеспечить абсолютную герметичность. Следовательно, необходимо правильно выбирать толщину стенок, особенно для тонких деталей – сильфонов, мембран и т.д. Чаще всего такой расчет проводят в тех случаях, когда в конструкции вакуумной камеры имеются нагретые элементы, отделяющие вакуумную камеру от атмосферы

$$\boldsymbol{Q}_{\text{пов}} = \sum_{\boldsymbol{i=1}}^{\boldsymbol{n}} \boldsymbol{q}_{\text{ПР}\boldsymbol{i}} \cdot \boldsymbol{A_i}, \quad (2)$$

где $q_{ПРi}$ – удельная проницаемость i- ых материалов; м^{3}Па/м^{2}с, A_i – площади поверхностей соответствующих материалов, м^2.

2) Поток газа с поверхности рабочей камеры и элементов, расположенных в ней:

$$Q_{пов} = \sum_{i=1}^{n} q_i \cdot A_i, \quad (3)$$

где q_i – удельное газовыделение материалов, м^{3}Па/м^{2}с, A_i – площади поверхностей соответствующих материалов, м^2.

Удельное газовыделение q_i с поверхностей нагретых деталей и элементов рабочей камеры можно считать одинаковым и постоянным во времени. Так как скорость десорбции газов с поверхности экспоненциально зависит от температуры, то нагретые элементы десорбируют газы практически полностью на начальном этапе нагрева. Затем уровень газовыделения нагретых элементов становится постоянным и соответствует газовыделению отожженных в вакууме материалов.

Газовыделение с поверхностей холодных элементов (комнатная температура) переменно во времени и определяется как:

$$lg\, q = A_{ДЕС} – B_{ДЕС} * t, \quad (4)$$

где t – длительность откачки, с; $A_{ДЕС}$, $B_{ДЕС}$ – постоянные.

3) Поток газов, связанный с натеканием в рабочую камеру обычно берется по характеристикам элементов вакуумных систем, а при их отсутствии – равным или несколько большим произведения чувствительности течеискателя на число мест, которые могут стать источником натекания.

4) Диффузионное газовыделение связано с выделением газов из конструкционных материалов и зависит от материала и его предварительной обработки:

$$Q_{пов} = \sum_{i=1}^{n} q_{Дi} \cdot A_i \quad (5)$$

где $q_{Дi}$ – удельное газовыделение материалов, м^{3}Па/м^{2}с, A_i – площади поверхностей элементов, м^2.

$$q_Д = \frac{c_0}{2} \cdot \sqrt{\frac{D}{t}}, \quad (6)$$

где c_0 – начальная концентрация газа в твердом теле, м^{3}Па/м^3; D – коэффициент диффузии, м^2/с; t – время откачки, с.

5) Рассчитывается общий поток газов $Q_Σ$ как сумма всех потоков газов, поступающих в рабочую камеру. Результат обычно представляется в виде таблицы и графика зависимости $Q_Σ(t)$.

Расчет системы вакуумирования

1) Проводимость трубопровода в вязкостном режиме, л/с;

$$U_{вяз} = 182 \cdot \frac{d^4}{l} \cdot P \quad (7)$$

где l – длина трубопровода

2) Эффективная быстрота действия, л/с;

$$S_{эф} = \frac{U_{вяз} \cdot S_k}{U_{вяз} + S_k} \quad (8)$$

3) Давление в трубопроводе, мм рт.ст.;

$$P_k = \frac{S_k \cdot P_k}{S_{эф}}$$

Определение времени откачки системы

Время откачки в рассматриваемом интервале, с;

$$t = 2,3 \cdot \frac{V}{S_{эф}} \cdot lg\frac{P_{k-1}}{P_k}$$

Таблица. Результаты моделирования

Проводимость трубопровода в вязкостном режиме $U_{вяз}$, л/с	57757620870	7,6E+09	1,22E+09	7,6E+08	7,6E+07	3799843,478
Эффективная быстрота действия $S_{эф}$, л/с	69,9	70	70	69,9	69,9	69,9
Давление в трубопроводе P_k, мм рт.ст.	760	100	16	10	1	0,05
P_{k1-1}, мм рт.ст.	760	100	16	10	1	0,05
P_{k1}, мм рт.ст.	100	16	10	1	0,05	
$S_{эф1-1}$, л/с	69,9	70	70	69,9	69,9	69,9
$S_{ср1}$, л/с	69,9	70	69,9	69,9	69,9	
t_1, с	4066,1	3674,02	942,3	4616,3	6005,9	

Литература

1. Дубинский В.Г., Пономарев В.М., Филатов А.А., Лопатин А.С., Калинин Н.А., Кудрявцев Д.А. Теория и практика осушки полости газопроводов после испытаний. -М.: Макс Пресс. -2012. -415 с.

2. Процесс вакуумной сушки трубопровода (https://megatechnika.com/protsess-vakuumnoy-sushki-truboprovoda)

3. Вакуумная сушка газопроводов в компании Газпром (https://megatechnika.com/vakuumnaya-sushka-gazoprovodov-v-kompanii-gazprom)

4. Свод правил сооружения магистральных газопроводов. Очистка полости и испытание газопроводов. СП 111-34-96. (https://www.rts-tender.ru/poisk/svod-pravil/111-34-96)

АМИНОЭФИРЫ БОРНОЙ КИСЛОТЫ - ЭФФЕКТИВНЫЕ АГЕНТЫ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ АЗЕОТРОПНЫХ СМЕСЕЙ СОДЕРЖАЩИХ ЭТАНОЛ, ВОДУ И АЦЕТОНЕТРИЛ

Клинов А.В., Хайруллина А.Р., Малыгин А.В.,
Мадаминов Н.В., Давлетбаева И.М.

Казанский национальный исследовательский технологический университет

Проведено исследование влияния аминоэфиров борной кислоты (АЭБК) на условия парожидкостного равновесия в бинарных смесях ацетонитрил – вода, этанол – ацетонитрил и трехкомпонентной смеси этанол – ацетонитрил – вода. Экспериментально измерены кривые остаточных концентраций и условия фазового равновесия пар – жидкость (TPXY данные) при атмосферном давлении. Определены неизвестные ранее параметры групп для модели UNIFAC. Показано что использование АЭБК убирает все азеотропные точки в исследуемых смесях.

Ключевые слова: фазовое равновесие пар–жидкость, аминоэфиры борной кислоты, модель UNIFAC

The effect of boric acid aminoesters (AEBC) on the conditions of vapor–liquid equilibrium in binary mixtures of acetonitrile – water, ethanol – acetonitrile and a three–component mixture of ethanol - acetonitrile - water was studied. The residual concentration curves and vapor–liquid phase equilibrium conditions (TPXY data) at atmospheric pressure were experimentally measured. Previously unknown parameters of groups for the UNIFAC model have been determined. It is shown that the use of AEBC removes all azeotropic points in the studied mixtures.

Keywords: vapor–liquid phase equilibrium, boric acid aminoesters, UNIFAC model

Ацетонитрил и этанол являются важными органическими растворителями, которые применяются во многих отраслях промышленности [1-2], области их использования достаточно широки. Выделение ацетонитрила и этанола из их жидких растворов в воде путём использования дистилляции затрудняется в виду образования ими как бинарных, так и тройных азеотропных смесей [3-5]. Одним из наиболее эффективных промышленных способов разделения азеотропных смесей экстрактивная дистилляция.

Проведенные в [6-7] исследования показали перспективность использования АЭБК-ТЭГ/ДЭГ для экстрактивной ректификации смеси этанол – вода. Целью данной работы является проведение дальнейших исследований АЭБК в качестве высокоэффективных экстрагентов для разделения азеотропных смесей ацетонитрил – вода и ацетонитрил – этанол – вода.

Данные по фазовому равновесию пар-жидкость были получены на основе экспериментальных измерений. Использовались два метода экспериментального изучения условий равновесия пар – жидкость: методом открытого испарения [6] и методом измерения на эбулиометре типа Свентославского [8].

При проектировании технологических процессов дистилляции с использованием экстрагентов различного молекулярного строения необходимы надежные модели для расчета условий фазового равновесия пар – жидкость. Для исследуемых в данной работе систем перспективным методом описания коэффициента активности является метод групповых составляющих UNIFAC (UNIquac Functional-group Activity Coefficients) [9].

В данной работе, по полученным экспериментальным данным, были определены отсутствующие в литературе параметры взаимодействия группы CCN (в составе ацетонитрила) с группой бора B и аминогруппой CH_2N.

На основе метода открытого испарения была выполнена оценка влияния АЭБК-ТЭГ на относительную летучесть ацетонитрила в водном растворе. Добавление АЭБК увеличивает относительную летучесть ацетонитрила, что приводит к его более быстрому истощению в кубе. Такое поведение линий открытого испарения является следствием исчезновения азеотропной точки для водного раствора ацетонитрила в присутствии АЭБК.

Подробное измерение условий фазового равновесия пар – жидкость в трехкомпонентной системе ацетонитрил – вода – АЭБК-ТЭГ осуществлялось на эбулиометре. Из рис. 1 следует, что добавление АЭБК-ТЭГ в систему ацетонитрил – вода увеличивает концентрацию ацетонитрила в паровой фазе. Азеотропная точка пропадает при содержании АЭБК-ТЭГ между 20 и 40 мас.%.

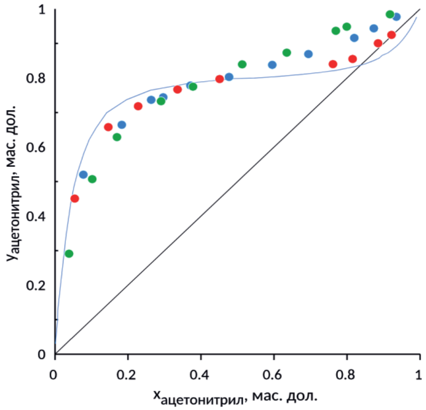


Рис. 1 Равновесие пар – жидкость в системе ацетонитрил – вода – АЭБК – ТЭГ. Линия – бинарная смесь, геометрические фигуры при добавлении АЭБК-ТЭГ (красные круги –20 мас.%, синие круги – 40 мас.%, зеленые круги – 60 мас.%).

По полученным экспериментальным TPXY данным определялись энергетические UNIFAC параметры взаимодействия групп B, CH_2N с группой CH_3CN. Эти параметры отражают межмолекулярное взаимодействие ацетонитрила с АЭБК-ТЭГ. Проверена точность описания моделью UNIFAC TPXY данных для бинарной смеси ацетонитрил – вода с литературными параметрами [10]. Расхождение, особенно по температуре и по координатам азеотропной точки, оказывается значимым. Поэтому по экспериментальным данным из работ [11-12] и настоящей работы была проведена корректировка параметров модели UNIFAC. Полученные параметры для группы ацетонитрила, приведены в табл.1.

Табл. 1 Энергетические параметры взаимодействия групп

Группа-m	Группа-n	a_{mn}	a_{nm}
H_2O	CCN	186.76	79.05
B	CCN	1714.77	-66.08
$(C)_3N$	CCN	834.46	322.39

С использованием определённых параметров модели UNIFAC была проверена согласованность экспериментальных и расчетных кривых остаточных концентраций для системы ацетонитрил – вода – АЭБК-ТЭГ. Среднее расхождение между экспериментальными и рассчитанными данными по модели UNIFAC для системы ацетонитрил – вода – АЭБК составило 4,5%.

На основе моделирования с UNIFAC параметрами из табл. 1, исследовалось влияние АЭБК на относительную летучесть компонентов смеси этанол – ацетонитрил. Адекватность описания взаимодействия ацетонитрил – АЭБК и этанол – АЭБК подтверждается данными представленными выше и в работе [7]. В системе этанол – ацетонитрил азеотроп исчезает при добавлении АЭБК-ТЭГ порядка 60 мас.%. Так же важно отметить, что этанол, несмотря на то, что его температура кипения ниже, чем у ацетонитрила, в присутствии АЭБК становится труднолетучим компонентом во всем диапазоне концентраций смеси.

Трехкомпонентная смесь этанол – ацетонитрил – вода содержит четыре особые точки, три бинарных азеотропа и один тройной, который разделяет диаграмму на три области дистилляции. Расчеты выполнены на основе модели UNIFAC с параметрами из табл. 1. Точность рассчитываемых кривых остаточных концентраций проверялась путем сравнения с экспериментальными данными.

Добавление АЭБК-ТЭГ в тройную смесь этанол – ацетонитрил – вода приводит к разрушению трех бинарных азеотропов и тройного азеотропа соответственно, что говорит об эффективности применения АЭБК-ТЭГ в качестве экстрагента. При этом, легколетучим компонентом становится ацетонитрил, труднолетучим – вода, а этанол занимает среднее положение по летучести.

Проведенные исследования показали, что АЭБК является перспективным экстрагентом для дистилляционного разделения бинарных и трехкомпонентных смесей состоящих из ацетонитрила, этанола и воды. Показано, что для разбиения некоторых бинарных азеотропов требуется АЭБК-ТЭГ не более 30 мас.%.

Для моделирования условий фазового равновесия пар – жидкость по собственным экспериментальным данным определены не известные ранее энергетические параметры модели UNIFAC, описывающие взаимодействия групп B, CH_2N с группой CH_3CN. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными TPXY данными и кривыми остаточных концентраций показали удовлетворительное согласие. Таким образом, вместе с данными из работы [7] полученная матрица параметров UNIFAC (UNIFAC Matrix) дает возможность использовать модель UNIFAC для расчета и поиска оптимальных схем экстрактивной ректификации смеси этанол – ацетонитрил – вода.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по гранту № 075-01261-22-00 «Энергосберегающие процессы разделения жидких смесей для извлечения промышленных растворителей».

Список литературы

1. K.X. Xu, Handbook of Fine Organic Chemical Raw Materials and Intermediates, 2nd ed. Chemical Industry Press, Beijing, 2002
2. Mahdi, T., Ahmad, A., Nasef, M. M., & Ripin, A. (2014). State-of-the-Art Technologies for Separation of Azeotropic Mixtures. Separation & Purification Reviews, 44(4), 308–330. doi:10.1080/15422119.2014.963607
3. Horsley, L.H., Azeotropic Data, III, American Chemical Society, Washington, D.C., 1973.
4. Ogorodnikov, S. K., Lesteva, T. M., and Kogan V. B., Azeotropic Mixtures, Khimia, Leningrad, 1971.
5. Azeotropic data for binary and ternary systems at moderate. Journal of Chemical and Engineering Data, Vol. 41, No. 2, 1996, 202-209.
6. Organoboron Ionic Liquids as Extractants for Distillation Process of Binary Ethanol + Water Mixtures, Ilsiya M. Davletbaeva, Alexander V. Klinov, Alina R. Khairullina, Alexander V. Malygin, Sergey E. Dulmaev, Alisa R. Davletbaeva and Timur A. Mukhametzyanov, Processes 2020, 8(5), 628; doi:10.3390/pr8050628
7. A.V. Klinov, A.V. Malygin, A.R. Khairullina, S.E. Dulmaev, I.M. Davletbaeva. Alcohols dehydration by extractive distillation with use of aminoethers of boric acid. Processes 2020, 8(11), 1466
8. Swietoslawski, W. Azeotropy and Polyazeotropy; Macmillan Company: New York, NY, USA, 1963.
9. Fredenslund. Aa. Group Contribution Estimation of Activity Coefficients in Nonideal Liquid Mixtures / Fredenslund. Aa.; Jones. R. L.; Prausnitz. J. M. // AIChE J. - 1975. – 21. –pp. 1086–1099.
10. Online UNIFAC Source. Available online: http://unifac.ddbst.de/unifac-matrix.html.

11. Acosta, J.; Arce, A.; Rodil, E.; Soto, A. Fluid Phase Equilib., 2002, 203, 83-98 A thermodynamic study on binary and ternary mixtures of acetonitrile, water and butyl acetate]

12. Zhang, Z.; Lv, M.; Huang, D.; Jia, P.; Sun, D.; Li, W. J. Chem. Eng. Data, 2013, 58, 3364-3369 Isobaric Vapor Liquid Equilibrium for the Extractive Distillation of Acetonitrile + Water Mixtures Using Dimethyl Sulfoxide at 101.3 kPa

ЭКСТРАКТИВНАЯ РЕКТИФИКАЦИЯ ВОДНО-СПИРТОВЫХ СМЕСЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АМИНОЭФИРОВ ОРТОФОСФОРНОЙ КИСЛОТЫ

Клинов А.В., Малыгин А.В., Хайруллина А.Р., Давлетбаева И.М., Сазонов О.О., Анашкин И.П.

Казанский национальный исследовательский технологический университет

Рассмотрены аминоэфиры ортофосфорной кислоты (АЭФК) как экстрагенты для разделения водных растворов этанола экстрактивной ректификацией. Методом открытого испарения исследованы влияние АЭФК различного молекулярного строения на условия парожидкостного равновесия в растворах этанол-вода. Показано, что добавление АЭФК убирает азеотропную точку. В большей степени относительную летучесть этанола увеличивает АЭФК на основе глицерина. Для расчета коэффициентов активности в трехкомпонентной смеси этанол-вода-АЭФК использовалась модель UNIFAC, в рамках которой предложено разбиение молекул АЭФК на групповые составляющие. По собственным и литературным экспериментальным данным определены не известные ранее параметры групп PO - CH, PO - CH_2, PO - OCH_2, PO - $NHCH_2$, PO – OH, PO – H_2O.

Ключевые слова: экстрактивная ректификация, этанол-вода, аминоэфиры ортофосфорной кислоты

Aminoesters of orthophosphoric acid (AEPA) are considered as extractants for the separation of aqueous solutions of ethanol by extractive rectification. The effect of AEPA of various molecular structures on the conditions of vapor-liquid equilibrium in ethanol-water solutions has been studied by the method of open evaporation. It is shown that the addition of AEPA removes the azeotropic point. AEFA based on glycerol increases the relative volatility of ethanol to a greater extent. To calculate the activity coefficients in a three-component mixture of ethanol-water-AEPA, the UNIFAC model was used, within which the division of AEPA molecules into group components was proposed. Previously unknown parameters of the groups PO - CH, PO - CH_2, PO - OCH_2, PO - $NHCH_2$, PO - OH, PO - H_2O were determined from our own and published experimental data.

Keywords: extractive rectification, ethanol-water, aminoesters of orthophosphoric acid

Производство безводного этанола стало одним из важнейших вопросов во многих странах мира из-за больших усилий, направленных на использование биотоплива с целью уменьшения загрязнения и воздействия на окружающую среду [1]. Основные требования, которые предъявляются к экстрагенту это его небольшая стоимость, значительное влияние на относительную летучесть этанола, простота регенерации и инертность к материалу оборудования. В данной работе рассмотрены аминоэфиры полученные на основе ортофосфорной кислоты (АЭФК) как возможные экстрагенты для разделения водных растворов спиртов. АЭФК так же как АЭБК [2] имеют разделенные в пространстве ионные пары, придающие свойства, присущие ИЖ, являются практически не летучими, при нормальных условиях находятся в жидком состоянии и имеют невысокую стоимость.

Для оценки влияния АЭФК на относительную летучесть спирта в водных растворах, необходимы данные по фазовому равновесию пар-жидкость в трехкомпонентной системе этанол-вода-АЭФК. Экспериментальная установка и методика проведения эксперимента подробно описаны в [2]. На рис. 1 представлены так называемые линии остаточных концентраций, которые представлены для бинарного водного раствора этанола и при добавлении в него АЭФК в количестве 60 % масс. Видно, что добавление АЭФК увеличивает относительную летучесть спирта, что приводит к его более быстрому истощению в кубе. Такое поведение линий открытого испарения является следствием исчезновения азеотропной точки для водного раствора этанола в присутствии АЭФК. На рис. 1 так же прослеживается некоторая закономерность отклонения линий открытого испарения от бинарной смеси этанол-вода при добавлении различных АЭФК. Наибольшее отклонение наблюдается для АЭФК-Гл, наименьшее для АЭФК-ПЭГ. Такая же закономерность прослеживается и в мольных концентрациях. Наиболее вероятное объяснение такой закономерности на наш взгляд связано с долей ОН групп в одной молекуле экстрагента, ОН группа имеет значительный дипольный момент. У воды дипольный момент выше, чем у этанола, поэтому диполь-дипольное взаимодействие воды и группы ОН удерживает воду в растворе понижая ее относительную летучесть.

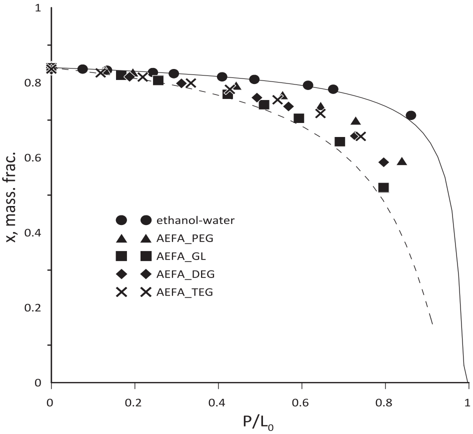


Рис.1 Кривые остаточных концентраций для смеси этанол-вода АЭФК с различным строением при 60% масс., геометрические фигуры - экспериментальные данные, сплошная линия-расчет для бинарной смеси этанол-вода, пунктирная линия – расчет для смеси этанол-вода-АЭФК_Гл.

Для моделирования условий фазового равновесия в трехкомпонентной системе этанол-вода-АЭФК использовалась модель UNIFAC [3], в рамках которой коэффициенты активности рассчитываются по параметрам групповых составляющих молекул смеси. Молекулы АЭФК синтезированные с различными гликолями и глицерином, будут отличаться только на количество однотипных групп, параметры которых можно определить на основе конкретных АЭФК, например ТЭГ и глицерина. В этом случае модель UNIFAC имеет перспективы предсказывать условия фазового равновесия в водноспортивных растворах с АЭФК различного молекулярного состава.

В рамках модели UNIFAC молекулы АЭФК разделены на групповые составляющие: PO–группа фосфата, CH - alkane group, CH_2 - alkane group, OCH_2 - ether group, $NHCH_2$-amine - 3d group, OH- alcohol group.

Анализ литературы [4, 5, 6], показал отсутствие данных по параметрам взаимодействия с группой PO. Поэтому в данной работе по имеющимся экспериментальным данным были определены энергетические параметры взаимодействия этой группы с другими группами, присутствующими в рассматриваемых растворах: PO - CH, PO - CH_2, PO - OCH_2, PO - $NHCH_2$, PO–OH, PO –H_2O. По коэффициентам активности в бинарной смеси трибутилфосфат-н-гексан [7] были определены параметры PO - CH_2, PO - OCH_2 (таб. 2). Для определения параметров группового взаимодействия остальных неизвестных параметров PO - $NHCH_2$, PO – OH, PO – H_2O использовались экспериментальные данные температур кипения АЭФК-Гл-этанол, АЭФК-ДЭГ(Гл)-вода, которые определялись на установке Свентославского [8].

Среднее расхождение составило 1%. Определенные параметры взаимодействия группы фосфата PO представлены в табл.2.

Таблица 2 Параметры взаимодействия группы PO_j

i	a_{ij}	a_{ji}
CH_2	557.93	797.94
OCH_2	396.85	-185.04
OH	-1897.45	-591.94
CNH	-1137.35	407.45
H_2O	471.35	-876.48

Проверка адекватности описания равновесия пар-жидкость водно-спиртовых растворов в присутствии АЭФК проводилась путем сравнения расчетных и экспериментальных данных по открытому испарению. Кривые остаточных концентраций рассчитывались по уравнению открытого испарения (уравнение Рэлея) бинарной смеси [9]:

$$y(x)^* = \frac{dx}{d\ln(L)} + x$$

где x и L - состав и масса кипящей смеси; y (x) * - равновесный состав пара, который определялся на основе модели UNIFAC с параметрами из табл.2.

При сравнении кривых остаточных составов полученных для смеси этанол-вода при разных концентрациях АЭФК-Гл, АЭФК_ДЭГ и АЭФК_ТЭГ видна хорошая согласованность экспериментальных и расчетных данных, что подтверждает адекватность определенных энергетических параметров для модели UNIFAC. Средняя ошибка составляет менее 3.5% , максимальная 11%.

Проведенные исследования показали, что АЭФК являются перспективными экстрагентами для экстрактивной ректификации смеси этанол-вода. При одинаковых массовых концентрациях АЭФК сильнее увеличивает относительную летучесть этанола по сравнению с гликолями и глицерином. В отличие от последних АЭФК имеет значительно меньшую летучесть. Это дает возможность заводить поток АЭФК на верхнюю тарелку не опасаясь загрязнения дистиллята. Кроме того, упрощается процесс регенерации АЭФК если используется замкнутая двухколонная схема дегидратации этанола. Предложенные неизвестные ранее параметры модели UNIFAC показали адекватность рассчитываемых условий фазового равновесия пар-жидкость в системах этанол-вода-АЭФК и могут быть использованы при моделировании процессов экстрактивной ректификации.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, грант № 075-01261-22-00 «Энергосберегающие процессы разделения жидких смесей для регенерации промышленных растворителей».

Список литературы

1. Bastidas PA, Gil ID, Rodríguez G. Comparison of the main ethanol dehydrationtechnologies through process simulation. In: 20th European symposiumon computer aided process engineering; 2010.
2. Organoboron Ionic Liquids as Extractants for Distillation Process of Binary Ethanol + Water Mixtures, Ilsiya M. Davletbaeva, Alexander V. Klinov, Alina R. Khairullina, Alexander V. Malygin, Sergey E. Dulmaev, Alisa R. Davletbaeva and Timur A. Mukhametzyanov, Processes 2020, 8(5), 628; doi:10.3390/pr8050628
3. R.C. Reid, J.M. Prausnitz, B. E. Poling The Properties of Gases and Liquids 1987, Edition: 4th ed, Publisher: McGraw-Hill, P.753 ISBN 10:0070517991
4. Wittig. Roland Vapor-Liquid Equilibria by UNIFAC Group Contribution.Revision and Extension / Roland Wittig. Juergen Lohmann. Juergen Gmehling // Ind. Eng. Chem. Res. – 2003. – Vol.42. – p.183-188
5. http://unifac.ddbst.de/unifac-matrix.html
6. http://ddbonline.ddbst.com/DDBSearch/onlineddboverview.exe
7. Li, J.-D., Li, Y.-G., Chen, J., Lu, J.-F., &Teng, T. (1990). Activity coefficient data and their correlation for tributyl phosphate—hydrocarbon and uranyl nitrate tributyl phosphate complex—hydrocarbon solutions. Fluid Phase Equilibria, 58(3), 307–318. doi:10.1016/0378-3812(90)85138-z
8. A.V. Klinov, A.V. Malygin, A.R. Khairullina, S.E. Dulmaev, I.M. Davletbaeva. Alcohols dehydration by extractive distillation with use of aminoethers of boric acid. Processes 2020, 8(11), 1466
9. Gmehling. J. Chemical Thermodynamics for Process Simulation/ J. Gmehling. M. Kleiber. B. Kolbe. J. Rarey. - WILEY-VCH. 2019. 808p.

РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ЛОПАСТНОЙ МЕШАЛКИ С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

Кондратьева Мария Игоревна, kondrattteva@yandex.ru
Бронская Вероника Владимировна, dweronika@mail.ru
Игнашина Татьяна Вячеславовна, ighnashina00@mail.ru
Гарифуллина Эльвира Валерьевна, elviragar4@gmail.com
Котова Нина Витальевна, kotova.ninavital@mail.ru

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Аннотация: В статье приводится определение мощности лопастной мешалки и зависимости от интенсивности перемешивания в виде решения с использованием нейронной сети.

Ключевые слова: лопастная мешалка, мощность, нейронные сети

Abstract: The paper provides a definition of the power of a paddle agitator and the dependence on the mixing intensity in the form of a solution using a neural network.

Keywords: paddle agitator, power, neural networks

Состояние химической промышленности имеет множество проблем, решение которых возможно с применением технологий искусственного интеллекта, нейронных сетей и математического моделирования. Основными проблемами данной отрасли является обеспечение безаварийной работы предприятий (возможность прогнозирование аварийных ситуаций), оценка надежности оборудования, получение качественных показателей, оптимизация и многое другое. Применение искусственных нейронных сетей возможно как в производственных, так и в учебных и экспериментальных целях[1-6]. Для построения нейронных сетей был использовать программный пакет Wolfram Mathematica. Данный программный комплекс эффективен для создания аппроксимаций данных в условиях неопределенности.

Рассмотрим аппараты с лопастными мешалками, где процесс перемешивания выполняется лопастями, если перемешивание проходит в аппарате с большой высотой, то лопасти мешалки могут быть установлены на разных высотах. Лопастная мешалка широко используются в химической технологии. Назначение лопастной мешалки - оптимизация температурного режима жидкости; обеспечение взаимного растворения жидкостей; создание грубых эмульсий; получение взвеси в жидкости твердых частиц со значительной их концентрацией (до 90%); получение взвеси волокнистых веществ; взмучивание осадка (легкого).

Одним из основных факторов, характеризующих работу мешалок, является потребляемая мощность. С возрастанием скорости увеличивается значение силы инерции; образуются вихри.

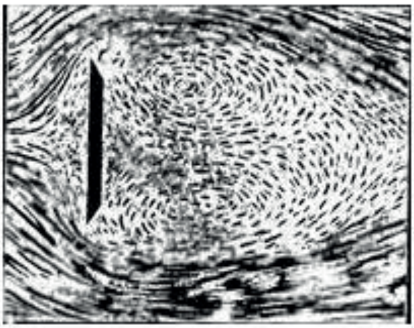


Рис. 1. Вихреобразование при движении в жидкости плоской пластинки с острыми краями.

Основные формулы, используемые для расчета номинальной мощности, потребляемой мешалки (Табл.1)

Табл.1 Основные формулы

Энергия затрачивается на преодоление силы сопротивления среды.	$K_N = \frac{A}{Re_{М}^{m}}$	A и m-константы, определяемые из опыта
Центробежное число Рейнольдса	$Re_{М} = \frac{\rho n d_{М}^{2}}{\mu}$	ρ - плотность жидкости, кг/м^3; n – частота вращения мешалки, с$^{-1}$; $d_м$ - диаметр мешалки, м; μ – вязкость жидкости, (Н × с)/м^2.
Определение номинальной мощности, потребляемой мешалкой	$N_{М} = K_N \rho n^3 d_{М}^{5}$	K_N - критерий мощности, величину которого выбирают по соответствующим таблицам и номограммам в зависимости от типа мешалки и центробежного числа Рейнольдса.

Для создания нейронных сетей использовался программный пакет Wolfram Mathematica [7,8]. С помощью встроенных функций и механизмов машинного обучения, Wolfram Mathematica использовался для аппроксимации экспериментальных. Процесс обучения заключался в выборе функций активации и количества слоев, определении количества нейронов в слое, вычислении весовых коэффициентов и погрешности расчетов. Обучение нейронной сети проводилось до тех пор, пока погрешность между расчётными значениями и экспериментом не достигла нужного уровня погрешности (рис.2,3).

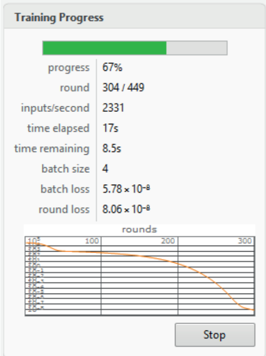


Рис.2 Процесс обучения нейронной сети в Wolfram Mathematica

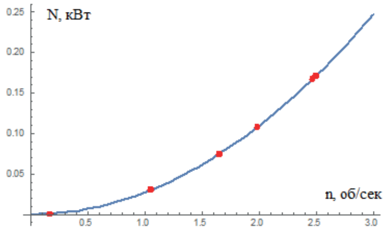


Рис.3 Зависимость мощности мешалки от количества оборотов мешалки, линия – расчет нейронной сети, точки - эксперимент

Одним из успешных путей решения для задач данного типа является применение методов построения искусственных нейронных сетей, которые позволяют выполнять расчеты в условиях неопределенности.

В работе приводится возможность применения нейронных сетей в области химической технологии и показан потенциал использования нейронных сетей для описания процессов гидродинамики.

Список использованных источников:

1. Цапаев А.А., Харитонова О.С., Бронская В.В., Володченко Т.В., Мусина Ф.А., Бальзамов Д.С., Игнашина Т.В. Нейросетевая модель процесса утилизации промышленных водных стоков // В сборнике: Приоритетные направления развития науки и технологий. доклады XXVI международной научно-практической конференции. Под общей редакцией В.М. Панарина. 2019. С. 150-152. 9

2. Ахметова И.Г., Бальзамова Е.Ю., Бронская В.В., Бальзамов Д.С., Лапин К.В., Харитонова О.С. Выбор оптимального типа теплоизоляционной конструкции на основе нейросетевого моделирования // В сборнике: Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. 92- е заседание семинара учрежденного при ИСЭМ СО РАН. В 3-х книгах. Иркутск, 2020. С. 186-190.

3. Клинов А.В., Бронская В.В., Игнашина Т.В., Нургалиева А.А. Формирование профессиональных компетенций в процессе изучения курса "процессы и аппараты химической технологии" // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 13. С. 285-288.

4. Маркелов А.К., Сунгуров М.С., Бронская В.В. Цифровизация высшего образования: новые возможности и перспективы развития // В сборнике:

Развитие современной науки и технологий в условиях трансформационных процессов. Сборник материалов III Международной научно-практической конференции. Редколлегия: Л.К. Гуриева [и др.]. Москва, 2022. С. 49-53.

5. Адигамов Н.Р., Гималтдинов И.Х. Обеспечение эффективного безаварийного фунционирования оборудования для дробления кормов //В сборнике: Устойчивое развитие сельского хозяйства в условиях глобальных рисков. Материалы научно-практической конференции. 2016. С. 130-136.

6. Адигамов Н.Р., Гималтдинов И.Х., Хисамов Л.А. Повышение износостойкости молотков дробилок кормов виброискровой обработкой // В сборнике: АГРАРНАЯ НАУКА XXI ВЕКА. АКТУАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ. Труды III международной научно-практической конференции. 2019. С. 226-229.

7. Мануйко Г.В., Аминова Г.А., Дьяконов Г.С., Бронская В.В., Исмагилова А.И., Салахова Э.И., Антонова И.О. Моделирование периодического процесса полимеризации бутадиена на модифицированном литиевом катализаторе с учетом изменения его активности // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 1. С. 76-81. 12

8. Мануйко Г.В., Аминова Г.А., Дьяконов Г.С., Ахметов И.Г., Бронская В.В. Кинетическая неоднородность неодимовой каталитической системы, модифицированной метилалюмоксаном // Теоретические основы химической технологии. 2015. Т. 49. № 3. С. 261.

СНИЖЕНИЕ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ И ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ МЕХАНИЧЕСКОГО ПРИВОДА В ПРОИЗВОДСТВЕ СТЕКЛОВОЛОКНИТА

Кондрашева Светлана Геннадьевна
Хамидуллина Дина Александровна
Лашков Вячеслав Александрович
КНИТУ (КХТИ), 420015, Казань, ул. К.Маркса, 68

Технологии производства термопластов характеризуются наличием высокой концентрации вредных веществ в зоне обслуживания экструдера и выбросами летучих компонентов в окружающую среду. В большинстве случаев это связано с низкой степенью надежности работы системы газоочистки, а низкая концентрация летучих компонентов в вентиляционном потоке снижает эффективность очистки воздуха методом абсорбции. Для обеспечения экологической безопасности производства наполненных пластиков разработана технологическая установка, основанная на герметизации основного оборудования, и выполнен инженерный анализ системы энергетическая машина - механическая передача с целью обеспечения надежности работы экструдера.

Ключевые слова: наполненные пластики, летучие компоненты, герметизация оборудования, энергетическая система.

Technologies for the production of thermoplastics are characterized by the presence of a high concentration of harmful substances in the service area of the extruder and emissions of volatile components into the environment. In most cases, this is due to the low degree of reliability of the gas cleaning system, and the low concentration of volatile components in the ventilation flow reduces the efficiency of air cleaning by absorption. To ensure the environmental safety of the production of filled plastics, a technological unit was developed, based on the sealing of the main equipment, and an engineering analysis of the power machine - mechanical transmission system was carried out in order to ensure the reliability of the extruder.

Key words: filled plastics, volatile components, equipment sealing, power system.

Анализ технологии производства термопласта, наполненного стекловолокном [1-3], выявил наличие высокой концентрации вредных веществ в зоне обслуживания экструдера и выбросы летучих компонентов в окружающую среду. Указанные недостатки обусловлены низкой степенью надежности работы системы газоочистки вследствие ограниченного радиуса действия местных отсосов. Низкая концентрация летучих компонентов в вентиляционном потоке снижает эффективность очистки воздуха методом абсорбции, что приводит к выбросам вредных веществ в окружающую среду.

Стекловолокнит АГ-4 представляет собой волокнистый прессовочный материал, изготовленный на основе фенольно-формальдегидной смолы из стеклянного волокна с диаметром нитей 0,007- 0,009 мм. Он применяется для получения изделий в основном методом прямого прессования и выпускается двух видов в зависимости от вида наполнителя марки С (АГ-4С) и марки В (АГ-4В).

Для обеспечения экологической безопасности производства наполненных пластиков (стекловолокнита марки АГ-4В ГОСТ 20437-75) разработана технологическая установка [4], основанная на герметизации основного оборудования, и выполнен инженерный анализ системы энергетическая машина - механическая передача с целью обеспечения надежности работы экструдера.

Технологическая установка (см. рис.1) состоит из экструдера 1, линий подачи фенолформальдегидной смолы 2 и наполнителя 3, герметичного кожуха 4, промежуточной емкости 5, устройства улавливания летучих компонентов, линии циркуляции абсорбента, вентиляционной системы.

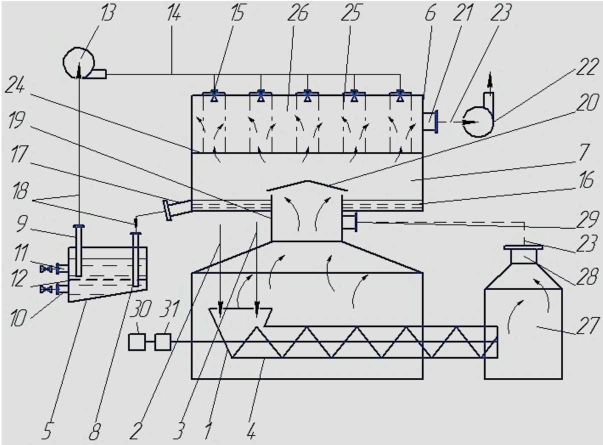


Рис.1. Схема технологической установки

Устройство улавливания летучих компонентов включает рукавный фильтр 6 и скруббер 7. Промежуточная емкость 5 снабжена патрубками ввода 8 и отвода 9 абсорбента, патрубками отвода шлама 10 и абсорбента на нейтрализацию уловленных компонентов, ввода 11 регенерированного абсорбента, сетку 12. Линия циркуляции абсорбента состоит из промежуточной емкости 5, насоса 13, коллектора 14, распыливающих форсунок 15, сборника жидкости 16, штуцера 17, трубопровода 18.

Вентиляционная система включает коллектор 19, отбойник 20, патрубок 21, вентилятор 22 и воздуховоды 23, а рукавный фильтр - трубную решетку 24, фильтрующие рукава 25, образующие межрукавное пространство 26.

Экструдер 1 помещен в герметичный кожух 4, а выходной конец экструдера - в герметичный приемник 27, сообщенный через патрубки 28, 29 и воздуховод 23 с коллектором 19. Рукавный фильтр 6 расположен в верхней части скруббера 7, а форсунки орошения 15 линии циркуляции введены в каждый рукав 25 фильтра. Нижний срез патрубка ввода 8 абсорбента расположен под сеткой 12, а патрубка отвода 9 абсорбента - над сеткой 12.

Вращение от электродвигателя 30 на шнек экструдера 1 передается через привод, включающий механическую передачу (цепную, ременную) и конический одноступенчатый редуктор 31. Анализ механических передач выполнен в редакторах APM WinMachine [5-8] и Autodesk Inventor, которые позволяет производить прочностной анализ деталей [9] за счет средств инженерного расчета без испытания опытных образцов.

Последовательность расчета сводится к выполнению операций: создание модели детали и выбор материала; задание схемы нагружения (условий закрепления, моментов, сил); определение параметров расчетной сетки для модели детали; выполнение прочностного расчета с последующим анализом и, если необходимо, корректировкой схемы нагружения и геометрических параметров детали.

Система позволяет проектировать и исследовать на прочность сложные машиностроительные изделия в динамике. В конкретные моменты времени величины нагрузки на детали передаются в Autodesk Inventor Stress Analysis - модуль анализа прочности, что позволяет оптимизировать размеры детали, узлов и конструкции в целом. Параметры, необходимые для расчета конической передачи получены на основании кинематического расчета привода. Основные размеры зубчатых колес, силовые и прочностные параметры валов и конического зацепления рассчитаны в модуле APM Trans системы APM WinMachine. Результаты проектировочного расчета зубчатой передачи использованы при создании 3D-модели конического редуктора (рис.2).

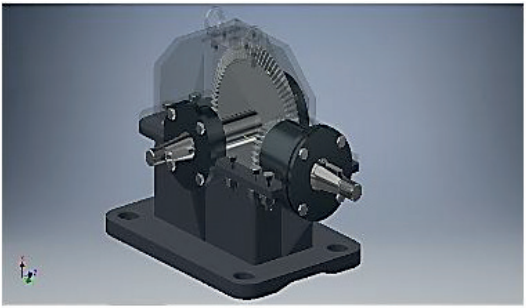


Рис.2. 3D-модель конического редуктора

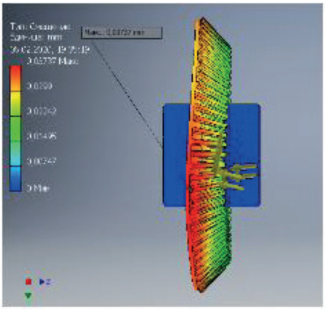


Рис.3. Деформации конического колеса

При анализе прочности разработана расчетная схема, приложены силы, возникающие в зацеплении, обозначены реакции опор в подшипниковых узлах и построена конечно-элементная сетка (КЭ-сетка) зубчатой передачи. Результаты расчета получены в цветовой форме (рис.3), каждому из цветов которой соответствовало определенное числовое значение напряжения по Мизесу, выраженное в МПа. Вывод результатов прочностного расчета возможен в анимационный ролик, что позволяет осуществить просмотр динамики изменения напряжений (рис.4) и дает возможность при неизменной схеме нагружения добиваться улучшения картины напряжений, внося изменения в геометрию деталей редуктора, т.е. оптимизировать конструкцию и обеспечить надежность его работы.

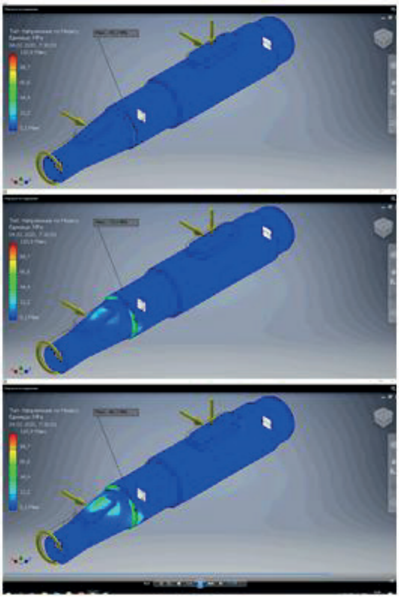


Рис.4 - Динамика нагружения вала конического колеса

Список литературных источников

1. Кавецкий Г.Д. Оборудование для производства пластмасс. - М.: Химия, 1986. 224 с.

2. Быстров Г.А., Гальперин В.М., Титов Б.П. Обезвреживание и утилизация отходов промышленных пластмасс. - Л., Химия, 1982. 264 с.

3. Калинчев Э.Л., Саковцева М.Б. Свойства и переработка термопластов. -Л., Химия, 1983. 288 с.

4. Установка для получения наполненных пластиков, преимущественно стекловолокнита: Пат. № 2185961 Рос. Федерация. № 2001108340 / Сафин Р.Г., Лашков В.А., и др.; заявл. 28.03.2001; опубл. 27.07.2002 Бюл. № 21. 10 с.

5. Лашков В.А., Кондрашева С.Г., Халимбаев Р.Р. Расчет и проектирование конического редуктора в модуле APM Drive // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т. 19. № 20. С. 141-142.

6. Каратаев О.Р., Завьялова В.Е., Лашков В.А. Расчет параметров цепных передач в модуле APM Trans // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т. 19. № 12. С. 140-142.

7. Лашков В.А., Сорокин С.А., Кондрашева С.Г., Ганин Е.А. Проектирование и инженерный анализ механизмов в CAD/CAE системах. / Вестник Казанского технологического университета. 2018. Т. 21. № 3. С. 139-142.

8. Лашков В.А., Кондрашева С.Г., Ганин Е.А. Расчет прочности валов машин с помощью расчетно-графического модуля APM Shaft // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т. 19. № 7. С. 94-96.10.

9. Лашков В.А. и др. Трехмерное проектирование и инженерный анализ элементов конического редуктора в системе Autodesk Inventor // Вестник технологического университета. 2020. Т.23. №5. С.94-97.

СПЕКТРАЛЬНАЯ ИЗЛУЧАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ПЛАТИНЫ В ОБЛАСТИ ПЛАВЛЕНИЯ

Косенков Дмитрий Валерьевич, Косенкова Наталья Юрьевна
Сагадеев Владимир Владимирович, Аляев Валерий Алексеевич

Казанский национальный исследовательский технологический университет
Dmi-kosenkov@yandex.ru

Аннотация: радиационным методом проведено экспериментальное исследование нормальной спектральной излучательной способности ε_λ платины вблизи точки плавления. Измерение ε_λ фиксировалось по полосам пропускания узкополосных фильтров. Проведен сравнительный анализ с литературными данными других авторов.

Ключевые слова: нормальная спектральная излучательная способность, область плавления, платина, длина волны.

Платина широко применяется как катализатор в производственных тепловых процессах. Знание теплофизических свойств – излучательной способности в широком волновом диапазоне позволяет производить теплотехнические расчеты лучистого теплообмена в высокотемпературных процессах [1].

Исследования проводились на экспериментальной установке в диапазоне длин волн от 0,26 до 10,6 мкм, представленной в работе [2], радиационным методом.

Исследовалась нормальная спектральная излучательная способность ε_λ платины в области точки плавления твердой полированной и жидкой фазах. Измерения проводились в атмосфере подготовленного аргона, после предварительного вакуумирования измерительной ячейки. В качестве резистивного нагревателя использовалась танталовая лента.

Методика проведения эксперимента подробно изложена в работе [3].

Оценка погрешности эксперимента, проведенная авторами, составляет от 3 до 8%, в зависимости от температуры.

В исследовании применялись образцы технической платины марки ПлА-1 с химической чистотой 99,95 %.

Металлическая платина исследовалась в твердом полированном состоянии, при средней температуре эксперимента 2018 К. Образец платины представлял собой слиток. Интенсивность спектрального излучения твердой платины хорошо сопоставляется с опытными данными по [4-6] на спектральном участке от 0,26 до 10,6 мкм. Классическое распределение падения интенсивности ε_λ от длины волны хорошо иллюстрируется на рис.1.

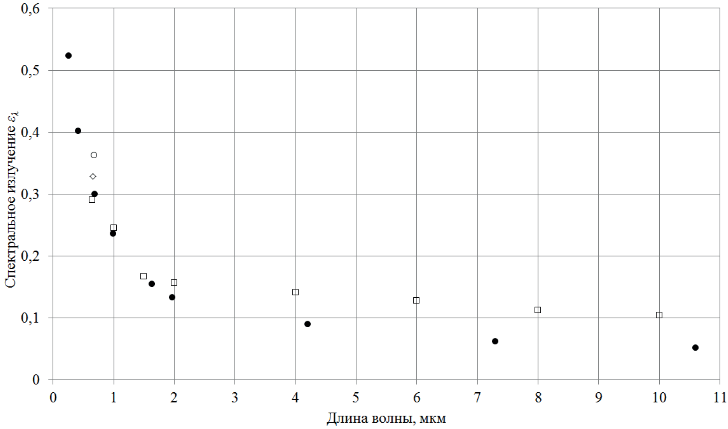


Рис.1. Платина (твердая фаза): □ – [4]; ○ – [5]; ◊ - [6]; ● – наши измерения.

Жидкое состояние платины исследовалось в области температуры 2053 К. Точечные замеры интенсивности ε_λ по литературному обзору [6-10] показывают экспериментальное сопоставление на участке спектра от 0,26 до 1,5 мкм. Измерение ε_λ платины авторами проведено до 10,6 мкм.

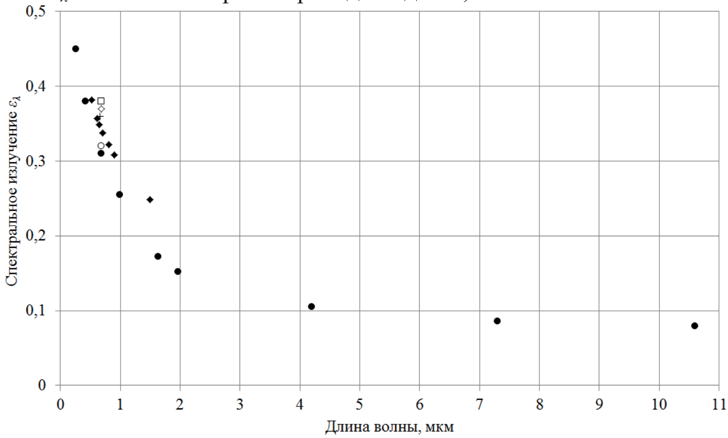


Рис.2. Платина (жидкая фаза): + - [6]; ♦ - [7]; ◊ - [8]; ○ – [9]; □ – [10]; ● – наши измерения.

ВЫВОДЫ

Проведено экспериментальное измерение нормальной спектральной излучательной способности платины в области точки плавления.

Исследование ε_λ твердой полированной фазы и фазы жидкого состояния платины в области точки плавления показало удовлетворительное совпадение с аналогичными исследованиями других авторов.

Поведение ε_λ исследованного металла характерно соответствует ниспадающей зависимости излучения от длины волны в области точки плавления.

ЛИТЕРАТУРА

1. R. Siegel, J.R. Howell. Thermal Radiation Heat Transfer (Taylor& Francis, N.Y., 2002)
2. Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев , Изменение нормальной спектральной излучательной способности при плавлении элементов / Журнал технической физики. 2022, т.92, в.3, с.342-347.
3. Д.В. Косенков, В.В. Сагадеев, В.А. Аляев, Степень черноты ряда металлов VIII группы периодической системы / Теплофизика и аэромеханика. 2021, т.28, в.6, с.951-956.
4. Y.S. Touloukian, D.P. DeWitt. Thermal Radiative pPoperties: Metallic Elements and Alloys. Vol. 7, Thermophysical Properties of Matter, ed. by Y.S. Touloukian, C.Y. Ho (IFI/Plenum, NY., 1970).
5. Cagran, Claus P., Christian Brunner, Achim Seifter and Gernot Pottlacher. “Liquid-phase behaviour of normal spectral emissivity at 684.5 nm of some selected metals.” High Temperatures-high Pressures 34 (2002): 669-679.
6. Wilthan, B., Cagran, C.P., Brunner, C., & Pottlacher, G. (2004). Thermophysical properties of solid and liquid platinum. Thermochimica Acta, 415, 47-54.
7. McClure, J. L., Ared Cezairliyan and Erhard Kaschnitz. “Radiance Temperatures (in the Wavelength Range 527 to 1500 nm) of Palladium and Platinum at Their Melting Points by a Pulse-Heating Technique.” International Journal of Thermophysics 20 (1999): 1149-1161.
8. Krishnan, Shankar, G. P. R. Hansen, Robert H. Hauge and John L. Margrave. “Spectral emissivities and optical constants of electromagnetically levitated liquid metals as functions of temperature and wavelength.” (1990).
9. F. Righini, A. Rosso, High Temp. High Press. 12 (1980) 335–349.
10. Cagran, Claus P., Christian Brunner, Achim Seifter and Gernot Pottlacher. “Liquid-phase behaviour of normal spectral emissivity at 684.5 nm of some selected metals.” High Temperatures-high Pressures 34 (2002): 669-679.

ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕСТЕ ПЕРЕСЕЧЕНИЯ ТОНКОСТЕННЫХ ОБОЛОЧЕК ИЗ НИЗКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

Москалев Леонид Николаевич, Поникаров Сергей Иванович

Кафедра «Машины и аппараты химических производств», «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Аннотация. В настоящее время существует различная нормативно-техническая документация и множество различных исследований, в которых имеются методы и методики расчетов напряжений узлов сварных соединений работающих в стационарных условиях, но либо под постоянным давлением, либо при повышенной температуре. Однако, для работников производств особый практический интерес представляет нестационарное нагружение подобных соединений из низколегированной стали, при одновременном воздействии давления и нагрева отдельных элементов оборудования. Такие условия могут создаваться, например, при резком пуске в аппарат горячей среды или попадание сварного соединения в зону пожара, либо в струю горячей среды при аварии. В программном комплексе ANSYS R17.0 (учебная версия) реализована геометрия такого узла в сеточном образе для проведения численного эксперимента по определению эквивалентных напряжений. Этот численный эксперимент позволит спрогнозировать деформирование сжатие и / или растяжение места соединения штуцера с корпусом / обечайкой аппарата для опасных производственных объектов, в которых обращаются опасные вещества.

Ключевые слова: тонкостенная оболочка, деформация, температура, давление, эквивалентные напряжения.

Во многих отраслях промышленности для изготовления оборудования используется низколегированная сталь различных марок, например 09Г2С, 10Г2С1 и т.д. Эти марки сталей нашли свое применение из-за легкой свариваемости всеми видами сварки, хорошей обработкой резанием и высокими прочностными характеристиками. Из таких марок стали изготавливают такое оборудование, как, например: емкостное, резервуары, колонны, теплообменники, реакторы, трубопроводную арматуру, трубы и т. п. [1]

Различные конструкции в химической, нефтяной, газовой, энергетической отраслях промышленности имеют сварные соединения пересекающихся тонкостенных оболочек, в виде двух цилиндров. Такие сварные соединения, например, штуцеры и люки с обечайками сосудами, имеют различные конструктивные исполнения [2, 3], зависящие от многих факторов: назначение, характер нагружений, размер и форма, место расположения отверстий под штуцер или люк, расстояние от этих отверстий до ближайших концентраторов напряжений. Концентратором напряжений является любая точка в конструкции при наличии резких изменений формы тела. Известно, что концентрации напряжений приводят к возможному снижению прочности любой конструкции приводящее к разрушению [4, 5]. Поэтому, на опасных производственных объектах, особое внимание уделяется прочности оборудования, в которых обращаются опасные химические вещества, повышенные давления более 0,05 МПа. [6].

Определение эквивалентных напряжений при одновременном влиянии избыточного давления в аппарате и высокой температуры в месте соединения штуцера и корпуса представляет особый интерес [7, 8]. Известно, что одновременные нагружения избыточным давлением и резким нагревом до высокой температуры штуцера, могут быть в различных ситуациях, а именно:

1. Резкий пуск в аппарат горячей среды;
2. Пожар в зоне соединения штуцера и обечайки сосуда;
3. Попадание штуцерного узла в струю горящей среды при аварии.

Подобные исследования проводятся в настоящее время многими исследователями, разработана нормативно – техническая документация и предложены методы определения напряжений в месте пересечения двух цилиндров при переменном и постоянном давлениях [9-14].

Следовательно, по большей части практической новизной такого исследования является расчет прочности сварных соединений узла штуцер-обечайка из хладостойкой низколегированной стали при одновременном воздействии давления и нестационарного нагрева методом конечных элементов.

Расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) узла соединений штуцеров различных диаметров с обечайкой различных внутренних диаметров D = 800мм. и 1600мм., проводился при постоянном допустимом избыточном давлении и различном градиенте температур штуцеров для стали марки 09Г2С, а также с изменениями геометрических размеров. Расчет проводился по третьей теории прочности, которая имеется в базе данных программного комплекса ANSYS R17.0 (учебная версия). Построение сеточной модели этого штуцерного узла приведено в литературном источнике [7].

Геометрическая модель рассматриваемого соединения представлена на рис. 1.

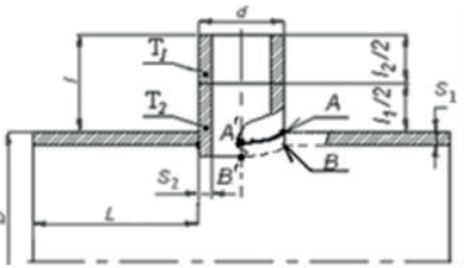


Рис.1 Геометрия узла штуцер-обечайка

В качестве исходных данных задавались начальная и конечная температуры штуцера, постоянное допустимое избыточное давление внутри сосуда, время расчета нагрузок на узел составлял от 0 до 300 секунд, а также задавались свойства стали.

Таким образом, основной задачей этого исследования, является выявление и анализ эквивалентных напряжений в месте сварного соединения штуцера с обечайкой / корпусом аппарата при изменении температуры газа и как следствие температуры T_1 патрубка $l_2/2$ (рис.1). То есть нагрев соединения узла штуцер-обечайка осуществлялся теплопроводностью от второй половины патрубка ($l_2/2$) к первой половине патрубка ($l_1/2$) при этом избыточное давление в штуцере не превышало допустимое давление в сосуде.

Проведенный анализ расчетных данных эквивалентных напряжений в месте соединения штуцера с обечайкой показал появления пиковых концентраций эквивалентных напряжений, оказывающие негативные последствия на целостность этого сварного соединения. Такие концентрации происходят при растяжении / сжатии стали под действием давления и / или резкого роста температуры сварного соединения штуцера с обечайкой.

Очевидно, превышения эквивалентных напряжений выше допустимых напряжений может привести к разрушению такого соединения.

Также по результатам численных экспериментов было выявлено уменьшение эквивалентных напряжений на пересечении тонкостенных оболочек при увеличении толщины стенки штуцера по отношению к корпусу аппарата.

Выводы:

В результате расчета / численного эксперимента, замечено следующее:

1. В течении 150-200 секунд после начала эксперимента эквивалентные напряжения резко возрастают до «пиков», которые являются негативными с точки зрения прочности соединения. После прохождения этих пиков кривые напряжений начинают снижаться;

2. Эквивалентные напряжения напрямую зависят от толщин стенок штуцера и обечайки. При увеличении толщины стенки штуцера по отношению к стенке обечайки значения эквивалентных напряжений на пересечении этих оболочек значительно уменьшаются.

3. Для снижения (или предотвращения) пиковых значений эквивалентных напряжений в конструкциях штуцер-обечайка рекомендуем, отношение толщины стенки обечайки к толщине стенки штуцера (S_1/S_2) принимать меньше 1.

Литература

1. Лащинский А.А., Толчинский А.Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры: справочник / А.А. Лащинский, А.Р. Толчинский. – 3-е изд., стер. – Москва: Альянс, 2008. – 752 с.

2. ГОСТ 34233.3-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Укрепление отверстий в обечайках и днищах при внутреннем и

наружном давлениях. Расчет на прочность обечаек и днищ при внешних статических нагрузках на штуцер.

3. РД 26-18-8-89. Сварные соединения приварки люков, штуцеров и муфт. Основные типы, конструктивные типы и размеры.

4. Федосеев В.И. Сопротивление материалов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 592 с.

5. СТО 02494680-0046-2005 «Соединения сварные стальных конструкций. Общие требования при проектировании, изготовлении и монтаже. Приказ ЗАО «ЦНИИПСК им. Мельникова» от 27.01.2005г.

6. ГОСТ 34347-2017 Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия.

7. Нгуен Ван Ань, Москалев Л.Н., Поникаров С.И., Влияние нестационарного нагрева на прочность штуцерных узлов из стали 09Г2С / Черные металлы. 2021, в.8, с.38-42.

8. Нгуен Вьет Ань, Москалев Л.Н., Поникарова И.Н., Поникаров С.И., Компьютерное моделирование температурных напряжений в технологических сосудах в местах врезки штуцеров в SolidWorks / Вестник технологического университета. 2019, т.22, в.7, с.144-150.

9. Скопинский, В.Н. Новый критерий определения предельной нагрузки в сосудах давления с патрубками / В.Н. Скопинский, Н.А. Берков, Н.В. Вожова // Машиностроение и инженерное образование, 2011, Т.51, №3, с. 50-57.

10. Скопинский, В.Н. Напряжения в тройниковых соединениях трубопроводов при комбинированном нагружении / В. Н. Скопинский, Н. А. Берков, А. Б.Сметанкин // Машиностроение и инженерное образование, 2007, Т.47, №2, с. 34-45

11. R. Gwaltney, C. Experimental Stress Analysis of Cylinder-to-Cylinder Shell Models and Comparisons With Theoretical Predictions / C. Gwaltney, J. M. Corum, S. E. Bolt, J. W. Bryson J. Pres. // Journal of Pressure Vessel Technology. 1976. - Vol. 98. - No. 4, - Pp. 283-290..

12. Xue, L. Parametric FEA study of burst pressure of cylindrical shell intersections / L. Xue, G.E.O. Widera, Z. Sang // Journal of Pressure Vessel Technology. - 2010. - Vol. 132. - №3. - Pp. 31203-31209.

13. РД 26-16-88. Сосуды и аппараты. Метод расчета напряжений в месте пересечения патрубков с обечайками и днищами.

14. ГОСТ 34233.2-2017 Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек.

МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕМОНТА КЛЕТЕЙ ТРУБ РАДИАНТНЫХ ЗМЕЕВИКОВ CR-NI СПЛАВА СВАРКОЙ

Муратаев Фарид Исхакович,
Васильева Ираида Владимировна

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, 420111, г. Казань, К. Маркса, 10

Аннотация Установлены закономерности состава, структуры и свойств: сплава G 4852 Micro - GX45NiCrSiNbTi35-25 и сварных соединений литых труб теплообменников в условиях газовой коррозии при работе конвекционной и радиантной части змеевиков печи в широком температурном интервале 400…1150^{O}С. Определена степень несоответствия химического состава металла труб после эксплуатации сопроводительной документации. Установлены причины несоответствия металла и проблемы ремонта клетей центробежно-литых труб сваркой аустенитного сплава, имеющие эксплуатационную наследственность, обусловленную насыщением сплава углеродом.

Regularities of composition, structure and properties were established: alloy G 4852 Micro - GX45NiCrSiNbTi35-25 and welded joints of cast pipes of heat exchangers under conditions of gas corrosion during operation of the convection and radiant parts of the furnace coils in a wide temperature range of 400 ... 1150 ° C. The degree of inconsistency in the chemical composition of the pipe metal after the operation of the accompanying documentation has been determined. The reasons for the inconsistency of the metal and the problems of repairing the stands of centrifugally cast pipes by welding an austenitic alloy, which have an operational inheritance due to the saturation of the alloy with carbon, have been established.

Ключевые слова: металлография змеевиков, ремонт труб сваркой.

Проведено исследование структуры и состава центробежнолитых труб (ЦЛТ) сплава G 4852 Micro - GX45NiCrSiNbTi35-25 до и после эксплуатации поврежденных газовой коррозией в печах пиролиза. Для восстановления участков змеевика из импортных труб сваркой, выявлены причины повреждения радиантного змеевика в агрессивных условиях и проблемы ремонта, для чего определена степень соответствия металла после эксплуатации сопроводительным документам труб изготовленных фирмой «Schmidt+Clemens» ФРГ. Проанализированы образцы металла труб в состояниях: после эксплуатации (№1, рис.1), поставки (№2) и новой трубы для ремонта клетей (№3). Рис.1 иллюстрирует наличие протяженных столбчатых кристаллов (образца №1), проходящих всю толщину стенки (~ 7,5мм), что не допустимо. В металле долевого шлифа (ДШ) большое количество пор и ликватов сосредоточено в глубину металла до 2,3мм. На внутренней поверхности ЦЛТ глубина залегания пор и ликватов составляет от 0,22мм до 1,9мм.

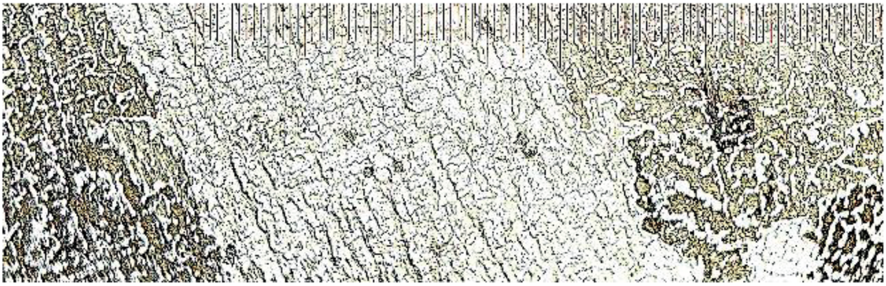
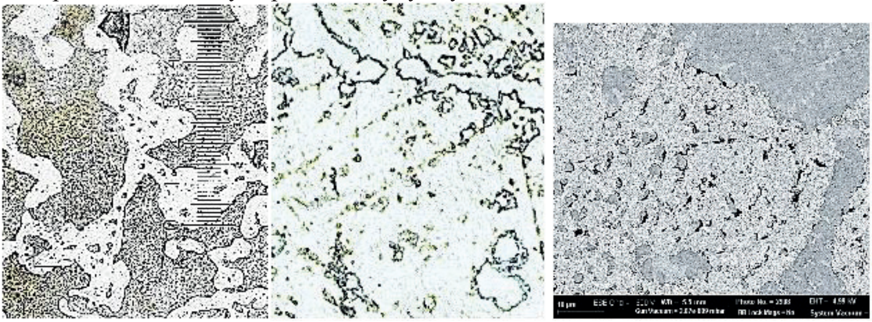


Рис.1 Микроструктура трубы сплава G 4852 Micro после эксплуатации (№1)

В металле поперечного шлифа (ПШ) на внутренней поверхности глубина залегания ликватов составляет до 0,46мм, пор и ликватов в глубину металла до 2,8мм. Т.О. - внутренняя и наружная поверхность трубы повреждается соответственно на 1,9-2,8мм и 0,44-2,3мм – неравномерно, что свидетельствует о нестабильности (или неравномерности температуры) внешнего воздействия топочных газов (рис.2). Структуры заметно отличаются по составу границ дендритов, по - этому вероятно - будут существенно отличаться и их свойства.



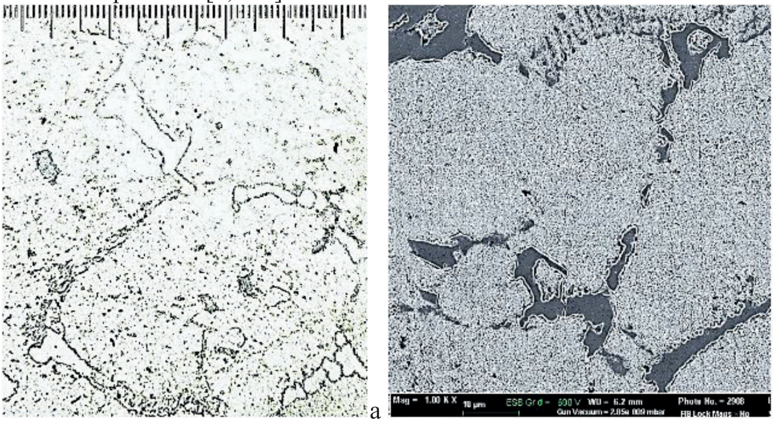
а б в

Рис.2 Детали микроструктуры трубы сплава G 4852 Micro после эксплуатации при: светлом (а, б) и темном поле (в) освещения поверхности шлифа

Микроструктура матрицы дуплексная она состоит из аустенита (γ) с высокодисперсной фазой внедрения (NbC, TiC) (рис.2), с коагулированной $Cr_{23}C_6$ и карбидной эвтектики (γ+$Cr_{23}C_6$) - в междендритном пространстве (рис.2 и рис.3). Однако существенно отличается от схожего металла труб змеевиков (45Х25Н20С2, 45Х25Н35С2 и 45Х25Н35С2Б) [1-6]. Отличается от металла трубы № 1, состоит только из протяженных скоагулированных карбидов $Cr_{23}C_6$.

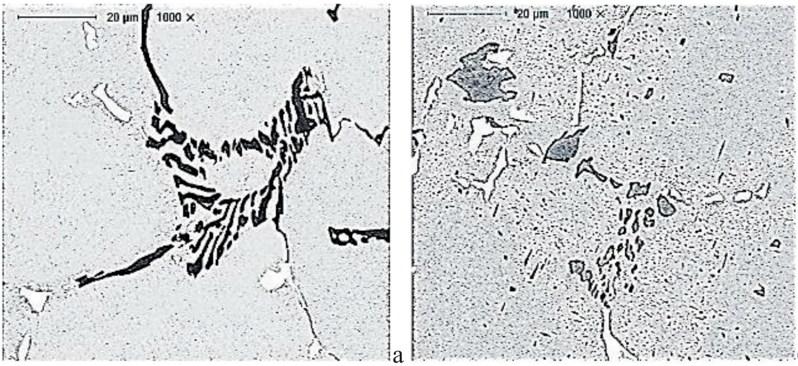
Структура металла новой трубы и с эксплуатационной наработкой практически аналогична типовому - согласно каталогу (фирмы

Schmidt+Clemens) G 4852 Micro (рис.4). Отличается от меньшим количеством (Nb,Ti)C, что негативно сказывается на работоспособности труб радиантных змеевиков печей пиролиза (низкими характеристики: длительной прочности и сопротивления газовой коррозии при Тэкс. >1050^{O}C) согласно данным полученным в работах [1, 6-9].



а б

Рис.3 Структура металла новой трубы (№3) в светлом (а) и темном поле (б)



а б

Рис.4 Микроструктура образцов труб сплава Centralloy® G 4852 Micro до (а) и после (б) эксплуатации - из каталога фирмы «Schmidt+Clemens"

Исследованиями установлено.

1. Образец металла трубы в состоянии поставки соответствует требованиям DIN EN 10204 и данным сертификата фирмы «S+C», но занижены: W и Ti.

2. Образцы металла ЦЛТ после эксплуатации по составу не соответствуют требованиям «DIN EN 10204» и данным сертификата к сплаву Centralloy® G 4852 Micro (GX45NiCrSiNbTi35-25) по содержанию углерода: C1

= 1,5% и С2 = 0,688%, что свидетельствуют о перегреве металла трубы в эксплуатации.

3. Исследованный образец металла трубы №1 проявляет магнитные свойства. Количество ферритной фазы на поверхностях стенки ЦЛТ достигает 42% и 18%.

4. Внутренняя и наружная поверхность образца трубы №1 повреждены соответственно: на 1,9-2,8мм и 0,44-2,3мм.

5. Образец металла трубы №1 после эксплуатации по механическим свойствам не соответствует требованиям НД «DIN EN 10204» и данным сертификата к сплаву Centralloy® G 4852 Micro Провалены значения σв и δ, на 38% и 80%.

6. Факт разупрочнения и утраты пластичности металла № 1 обусловлен ползучестью металла в связи с непродолжительным повышением температуры при эксплуатации в интервале свыше (1100 – 1150) ОС.

7. Металлографическим анализом установлены причины деградации металла в эксплуатации и роли фактора ползучести сплава Centralloy® G 4852 Micro на снижение механических свойств труб.

8. Очень сильные изменения состава, структуры и свойств, а именно сильное насыщение металла углеродом в эксплуатации - вызвало плохую свариваемость проблемных и новых труб при ремонте поврежденных клетей змеевиков печи.

Выводы

1. Разрушение ЦЛ труб сплава G 4852 произошло из-за завышения температуры в радиантной части змеевиков печи свыше 1050ОС - от процесса ползучести в следствие разупрочнения и провала запаса пластичности металла.

2. Плохая свариваемость металла проблемных труб с новыми - при ремонте поврежденной клети - вызвана сильным насыщением (первых) в эксплуатации углеродом. В результате - типовая (по режимам и технологии) сварка новой и старой трубы стала сваркой сильно разнородных сплавов, что следует учитывать.

Использованные литературные источники

1. Муратаев Ф.И., Муратаев А.Ф. Адаптация состава, структуры, свойств металла и сварных соединений теплообменников к сопротивлению высокотемпературной газовой коррозии // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2015 №3. С. 119-125.

2. Ф.И. Муратаев, А.В. Евлампьев, Т.А. Муратаев Анализ причин стресс-коррозии аустенитных сталей и сварных соединений // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2021. №1. С. 76–81.

3. Муратаев Ф.И., Мухамадеев И.М. Металлография коррозионного растрескивания сталей // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2020. Т. 76. №3. С. 49-55.

4. Муратаев Ф.И. Типовые и деградационные признаки микроструктуры сварных соединений конструкционных и специальных сталей // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2013. № 2. Выпуск. 3. С. 84–89.

5. Муратаев Ф.И., Клабуков М.А., Муратаев А.Ф. Деградация состава и структуры сталей и сварных соединений змеевиков парообразования в условиях химической и электрохимической коррозии// ISSN 2078-6255. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2016, №4. С. 44-49.

6. Ф.И. Муратаев, А.В. Евлампьев, А.Ф. Муратаев Определение закономерностей повреждения сплава GX45NiCrSiNbTi35-25 центробежно-литых труб радиантных змеевиков // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2022. № 2. С. 96-102.

7. Муратаев Ф.И., Загидуллин А.Д. Обеспечение стойкости сварных соединений аустенитных сталей к межкристаллитной коррозии // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, 2019. №2. С. 45-50.

8. Муратаев Ф.И. Адаптация методики преподавания к требованиям ФГОС ВПО для повышения профессиональных компетенций студентов-материаловедов // ISSN 2078-6255. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2014. № 1. С. 194-197.

9. Ф.И. Муратаев, А.Ф. Муратаев Структура и свойства конструкционной стали после длительного перегрева // ISSN 2078-6255. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2016, №3. С. 82-86.

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ ОТХОДОВ В ГИБРИДНЫХ УСТАНОВКАХ

Печенкин Александр Вадимович, Филимонова Антонина Андреевна,
Чичиров Андрей Александрович, Чичирова Наталия Дмитриевна
Казанский государственный энергетический университет
pav_0910@mail.ru

Аннотация. Декарбонизация предприятий, это одна из актуальных тем в настоящее время. Снижение негативного воздействия на окружающую среду от предприятий возможно с использованием новых технологий. Все больше внимания уделяется переработке и утилизации газообразных отходов с предприятий с получением дополнительной энергии на основании новых достижений в науке, техники и технологий.

Ключевые слова: гибридная установка, газовая турбина, топливный элемент.

Abstract. Decarbanization of enterprises is one of the hot topics at the present time. Reducing the negative impact on the environment from enterprises is possible with the use of new technologies. Increasing attention is being paid to the processing and disposal of gaseous waste from enterprises with the production of additional energy based on new achievements in science, engineering and technology.

Key words: solid oxide fuel cell, gas turbine, hybrid plant, hydrogen energy

Сокращение использования ископаемых видов топлива и экологическая обстановка в мире стимулирует к разработке технологий производства энергии, которые будут экологически чистыми и высокоэффективными. Топливный элемент можно рассмотреть как одну из перспективных технологий в энергетике, благодаря низкому уровню выбросов, высокой эффективности и надежности. Работа твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) проходит при высоких температурах 700-1000°С, не нуждается в катализаторах из благородных металлов, цена является более доступной. Отходящее тепло можно эффективно использовать в качестве источников тепла для производства дополнительной электрической и тепловой энергии.

Топливом для ТОТЭ может служить уходящие газы с промышленных предприятий, которые можно утилизировать в нем. Например, с предприятий нефтехимического комплекса, где одним из ключевых этапов глубокой переработки являются процессы с использованием водорода такие как: висбрекинг, коксование, каталитический крекинг, гидрокрекинг, пиролиз, каталитический риформинг, образуют около 10 % водородсодержащих уходящих газов, которые на данный момент сжигают в факелах на предприятиях нефтехимии, но эти газообразные отходы можно утилизировать с помощью топливного элемента.

Для эффективной утилизации водородсодержащей топливной смеси используются технологии электрохимической утилизации в высокотемпературных твердооксидных топливных элементах. На принципиальной схеме (рис. 1) показано движение газообразных отходов и воздуха. На анод подается водородсодержащий уходящий газ, на катод подается воздух. В результате электрохимической реакции, происходит ионный перенос через расплавленный электролит между катодом и анодом выделяя электрическую энергию.

Катод: $\frac{1}{2}\mathrm{O_2} + 2e^- \rightarrow \mathrm{O^{2-}}$

Анод: $\mathrm{H_2} + \mathrm{O^{2-}} \rightarrow \mathrm{H_2O} + 2e^-$

Суммарная реакция: $\mathrm{H_2} + \frac{1}{2}\mathrm{O_2} \rightarrow \mathrm{H_2O} + \text{электрическая энергия} + \text{теплота}$

Рис. 1. Принципиальная схема ТОТЭ.

Работа ТОТЭ сопровождается выходом высокотемпературного газа, который можно утилизировать, подключив к дополнительным установкам. Одним из способов является соединение электрохимической работы ТОТЭ и цикла Брайтона газотурбинной установки. Соединение двух и более энергетических установок в гибридную систему позволяет получать высокий КПД из-за низких потерь рабочего тела.

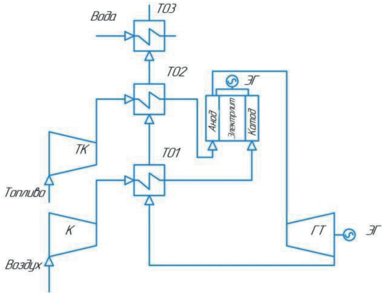


Рис. 2. Принципиальная схема гибридной установки.

На рис. 2 показана гибридная система, ТОТЭ, камера сгорания (КС) и газовая турбина (ГТ). Воздух и топливо сжимаются двумя компрессорами и нагнетаются в ТО1 и ТО2 соответственно. Газообразные отходы подаются в рекуператор (ТО2), в котором происходит превращение в богатую водородом смесь, которую можно безопасно использовать в ТОТЭ и отправляется на анод. Воздух подогревается в теплообменнике (ТО1) для подачи в топливный элемент на катод. В результате чего протекает электрохимическая реакция с получением электрической и тепловой энергии. Выходящие из анода газы, в состав которых входят горючие соединения, поступают в камеру сгорания и вступают в реакцию с выходящим из катода воздухом. В камере сгорания происходит дожигается эта топливная смесь и подается на ГТ. За счет кинетической энергии потока горячих газов, ГТ передает механическую энергию вращения на ротор электрогенератора (Э/Г). Выходная электрическая мощность системы включает в себя количество произведенной электроэнергии от топливного элемента и производственной мощности газовой турбины.

Технологии, позволяющие экологически утилизировать отходы с промышленных предприятий, способствуют снижению углеродного следа и рациональному использованию энергетических ресурсов

Список литературы:

1. Filimonova A.A., Chichirov A.A., Chichirova N.D., Filimonov A.G., Pechenkin A.V. Directions Of Hydrogen Power Development In Tatarstan Republic // E3S Web of Conferences; Les Ulis, Том 288, (2021). DOI:10.1051/e3sconf/202128801074

2. Коровин Н.В., Седлов А.С., Славнов Ю.А., Буров В.Д. Расчет коэффициента полезного действия гибридной электростанции с высокотемпературным топливным элементом, Теплоэнергетика, 2007, 2, 49-53

3. Цгоев Р.С. Применение энергоустановок на топливных элементах на теплоэлектростанциях, Теплоэнергетика, 2020, 8, 93-100

4. Осипов М.И., Гасилов А. Анализ схемных решений и оптимизация параметров комбинированных установок с высокотемпературными топливными элементами и газовыми турбинами, Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия Машиностроение, 2010, 2(79), 84-90

5. Singh R., Singh O. Comparative study of combined solid oxide fuel cell-gas turbine-Organic Rankine cycle for different working fluid in bottoming cycle, Energy Conversion and Management, 2018, 171, 659-670

ЛОТКОВЫЙ ПИРОЛИЗАТОР

Родионов Алексей Сергеевич
Казанский национальный исследовательский
технологический университет

Аннотация. В работе представлена установка для пиролиза органических веществ лоткового типа.

Ключевые слова: уголь, пиролиз, органические отходы

На рис. изображена схема реактора, в котором может быть осуществлен способ низкотемпературного пиролиза биомассы растительного и животного происхождения.

Реактор состоит из вертикального корпуса 1, имеющего в верхней части узел загрузки 2, а в нижней части - узел выгрузки 3 биомассы. В корпусе 1 реактора имеются лотки 4 и 5, на которых осуществляется процесс низкотемпературного пиролиза. Лотки имеют отверстия для выгрузки биомассы на нижний лоток (на схеме не показаны).

Лотки 4 и 5 имеют рубашки, в которые подается высокотемпературный теплоноситель, нагреваемый во внешнем источнике (на фигуре 1 не показан). Днище лотков 4 и 5 также обогревается высокотемпературным теплоносителем. Нижний лоток 6 имеет рубашку для подачи охлаждающей воды, в его боковой стенке также расположена форсунка 7 для подачи охлаждающей воды.

Биомасса растительного или животного происхождения с одного на другой лоток реактора перемещается с помощью лопастей мешалки 8, установленных на валу мешалки 9.

Выделяющиеся при пиролизе газообразные продукты удаляются из реактора по трубопроводу 10.

Установка работает следующим образом. В рубашки лотков 4 и 5 корпуса реактора 1 подается высокотемпературный теплоноситель, нагретый во внешнем источнике. После того как температура во внутреннем объеме лотков достигнет необходимой величины (230-250°С), через узел загрузки 2 в верхний лоток 4 подается порция биомассы растительного или животного происхождения. При прогреве из загруженной биомассы, непосредственно соприкасающейся с боковыми стенками и днищем лотка, выделяются газообразные продукты пиролиза, которые, поднимаясь, способствуют быстрому прогреву всего объема биомассы, загруженной в лоток. Прогрев биомассы, расположенной на лотках 4 и 5, происходит также за счет кондуктивного теплообмена частиц биомассы друг с другом, с боковыми стенками и днищем лотков [1].

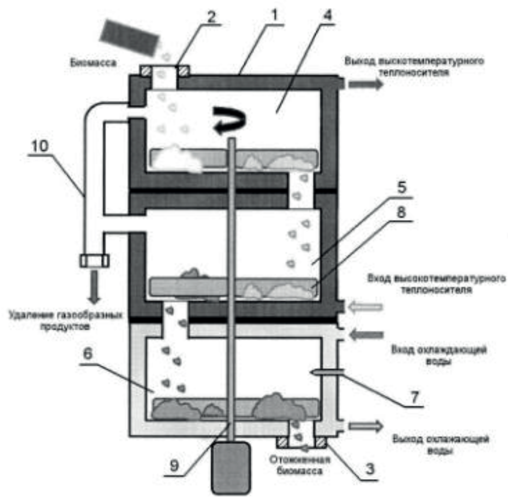


Рис1. Пиролизный реактор с лотками

После выдержки в течение 30-40 мин биомасса с лотка 4 перегружается с помощью мешалки 8 в лоток 5, а во внутренний объем лотка 4 загружается следующая порция биомассы. По истечении следующих 30-40 мин биомасса из лотка 5 выгружается в лоток 6, а во внутренний объем лотка 5 загружается биомасса из лотка 4.

Во внутренний объем лотка 6 через форсунку 7 подается охлаждающая вода. Поскольку биомасса, загруженная в лоток 6, имеет температуру 230-250°С, то эта вода испаряется, охлаждая биомассу до температуры не ниже 160°С, но не смачивая ее. После снижения температуры биомассы до 160°С подача воды через форсунки прекращается, и биомасса охлаждается до температуры 45-60°С благодаря холодной воде, подаваемой в рубашку лотка 6.

Охлажденная биомасса выгружается через узел выгрузки 3, пары воды удаляются из внутреннего объема реактора по трубопроводу 10 [2,3].

Литература

1. Патент 2644908 (РФ) C10B 53/02 (2006.01) Способ получения сорбента органических соединений / Михайлов О.Ю., Исьемин Р.Л., Кузьмин С.Н., и др.;заявлено 15.11.2016; опубл. 14.02.2018.
2. Родионов А.С. «Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы». УСТАНОВКА ПИРОЛИЗА ШАХТНОГО ТИПА. с. 7-9.
3. Родионов А.С. «Интеллектуальный потенциал общества как драйвер инновационного развития науки». КОНВЕКТИВНАЯ СУШКА ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ. с. 7-9.

К ОЦЕНКЕ ПРОЧНОСТИ И УСТОЙЧИВОСТИ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ ДЛЯ НЕФТИ И НЕФТЕПРОДУКТОВ С УЧЕТОМ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ

Сабитов М.Х.,

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Аннотация. Рассмотрены некоторые задачи, возникающие при оценке прочности и устойчивости резервуаров по результатам технической диагностики. Основное внимание уделено изменениям общей геометрии корпуса. Решение проводится с применением метода конечных элементов.

Ключевые слова: цилиндрический резервуар, прочность, устойчивость, отклонения в геометрии, метод конечных элементов.

Abstract. Some tasks related to the study of the strength and buckling of tanks based on the results of technical diagnostics are considered. The main attention is directed to changes in the geometry of the tank wall. The solution is carried out using the finite element method.

Keywords: cylindrical oil tank, strength, buckling, deviations in geometry, FEM analysis.

Цилиндрические резервуары для нефти и нефтепродуктов относятся к классу оборудования, для которого в настоящее время разработано достаточное количество нормативных документов, регламентирующих конструктивные требования, требования к монтажу, эксплуатации, ремонту. В тоже время специалистам, занятым вопросами диагностики технического состояния и обеспечения требуемого уровня надежности существующих резервуаров, приходится сталкиваться с решением ряда нетривиальных задач. Одной из таких задач является необходимость оценки степени влияния геометрических отклонений резервуара от проектной формы на его эксплуатационную надежность.

Геометрические отклонения могут быть следствием нарушений при изготовлении и монтаже, а также возникающими в ходе эксплуатации вследствие нарушения режимов эксплуатации, неравномерной осадки фундамента резервуара, воздействия ветра. Геометрические отклонения также можно разделить на общие, относящиеся ко всему корпусу резервуара, и местные, например, вмятины.

Расчетная оценка резервуара проводится на основании документации, оформляемой в ходе технической диагностики: схем контроля; протоколов измерения отклонений образующих от вертикали, измерения отклонений наружного контура днища от горизонтали, измерения толщин стенок элементов резервуара. Также изучается паспорт сосуда, заключения прежних экспертиз.

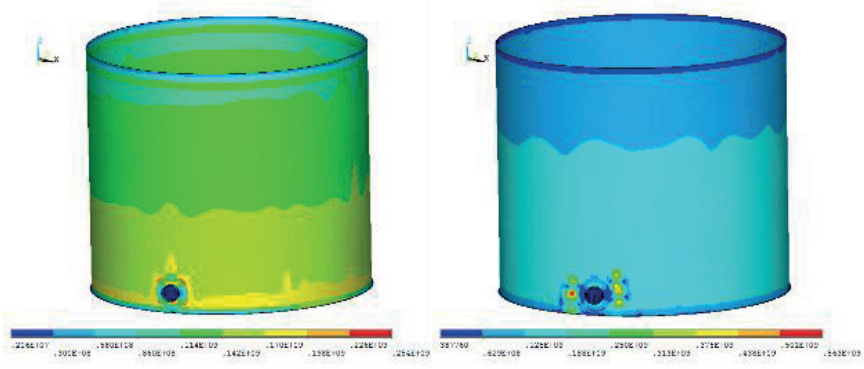
Измерения отклонений образующих стенки рекомендуется проводить на уровне середины и верха каждого пояса от вертикали, проведенной из нижней точки первого пояса. Число вертикалей, вдоль которых измеряются отклонения, обычно принимают равным числу стыков нижнего пояса, но не менее чем через каждые 6 м по периметру резервуара.

Измерения неравномерной осадки наружного контура окрайка днища проводятся путем нивелирования в тех же местах, в которых измеряется отклонение корпуса от вертикали.

Измерения рекомендуется проводить при заполненном и пустом резервуаре с целью определения мест расположения наиболее опасных деформаций. При этом обращают внимание на хлопуны и вмятины и проводят в этих местах дополнительные измерения, если дефекты не попадают на линию измерений. Допустимые значения геометрических отклонений приведены в [1].

Результаты измерений являются исходной информацией для построения трехмерной конечно-элементной модели корпуса резервуара с днищем. Для этих целей разработан программный алгоритм, состоящий из отдельных этапов (программных блоков). На первом этапе моделируется корпус резервуара с общими геометрическими отклонениями, второй этап – моделируется днище. На третьем этапе в модель включаются патрубки и горловины штуцеров, на четвертом этапе моделируются местные геометрические отклонения (вмятины и выпучины). Блочная структура позволяет вносить в программу локальные изменения, оценить степень влияния отдельных конструктивных элементов и дефектов на прочность и устойчивость резервуара.

На рис. 1 в качестве примера приведен результат расчета напряжений корпуса резервуара РВС-400 с учетом концентрации напряжений в области люка-лаза без вмятин (а) и с учетом локальных вмятин (б).



а б

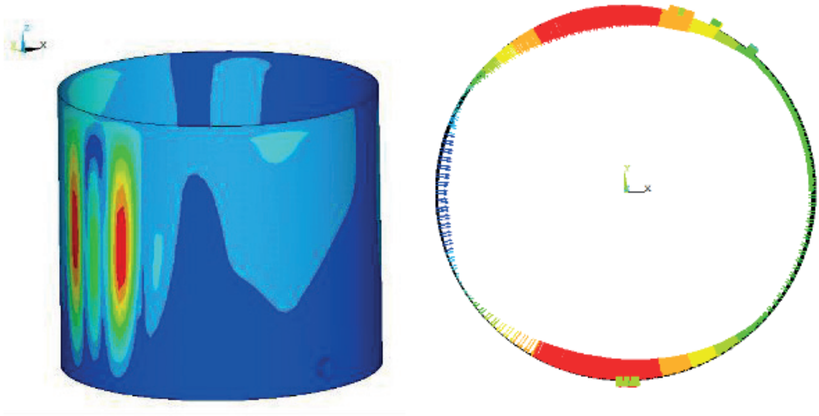
Рис. 1. Расчетные эквивалентные напряжения корпуса резервуара

Решение о допустимости локальных вмятин в этом случае принимается с использованием критериев прочности для местных напряжений. В связи с возможностью малоциклового нагружения в зонах концентрации, максимальные эквивалентные напряжения не должны превышать величины $\left(2{,}5-R^{t}_{p0,2}/R^{t}_{m}\right)R^{t}_{p0,2}$, но не более $2R^{t}_{p0,2}$, где $R^{t}_{p0,2}=235$ МПа – расчетное сопротивление материала стенки резервуара по пределу текучести; $R^{t}_{m}=363$ МПа – временное сопротивление материала стенки резервуара. Таким образом, напряжения не должны превышать значения $1{,}85R^{t}_{p0,2}=435$ МПа. Для рассматриваемого резервуара вмятины глубиной более 9 мм вызывают недопустимые напряжения в стенке и резервуар требует ремонта.

На рис. 2, а приведен результат расчета на устойчивость стенки резервуара РВС-400. Показана форма потери устойчивости стенки с отклонениями формы, возникающая при внешнем ветровом давлении, превышающем нормативную величину w_0=300 Па в 14,6 раза. При этом схема расчета на устойчивость отличается от принятой в стандартной методике.

Стандартная методика расчета резервуаров базируется на использовании формул, полученных для цилиндров, нагружаемых всесторонним равномерным внешним давлением, с минимальными отклонениями в геометрии, и формул для цилиндров, нагружаемых осевым сжимающим усилием [2]. Использование стандартной методики к модели, учитывающей общие и локальные отклонения в геометрии, как правило приводит к отрицательным результатам.

При разработке модели учтены экспериментальные результаты [3], согласно которым ветровой поток создает на цилиндрической поверхности резервуара неравномерный профиль давления с узкой зоной внешнего давления (область примерно в 30^0 со стороны воздействия ветрового потока (в направлении оси OX на рис. 2). В остальной части сечения резервуара и со стороны крыши ветровой поток создает разряжение снаружи стенки, что эквивалентно действию в этих зонах избыточного давления внутри корпуса и крыши.



а б

Рис.2. К расчету корпуса резервуара на устойчивость

Критическая нагрузка в модели определяется проведением упруго-пластического расчета по аналогии с работой [4]. Расчет проводится методом конечных элементов по оболочечной схеме. Граничные условия на торцах цилиндрического корпуса задаются в виде шарнирного закрепления с возможностью осевого смещения в верхнем сечении резервуара. Вес крыши, дополнительного оборудования и снеговая нагрузка прикладываются в виде распределенной нагрузки в верхнем торцевом сечении корпуса. Диаграмма деформирования стали задается моделью идеального упруго-пластичного материала.

Для более детальной оценки устойчивости очевидно может потребоваться расчет вариантов воздействия ветра с разных сторон резервуара, анализ возможности изменения профиля ветрового воздействия из-за влияния застройки и близко стоящих аппаратов.

Список литературы

1. Руководство по безопасности «Рекомендации по техническому диагностированию сварных вертикальных цилиндрических резервуаров для нефти и нефтепродуктов», утв. Приказом Ростехнадзора от 31.03.2016 г. №136.

2. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем / А.С. Вольмир. – М.: Наука, 1967. – 984 с.

3. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* – М.: Стандартинформ, 2018. – 95 с.

4. Сабитов М.Х. Устойчивость цилиндрических обечаек с общей некруглостью поперечного сечения // X национальная научно-практическая конференция с международным участием «Моделирование энергоинформационных процессов». – Воронеж, 2022. – с.139 – 147.

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБЕЧАЕК С УВОДОМ КРОМОК ПРОДОЛЬНОГО СВАРНОГО ШВА

Сабитов М.Х.,
ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Аннотация. Рассматривается задача определения критической внешней нагрузки тонкостенной цилиндрической обечайки с уводом кромок продольного сварного шва в пределах допустимых нормативных значений. Задача решается с применением метода конечных элементов в нелинейной постановке. Проводится анализ в сравнении с известным решением Мизеса с учетом некоторых опубликованных экспериментальных данных.

Ключевые слова: тонкостенная цилиндрическая обечайка, устойчивость, наружное давление, увод кромок, нелинейный расчет.

Abstract. The problem of determining the critical external load of a thin-walled cylindrical shell with the removal of the edges of the longitudinal weld within the permissible standard values is considered. The problem is solved using the finite element method in a nonlinear formulation. The analysis is carried out in comparison with the known solution of Mises, taking into account some published experimental data.

Keywords: thin cylindrical vessel, buckling, external pressure, non-circular cross section, edge removal, nonlinear FEM analysis.

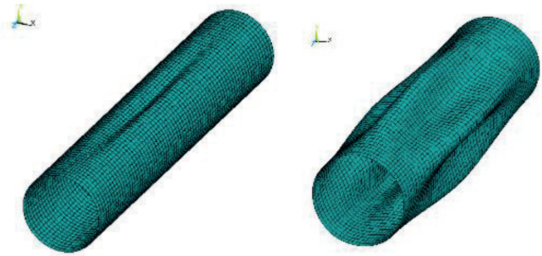
Устойчивость формы оболочковых конструкций, испытывающих действие внешних сжимающих нагрузок, является основным условием их безопасной эксплуатации наряду с прочностью. К такому типу конструкций относятся большая часть корпусов сосудов и аппаратов, используемых в химической, нефтегазоперерабатывающей отраслях промышленности.

В приведенной работе рассматриваются гладкие цилиндрические обечайки аппаратов, испытывающие действие равномерного наружного давления. Так как в аппаратах наружное давление действует также на торцевые крышки, то возникает дополнительное осевое сжимающее усилие на обечайку. Таким образом, расчетный анализ в наиболее простом случае проводится для двухпараметрического пропорционального нагружения.

Существующая технология изготовления сварных цилиндрических обечаек предполагает применение холодной либо горячей вальцовки плоских листов с последующей стыковой сваркой кромок полученной заготовки. Вальцовка не всегда обеспечивает идеальный профиль по всей окружности и обечайка может иметь прямые кромки в месте стыковки, характеризуемые параметром угловатости f. Чтобы исключить угловатость, кромки листа либо предварительно подгибают перед вальцовкой, либо производится калибровка обечайки после сварки. Кроме того, отклонение профиля обечайки может быть вызвано уводом кромок уже в процессе сварки. Допустимые значения увода (угловатости) f кромок устанавливаются стандартом [1] и не должны превышать 0,1s+3 мм, но не более 5 мм для цилиндрических обечаек любого диаметра.

В опубликованной ранее статье [2] была предложена модель оценки устойчивости цилиндрических обечаек с общей некруглостью поперечного сечения. Анализ базируется на принятии начальной геометрии цилиндрической обечайки с включением в поперечное сечение некоторого количества n исходных волн. Число волн n = 2 соответствует форме потере устойчивости длинной цилиндрической обечайки (сплющивание), n > 2 – формы потери устойчивости коротких обечаек. Расчетный анализ при этом аналогичен поиску предельной нагрузки по известному решению Мизеса [3] последовательным приближением. То число n, при котором критическая нагрузка, вычисленная методом конечных элементов, будет наименьшей и является искомым значением.

Очевидно аналогичный подход применим и в случае увода кромок продольного сварного шва, с той лишь разницей, что в расчетная модель будет содержать одну волну (n = 1) с периодом равным зоне дефекта (рис.1, а).



а б

Рис. 1. Расчетная модель: а – цилиндрическая обечайка с внутренним уводом кромок (n = 1), б – модель работы [2] (n = 5)

Расчет проводится методом конечных элементов по оболочечной схеме. Граничные условия на торцах модели задаются в виде шарнирного закрепления с возможностью осевого смещения с одного торца. Диаграмма деформирования стали задается моделью идеального упруго-пластичного материала, что позволяет в первом приближении исключить фактор упрочнения материала и ожидать результат с погрешностью в запас устойчивости.

В ходе пошагового увеличения нагрузки численного решения происходит смещение точек срединной поверхности обечайки и увеличивается внешняя работа. Смещения точек срединной поверхности вызывают увеличение деформаций и напряжений в теле и, следовательно, внутренней энергии деформации. В определенный момент условие равенства работы внешних сил и внутренней энергии тела нарушается. Значение внешней нагрузки, при которой наступает этот момент, принимается за значение критической нагрузки.

Результаты решения для двух значений s/D = 0,005 и 0,01 (сплошные кривые 1, 2) представлены на рис. 2. Пунктирные кривые с одним штрихом в обозначении – решение Мизеса. Для сравнения на рис. 2 показано также решение работы [2] с двумя штрихами в обозначении – случай общей некруглости поперечного сечения обечайки по допускаемому значению овальности a = 0,5% согласно [1].

Параметр $\Theta = \frac{p_{\text{cr}}}{p_0}$, где p_{cr} – критическое наружное давление; $p_0 = \frac{2\sigma_T s}{(D+s)}$ – предельная нагрузка цилиндра из условия прочности; σ_T – предел текучести стали; D – внутренний диаметр обечайки; s – толщина стенки.

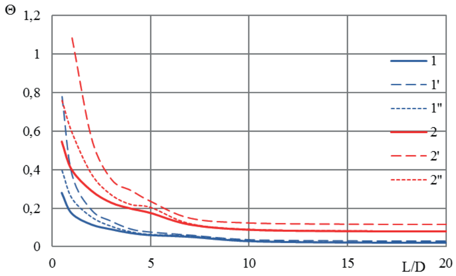


Рис. 2. Результаты решения для цилиндрической обечайки, нагруженной наружным давлением

Сравнение показывает более существенное снижение критической нагрузки цилиндрической обечайки с допустимым значением угловатости f=0,1s+3 по сравнению с обечайкой, имеющей общую некруглость a = 0,5%. Такая разница наблюдается для обечаек с соотношением L/D < 7. Если формально рассматривать угловатость f как прибавку к диаметру обечайки, то соответствующий ей параметр $a = \frac{2(D+f-D)}{D+f+D} \cdot 100 = \frac{2f}{2D+f} \cdot 100\%$. В нашем случае параметр a составил 1,04 и 1,09% для значений s/D = 0,005 и 0,01 соответственно. Таким образом, для обечаек ответственных сосудов максимально допустимое значение f=0,1s+3 согласно [1] должно быть очевидно снижено как минимум вдвое.

Также следует отметить, что решение Мизеса [2] получено для идеальной цилиндрической оболочки без искажения формы. Ступенька на расчетных кривых в области отношения L/D ≈ 5 характеризует границу между «короткими» и «длинными» обечайками, когда при потере устойчивости образуется более двух волн (n > 2).

Предложенная модель вполне применима для определения критического наружного давления цилиндрических обечаек, имеющих как внутренний, так и наружный увод кромок продольного сварного шва. При этом увод кромок без особых затруднений может быть смоделирован как для отдельного участка шва (рассмотренный выше случай), так и по всей длине шва.

Список литературы

1. ГОСТ 34347-2017. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2018. – 103 с.

2. Сабитов М.Х. Устойчивость цилиндрических обечаек с общей некруглостью поперечного сечения // X национальная научно-практическая конференция с международным участием «Моделирование энергоинформационных процессов». – Воронеж, 2022. – с.139 – 147.

3. von Mises, R. Der Kritische Aussendruck für Allseits Belastete Zylindrische Rohre, Fest zum 70, Geburtstag von Prof. Dr. A. Stodola, Zurich, pp.418-430, 1929.

КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОЛИТРОПЫ СЖАТИЯ РОТОРНЫХ КОМПРЕССОРОВ

Сайфетдинов Алмаз Габдулнурович
Шарапов Ирек Ильясович
Куликов Антон Сергеевич

ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Аннотация. В работе определяются величины политропы сжатия роторных компрессоров с внешним и внутренним сжатиями на основе экспериментальных данных по измерению температур и давлений в рабочих полостях машин.

Abstract. In this work the values of the compression polytropic of rotary compressors with external and internal compression are determined on the basis of experimental data on the measurement of temperatures and pressures in the working cavities of machines.

Ключевые слова. Роторный компрессор, сжатие, температура, давление, политропа сжатия.

Линия сжатия теоретического цикла работы компрессора представляет собой адиабату с переменным показателем. В действительности же процесс сжатия протекает сложнее. Ему характерны меняющаяся температура газа и наличие теплообмена между компримируемой средой и внутренними стенками, т. е. этот процесс является политропным.

В практике инженерных расчетов компрессоров следует применять мгновенные значения показателя политропы n, но для их использования необходимо наличие опытных данных по термометрированию и индицированию рабочих полостей машин. До настоящего времени в расчетах роторных компрессоров [1, 2] использовалось среднее значение коэффициента n. Это было связано с отсутствием данных по значениям температур в рабочей камере. На основании работ, посвященных экспериментальному исследованию теплообмена между газом и стенками роторных компрессоров внешнего и внутреннего сжатий [3, 4], имеется возможность рассчитать моментальные значения показателя политропы для этих машин.

Величину n можно вычислить на основании уравнения политропы идеального газа:

$$p \cdot v^{n} = \mathrm{const}, \tag{1}$$

где p – давление, v – объем газа.

Уравнение (1) запишем в виде:

$$p \cdot v^{n} = (p + dp) \cdot (v + dv)^{n}. \tag{2}$$

С учетом уравнения состояния идеального газа $p \cdot v = R \cdot T$ выражение (2) примет вид:

$$p\left(\frac{RT}{p}\right)^{n} = (p + dp) \cdot \left(\frac{RT}{p} + \frac{RpdT - RTdP}{p^{2}}\right)^{n}, \tag{3}$$

где R – универсальная газовая постоянная, T – температура.

Из уравнения (3) получаем формулу для определения мгновенных значений показателя политропы сжатия:

$$n = \ln\left(1 + \frac{dp}{p}\right) \Bigg/ \ln\left(\frac{T}{T + \dfrac{pdT - TdP}{p}}\right). \tag{4}$$

При расчетах по формуле (4) бесконечно малые приращения dP и dT заменялись конечноразностными приращениями, соответствующими углу поворота ротора 1°.

В работе [3] исследовался теплообмен и проведено индицирование в рабочей полости роторного компрессора с внутренним сжатием (РКВнС), рабочее тело - воздух. На рис. 1 приведены полученные величины температуры газа $t_г$ (1) и давления $P_г$ (2) в камере в зависимости от угла поворота ротора $\varphi_{рот}$ при частоте вращения ротора n = 2000 об/мин и отношении давлений П = 1,4.

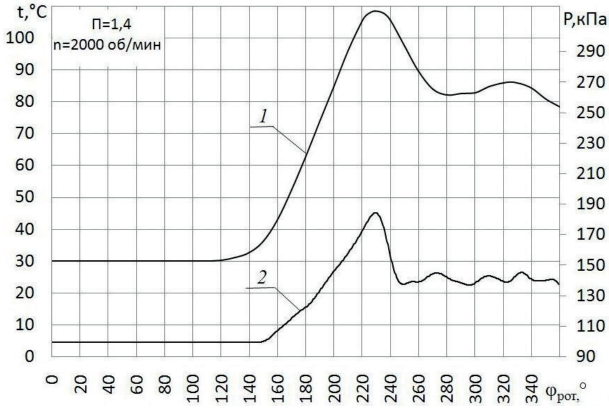


Рис. 1. Графики зависимостей $t_г = f(\varphi_{рот})$ и $P_г = f(\varphi_{рот})$

На основании этих экспериментальных данных по формуле (4) рассчитываем мгновенные величины показателя политропы сжатия n для воздуха.

Результаты вычислений значений n для РКВнС при различных параметрах его работы в зависимости от угловых координат процесса сжатия ($171° \le \varphi_{рот} \le 229°$) представлены на рис. 2.

На основе полученного массива данных проводим аппроксимирующую кривую, которую для режимов работы с П = 1,4÷1,8 и n = 2000÷3500 об/мин можно описать уравнением вида

$$n = 0,0002 \cdot \varphi_{рот}^2 - 0,118 \cdot \varphi_{рот} + 15,55 \quad (5)$$

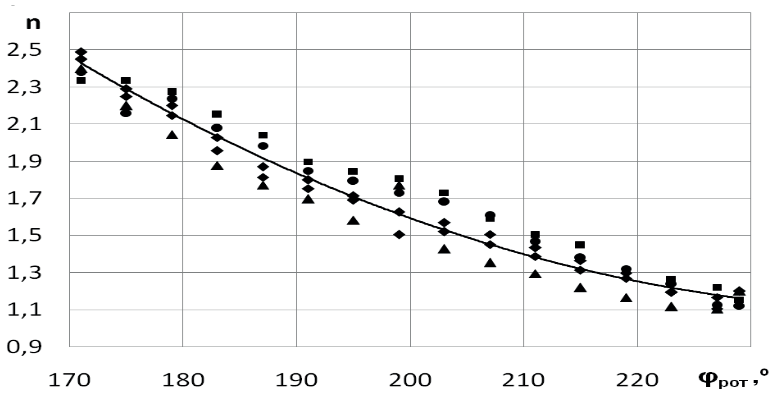


Рис.2. График зависимости $n = f(\varphi_{рот})$

Проанализируем полученные величины политропы сжатия. Видно, что в начале процесса сжатия ($\varphi_{рот} = 171°$) величина n имеет максимальное значение, равное приблизительно 2,5. Это можно объяснить следующим образом. В этот момент средняя температура газа в рабочей камере РКВнС меньше, чем средняя температура внутренних стенок из-за того, что стенки ещё не успевают остыть после нагрева в период сжатия в предыдущем цикле. То есть сжатие происходит с подводом теплоты от стенок рабочей полости. Поэтому показатель политропы и имеет большее значение, чем показатель адиабаты. При дальнейшем сжатии газа температура его увеличивается, разность температур газа и стенок уменьшается, падает интенсивность подвода теплоты к сжимаемой среде, что приводит к уменьшению показателя политропы. В момент равенства средних температур газа и стенок теплообмен между ними прекращается. Далее в процессе сжатия температура воздуха в камере продолжает расти, при этом температура стенок из-за их тепловой инерции будет меньше температуры газа. Таким образом, сжатие происходит с отводом теплоты, т.е. характеризуется показателем политропы, значение которого меньше величины показателя адиабаты. Это и объясняет изменение мгновенных значений показателя политропы сжатия в РКВнС от $n > k$ в начале процесса сжатия до $n < k$ в конце процесса.

Шестеренчатый компрессор внешнего сжатия (ШКВС) имеет рабочий процесс, который существенно отличается от процесса РКВнС. Сам период сжатия газа занимает незначительную долю всего рабочего цикла (около 10 градусов по углу поворота ротора) и представляет собой соединение переносимой рабочей полости низкого давления со стороной нагнетания [1], в результате чего происходит резкое натекание газа с высоким давлением и температурой в рабочую камеру компрессора и рост в ней давления до параметров нагнетания. Расчеты по уравнению (4) для ШКВС показали, что для диапазона режимов работы n = 1800÷3000 об/мин и П = 1,2÷2,0 с достаточной точностью можно принять значение n =1,4.

Заключение. Полученные данные для показателей политропы представляется возможным использовать для предварительного построения действительной индикаторной диаграммы при проектировании компрессоров со схожими характерами протекания рабочих процессов.

Литература

1. *Ибраев, А. М.* Повышение эффективности работы роторных нагнетателей внешнего сжатия на основе анализа влияния геометрических параметров на их характеристики: дис. канд. техн. наук. Казан. химико-технол. ин-т им. С. М. Кирова, 1987.

2. *Хамидуллин, М.С.* Разработка и исследование роторного компрессора внутреннего сжатия на основе геометрического анализа и моделирования процессов в рабочих камерах: дис. … канд. техн. наук / М.С. Хамидуллин. – Казань: Изд-во Казан. химико-технол. ин-та им. С.М. Кирова., 1992.–193 с.

3. *Сайфетдинов, А.Г.* Результаты термометрирования рабочей полости роторного компрессора внутреннего сжатия / А.Г. Сайфетдинов, М.С. Хамидуллин, И.Г. Хисамеев // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2012. - №12. – С. 159-160.

4. Сайфетдинов А.Г., Шарапов И.И. и др. Исследование теплообмена между газом и стенками рабочей полости роторных компрессоров / Материалы Х Международной научно-технической конференции «Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы – 2019» (МНТК «ИМТОМ–2019»). Ч. 1. – Казань, 2019. С. 441-445.

ОЧИСТКА УСТЬЯ НЕФТЯНЫХ СКВАЖИН ОТ АСПО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ФЛЮИДНЫХ СРЕД

Салихов Ильфат Зилбирович – аспирант кафедры ТОТ, lfat@tnhi.ru
Хабриев Ильнар Шамилевич[1] – ассистент кафедры ТОТ, termi0@yandex.ru
Хайрутдинов Венер Фаилевич[1] – профессор кафедры ТОТ, kvener@yandex.ru
Гумеров Фарид Мухамедович[1] – заведующий кафедрой ТОТ, gum@kstu.ru
Яруллин Ленар Юлдашевич[1]–ассистент кафедры ТОТ, yarul.lenar@gmail.com

[1]ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», Казань, Россия

Аннотация: Представлены данные по кинетике экстракционных процессов выделения углеводородов из асфальтосмолопарафиновых отложений. Установлены реализуемость и предпочтительность использования СКФ экстракционного процесса (в противовес жидкостному) применительно к процессу очистки устья нефтяных скважин от асфальтосмолопарафиновых отложений.

Abstract: Data on the kinetics of extraction processes for the release of hydrocarbons from asphalt, resin and paraffin deposits are presented. The feasibility and preference of using the SCF extraction process (as opposed to the liquid one) in relation to the process of cleaning the mouth of oil wells from asphalt, resin and paraffin deposits have been established.

Ключевые слова: сверхкритический флюид, АСПО, фазовое равновесие, парафины.

Key words: supercritical fluid, ARPD, phase equilibrium, paraffins.

При добыче парафинистых нефтей, образование асфальтосмолопарафиновых отложений (АСПО) является серьезной проблемой, вызывающей снижение производительности системы и эффективности работы насосных установок. АСПО представляют собой сложную углеводородную смесь: асфальтены, смолы, парафины, масла, серу, металлы, растворы солей органических кислот, комплексные соединения, коллоидно-диспергированные минеральные вещества, а также воду и механические примеси [1].

В настоящей работе предлагается альтернативный способ очистки скважин от АСПО, основанный на использовании сверхкритического флюидного (СКФ) экстракционного процесса.

Наиболее предпочтительными растворителями (экстрагентами) для нефтяной и нефтехимической промышленности являются пропан, бутан и их смеси [2]. Пропан и бутан являются «родственными» углеводородами с нефтью. Критические параметры пропана и бутана согласно [3] характеризуются следующими значениями: пропан: $T_{кр}$=369,82 К (96.67^{o}С), $P_{кр}$=4,247 МПа; бутан $T_{кр}$ =425К (151.85^{o}С), $P_{кр}$ =3,797 МПа.

Повышение эффективности экстракционного процесса [4] в части достижения максимального выхода углеводородов и очистки устья нефтяных скважин от асфальтосмолопарафиновых отложений в значительной степени зависит и определяется изученностью характеристик фазового равновесия систем «извлекаемая компонента (парафин) - экстрагент».

Как следствие, существует насущная потребность в исследовании часто отсутствующих данных по фазовым равновесиям бинарных систем, включающих основные компоненты АСПО и потенциальные рабочие среды процесса СКФ экстракции тех же компонентов. Именно этот вопрос и явился основным предметом в термодинамической части настоящего исследования.

Экспериментальная часть

Образец АСПО были взят на Оренбургском нефтяном месторождении. Некоторые свойства АСПО: содержание парафинов составляет 33,7%; асфальтенов – 3,9%; смол – 30,55%, механических примесей – 3,1 %, серы – 3,2% масс.

Использованная пропан - бутановая смесь, имеет массовый состав: 45,8 % пропана и 54,2% бутана. Критические параметры данной смеси: Ткр=394,25К (121,1^{o}С), Ркр=4,3 МПа.

Индивидуальные компоненты АСПО представлены гексадеканом и серой.

Чистота образцов - 99 %.

Подробное описание экспериментальной установки и методики проведения исследования фазового равновесия «жидкость-пар» бинарных систем с использованием оптической ячейки высокого давления приведено в работе [5].

Описание экспериментальной установки и методики проведения СКФ экстракционного процесса приведено в работе [3].

Результаты и их обсуждение

Повышение эффективности экстракционного процесса в части достижения максимальной степени обессеривания продукта в значительной степени зависит и определяется изученностью характеристик фазового равновесия системы «сера- пропан/бутан». Выбрав гексадекан, изменение содержания которого в АСПО будет определять эффективность процесса очистки АСПО, приходим к перечню систем, которые явились предметом исследования характеристик фазового равновесия в настоящей работе.

В работе выбран углеводород гексадекан относящийся к классу парафинов.

Согласно литературным данным [6] по растворимости гексадекана в сверхкритическом диоксиде углерода при температуре 333,15К критическое давление бинарной системы составляет около 18,5 МПа [6]. Такое фазовое поведение объясняется слабой взаимной растворимостью диоксида углерода и гексадекана.

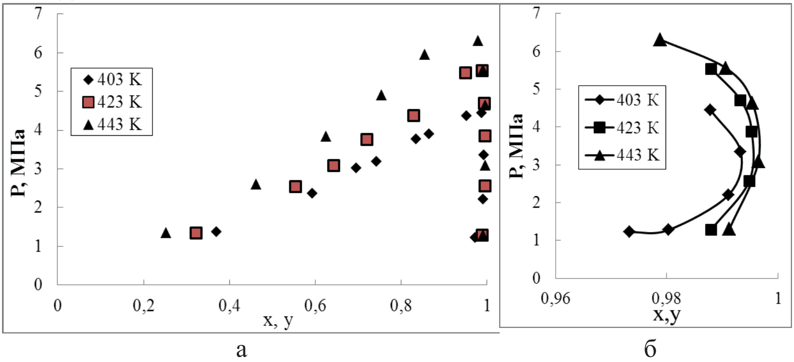


Рис. 1. Фазовое равновесие системы «гексадекан - пропан/бутан» (а) и газовая фаза (б).

Результаты исследования в рамках настоящей работы представлены на рисунке 1. Установлено, что фазовая диаграмма системы «гексадекан – пропан/бутан» принадлежат к фазовому поведению I типа (по классификации D.F.Williams). Характеристики фазового равновесия «жидкость – пар» для данных систем по факту представлены лишь бинодалями, в итоге формирующими некую непрерывную критическую кривую.

Также, а предыдущей нашей работе [7] было проведено исследование фазового равновесия системы «нафталин – пропан/бутан» и установлено, что замена диоксида углерода на пропан/бутановую смесь приводит к желаемой смене типа фазового поведения с V-VI на I-II. Как следствие, напрашивается вывод о том, что эффективность экстракционного процесса извлечения углеводородов из АСПО с использованием в качестве экстрагента сверхкритической пропан/бутановой смеси должна быть существенно более высокой, нежели в случае реализации СК-CO_2 экстракционного процесса.

На рисунке 2 представлена кинетика СКФ экстракционных процессов, реализованных в рамках решения задачи очистки скважин от АСПО. Для корректности сопоставления возможностей диоксида углерода и пропан/бутановой смеси, использованных в качестве экстрагентов в СКФ состоянии, приняты единые условия осуществления экстракционных процессов, выраженные в одинаковых значениях приведенных параметров ($\pi=P/P_к=2,3$; $\tau=T/T_к=1,12$) согласно закона соответственных состояний.

Из результатов исследования (рис. 2) видно, что эффективность СКФ экстракционного процесса с пропан/бутановым экстрагентом превосходит возможности жидкого органического растворителя гексана в 3 раза, жидкостной экстракции с пропан/бутановым экстрагентом (P=4 МПа и T=100ºC) в 2 раза и СК-CO_2 экстракционного процесса в 9 раз, что убедительно подтверждает предпосылки, изложенные выше.

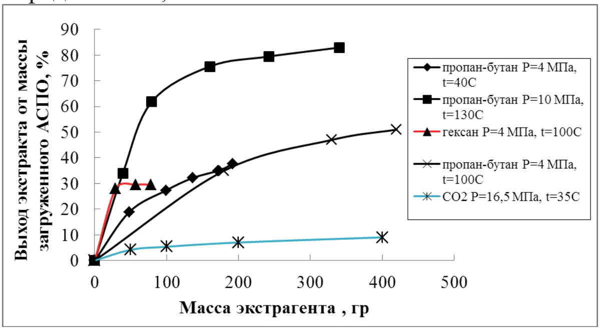


Рис. 2. Кинетика процесса СКФ экстракционного извлечения углеводородов из АСПО с использованием различных экстрагентов.

Сверхкритический флюид, растворяя углеводородную часть АСПО (парафины, смолы и др.), удаляет их из АСПО. После обработки СКФ экстргентом изменилась структура отложений. Не растворившиеся части (асфальтены, механические примеси и сера) асфальтосмолопарафиновых отложений после обработки пропан-бутаном представляют рыхлый порошок, который легко удаляется продувкой. Воздействие гексана на образец АСПО практически не изменило его структуру.

Таким образом, растворение АСПО отложений СК пропан-бутановой смесью показало свою эффективность, а в совокупности с конкурентными преимуществами использования данной смеси для очистки оборудования от АСПО, может явиться основой создания энерго-ресурсосберегающих технологий для нефтедобывающих производств.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10129, https://rscf.ru/project/22-79-10129/.

Список литературы

1. Иванова Л.В. , Буров Е.А., Кошелев В.Н. Нефтегазовое дело. 2011. №1. С. 268.
2. Гумеров Ф.М., Фарахов М.И., Хайрутдинов В.Ф., Габитов Р.Ф., Зарипов З.И., Хабриев И.Ш., Ахметзянов Т.Р. СКФ-ТП 2015. Т.10. №2. С. 4.
3. Kay W.B. J. of Chem. Eng. Data. 1970. Vol. 15. No. 1. P. 41.

4. Гумеров Ф.М., Хайрутдинов В.Ф., Зарипов З.И. Теорет. основы хим. технологии. 2021. Т. 55. № 3. С. 273.

5. Khairutdinov V.F., Gumerov F.M., Gabitov F.R., Zaripov Z.I., Khabriev I.Sh., Akhmetzyanov T.R., Abdulagatov I.M. J. Chem. Eng. Data.2020. Vol. 65. P.3306.

6. King M. B. Kassim K., Bot T.R., Sheldon J. R., Mahmud R.S. Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 1984. V. 88. P. 812.

7. Khairutdinov V.F., Gumerov F.M., Zaripov Z.I., Khabriyev I.S., Yarullin L.Yu, Abdulagatov I.M. J. Supercritical Fluids. 2020. Vol. 156. P. 1.

РАЗРАБОТКА МНОГОСЛОЙНОГО ДРЕВЕСНО-ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА С ВЫСОКИМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ

Сафин Рушан Гареевич, д.т.н., профессор, зав. каф. ПДМ
Фахрутдинов Руслан Рафаилович, аспирант
Гареев Марат Галиевич, аспирант

ФГБОУ ВО «КНИТУ»

Аннотация. Отрасль строительных материалов в настоящее время взяла курс в направлении создания новых эффективных теплоизоляционных материалов, что обусловлено нынешней стратегией энергосбережения в условиях повышения цен на энергетические ресурсы. В данной работе рассматривается получение древесно-полимерного композиционного материала. Древесно-полимерный композит сочетает в себе свойства древесной муки и полимера, обладает стабильностью размеров и динамической прочностью.

Abstract. The industry of mineral materials has now set a course for the creation of new effective heat-insulating materials, which proceeds from the strategic energy saving in terms of labor costs for energy resources. In this work, the transformation of a wood-polymer composite material takes place. Wood-polymer composite combines the properties of wood flour and polymer, has dimensional stability and dynamic strength.

Ключевые слова: теплоизоляция, кора, полиэтилен, пенополиуретан, теплоизоляционная панель.

В современных реалиях существенной проблемой большинства теплоизоляционных материалов является увеличение твердости, улучшение износостойкости, а также повышение предела прочности при сжатии при сохранении теплоизоляционных свойств.

На кафедре ПДМ разработан слоистый древесно-полимерный композиционный материал (ДПКМ), содержащий поверхностные слои на основе термомодифицированной древесины и термопластичного полимера в качестве наполнителя, а внутренний слой из пенополиуретана и древесных частиц в качестве связующей матрицы. Предложена технология производства разработанного материала. На сегодняшний день получен в лабораторных условиях слоистый ДПКМ и проведены исследования его эксплуатационных характеристик.

Теплоизоляционная панель состоит из поверхностных слоев, сформированные экструзией из состава, содержащего термопластичный полимер в виде полиэтилена или полипропилена и древесные частицы, а пространство между поверхностными слоями заполнено жёстким заливочным пенополиуретаном, согласно изобретению в качестве древесных частиц поверхностные слои содержат частицы размером от 0,16 до 0,75 мм термомодифицированной древесной коры, при следующем соотношение компонентов, мас.%:

полиэтилен или полипропилен	20-30
частицы термомодифицированной древесной коры	70-80,

а пространство между поверхностными слоями заполнено жёстким заливочным пенополиуретаном с древесными частицами размером 1-15 мм, при следующем соотношении компонентов, мас.%:

указанный пенополиуретан	25-35
древесные частицы 1-15 мм	65-75,

и подвергнуто прессованию.

Разработанный материал позволяет увеличить твердость, износостойкость, предел прочности при сжатии теплоизоляционной панели в среднем в 1,4 раза при сохранении низкого коэффициента теплопроводности, равной 0,05 Вт/м•К.

Для формирования поверхностных слоев используют древесные частицы размером 0,16 - 0,75 мм, полученные из термомодифицированной древесной коры, которые получают измельчением кусковых отходов коры и термомодификацией полученной щепы в 3 стадии.

На первой стадии измельчают отходы на роторном измельчителе, после чего полученную щепу термомодифицируют в камере термомодификации в течение 2,5 часов и при температуре не более 230°С, а затем измельчают до размера частиц в пределах 0,16 - 0,75 мм.

Поверхностные слои теплоизоляционные панели выполнены из термопластичного полимера полиэтилена низкого давления марки ПЭ2НТ22-12 или полиэтилена высокого давления марки ПЭ2НТ15-5, или полипропилена марки FO130A.

Пространство между поверхностными слоями состоит из жесткого заливочного пенополиуретана, полученного из полиола марки ЛапС 48-40 с изоцианатом марки WANNATE PM-200, и древесных частиц, полученных на роторном измельчителе.

На Рис.1 приведено схематическое изображение теплоизоляционной панели.

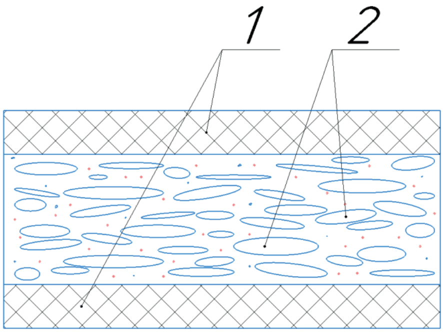


Рис. 1. Теплоизоляционная панель:
1 – поверхностные слои теплоизоляционной панели, сформированные экструзией из состава, содержащего термопластичный полимер в виде полиэтилена или полипропилена, и частицы размером 0,16-0,75 мм термомодифицированной древесной коры;
2 – пространство между поверхностными слоями теплоизоляционной панели заполнено составом из пенополиуретана и древесных частиц размером 1–15 мм.

Выводы. Совокупность признаков разработанного материала по сравнению с аналогами позволяет увеличить твердость, износостойкость и предел прочности на сжатие в среднем в 1,4 раза. Использование при формировании теплоизоляционной панели частиц термомодифицированной коры и древесных частиц на основе древесных отходов позволяет снизить её себестоимость, к тому же уменьшаются энергозатраты в процессе измельчения термомодифицированной коры.

Угрюмов С.А., Осетров А.В. Экологически чистые композиционные материалы конструкционного назначения на основе отходов деревообработки // Вестник КГТУ: рецензируемый периодический научный журнал. - Кострома: КГТУ, 2011 - №1(26). -с. 48-51

Список литературы

1. Горшкова, Т.А. Современные строительные материалы на основе древесных отходов / Т.А. Горшкова, С.М. Шевченко, И.П. Феоктистов // Вестник Мининского университета. - 2014. - Т. 13. №25. - С. 102-121.

2. З.Г. Саттарова, Д.Ф. Зиатдинова, Д.А. Ахметова, Р.Р. Фахрутдинов, Л.И. Булгар. Современное состояние технологий производства древесно-полимерных теплоизоляционных материалов // Журнал деревообрабатывающая промышленность. -2020. – С. 62 – 72.

3. З.Г. Саттарова, Р.Г. Сафин, Р.Р. Фахрутдинов, Е.И. Юайгильдеева. Современное состояние технологий производства древесно-полимерных теплоизоляционных материалов // Журнал деревообрабатывающая промышленность. – 2020. – С. 46 - 54.

4. Сафин, Р.Г. Современные строительные материалы на основе древесных отходов / Р.Г. Сафин, В.В. Степанов, Э.Р. Хайруллина, А.А. Гайнуллина, Т.О. Степанова // Вестник Казанского технологического университета. - 2014. - Т. 17. №20. - С. 122-127.

5. Сафин Р.Г., Исхаков Т.Д., Гайнуллин А.А., Степанова Т.О., Хабибуллина А.Р. Разработка композиционных материалов на основе древесных отходов // Деревообрабатывающая промышленность. – 2014, – В.4. – С.32-37.

6. Угрюмов С.А., Осетров А.В. Экологически чистые композиционные материалы конструкционного назначения на основе отходов деревообработки // Вестник КГТУ: рецензируемый периодический научный журнал. - Кострома: КГТУ, 2011 - №1(26). -с. 48-51

7. Шкуро, А.Е. Наполнители аграрного происхождения для древесно-полимерных композитов (ОБЗОР). / А. Е. Шкуро, В. В. Глухих, П. С. Кривоногов, О. В. Стоянов // Журнал Вестник Казанского технологического университета. - 2014. - Т. 1. №13. - С. 160-164.

УСТАНОВКА ПЕРЕРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНЫХ ОТХОДОВ

Сафин Рушан Гареевич, д.т.н., профессор, зав. каф. ПДМ
Сотников Виктор Георгиевич, аспирант
Ланкин Кирилл Александрович, аспирант
Ильясов Ильшат Ринатович, аспирант
Мифтахов Руслан Аликович, аспирант
Каримов Инсаф Рифатович, аспирант

ФГБОУ ВО «КНИТУ»

Аннотация. Термохимическая переработка органических отходов может стать прибыльным сектором современной экономики. При пиролизе происходит полная переработка всей органической массы отходов. Получаемые при переработке продукты это пиролизный дистиллят, газ, и углеродистый остаток. Ценность продуктов пиролиза не вызывает сомнений, но для их производства нужно довольно специфическое, сложное и энергозатратное оборудование. В данной работе рассматривается энергосберегающая установка переработки растительных отходов в активированный уголь.

Abstract. Thermochemical processing of organic waste can become a profitable sector of the modern economy. During pyrolysis, a complete processing of the entire organic mass of waste occurs. The products obtained during processing are pyrolysis distillate, gas, and carbon residue. The value of pyrolysis products is beyond doubt, but their production requires rather specific, complex and energy-consuming equipment. This paper considers an energy-saving plant for processing plant waste into activated carbon.

Ключевые слова: растительные отходы, активированный уголь, тепломассоперенос, энергосбережение, ресурсосбережение.

Принцип работы установки, заключается в следующем. Крупные кусковые отходы растительного происхождения измельчаются до размеров частиц 20 мм в измельчителе 1. Газодувка 22а создает избыточное давление, вдувая топочные газы, поступающие из канала 32. Топочные газы перемешиваются с воздухом и имеют температуру 250°С. Частицы отходов совместно с топочными газами, перемещают в камеру сушки 4 по пневмопроводу 3, во время перемещения по пневмопроводу отходы сушатся топочными газами. В камере конвективной сушки слой отходов окончательно высушивается топочными газами. Высушенные отходы через шнековый транспортер 14-а подают в зону пиролиза 5. Растительные отходы за счет кондуктивного подвода тепла от стенок пиролизной камеры по мере их продвижения вниз превращаются в древесный уголь с выделением пиролизных газов. Древесный уголь через барабанный питатель 15-а подают в зону активации 8, где древесный уголь обрабатывают водяным перегретым паром температурой 900°С с выделением горючих газов. Далее активированный уголь через шнековый транспортер 14-б подают в зону конвективного охлаждения 9, где в нижней части на высоте 15% от общей высоты насыпного слоя активированного угля находится коллектор 10, через который подают воду для орошения активированного угля. Нижний слой охлаждается до температуры 90°С, а верхний слой угля охлаждают образовавшимся водяным паром, который перегревается до температуры 700°С. Увлажненный активированный уголь через шлюзовый питатель 15-б направляют в камеру 11-а. При заполнении накопителя открывается клапан 12 и сбрасывает все содержимое емкости в вакуумную камеру зоны 11-б. Затем клапан 12 закрывают, а из камеры 11-б откачивают воздух при помощи насоса 16. При достижении остаточного давления 3-6 кПа открывается клапан 13.

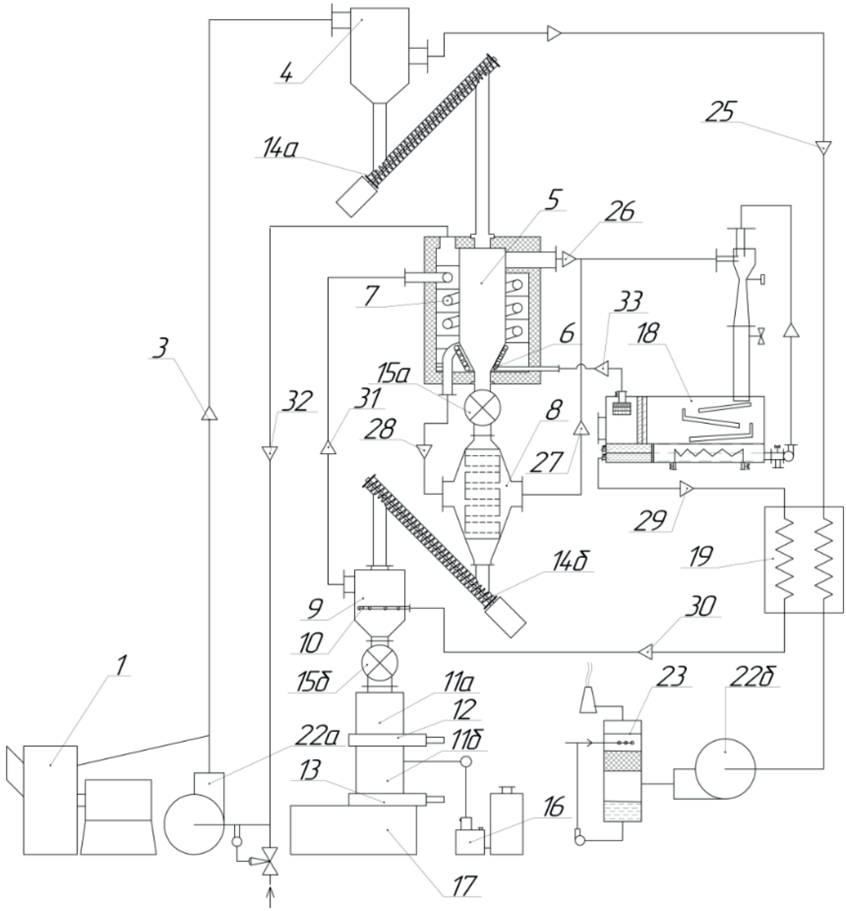


Рис. 3. Установка переработки растительных отходов в активированный уголь.

Сухой и охлажденный активированный уголь подают в упаковочный узел 17. Клапан 13 закрывается, а клапан 12 открывается для загрузки новой порции влажного активированного угля. Отвод газов активации осуществляется через канал 27, в канале 26 они перемешиваются с пиролизными газами и поступают в конденсатор 18, где происходит разделение газовой смеси на воду, несконденсированные горючие газы и пиролизный дистиллят, который поступает в сборник дистиллята 24. Несконденсированные горючие газы по каналу 33 подают в коллектор 6, где сжигаются. Вода из конденсатора 18 через канал 29 подается теплообменник 19, в котором вода подогревается до температуры, 95-99°С. Подогрев воды в теплообменнике осуществляется отработанными топочными газами, которые подают в теплообменник по каналу

25 из камеры сушки. Подогретая вода по каналу 30 подается в коллектор 10, орошает активированный уголь, вследствие чего превращается в водяной пар, который уносится из камеры конвективного охлаждения по каналу 31 в змеевиковый пароперегреватель 7, который расположен внутри рубашки пиролизной зоны. Подогрев пара осуществляется топочными газами в противоточном режиме. Из пароперегревателя 7 перегретый пар подают в камеру активации по каналу 28. Топочные газы уносятся из рубашки пиролизной зоны по каналу 32, перемешиваются с воздухом и служат теплоносителем для конвективной сушки измельченных растительных отходов. Отработанные топочные газы через газодувку 22б подают из теплообменника на очистку в абсорбере 23. Очищенные в абсорбере газы выбрасывают в атмосферу.

Выводы. Представленная, установка переработки растительных отходов позволяет непрерывно перерабатывать, различные твердые отходы, со сниженным энергопотреблением за счет использования высококалорийных неконденсирующихся горючих газов. Установка обладает высокой мобильностью позволяющая быстро развертываться на новых производственных линиях.

Список литературы

1. Р.Г. Сафин, В.Г. Сотников, Д.Ф. Зиатдинова. Пирогенетическая переработка органических отходов текстильной промышленности в адсорбенты. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2021, №5, С. 229-235.

2. Р.Г. Сафин, Т.О. Степанова, Р.Р. Зиатдинов, Д.Г. Рябушкин, В. И. Петров, В.Г. Сотников/ Конструктивный расчет пиролизной зоны установки производства активированного угля// Деревообрабатывающая промышленность. - 2020 г. -№3.- С.45-55.

3. Р.Г. Сафин, Р.Р. Зиатдинов, В.Г. Сотников, Д.Г. Рябушкин, Д.Р. Гумеров, С.В. Чжан/ Моделирование процесса измельчения и транспортирования органических отходов в установке производства активированного угля/Системы. Методы. Технологии. -2021.- №2.- С.152-157.

4. Р.Г. Сафин, Т.О. Степанова, Р.Р. Зиатдинов, Д.Г. Рябушкин, В.Г. Сотников/ Конструктивный расчет пиролизной зоны установки производства активированного угля// Деревообрабатывающая промышленность.- 2021 г. -№3.- С.72-80.

5. Р.Г. Сафин, Р.Р. Зиатдинов, В.Г. Сотников, Д.Г. Рябушкин, А. Л. Тимербаева, / Методика расчета пиролизной зоны в установке производства активированного угля/ Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. -2021.- №3. С 26-35.

6. Сафин Р.Г., Зиатдинов Р.Р., Сотников В.Г., Рябушкин Д.Г. Методика расчета зоны активации в установке производства активированного угля // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. Техн. науки. 2021. №4. С. 43 – 50.

7. Р.Г. Сафин, Р.Р. Зиатдинов, В.Г. Сотников, Д.Г. Рябушкин, Д.А. Ахметова/ Моделирование процесса сушки древесных отходовв установке производства активированного угля/ Системы. Методы. Технологии. -2021.- №4.- С.79-86.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛО- И МАССОБМЕНА ПРИ ТЕРМИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ ХИМИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА В РЕАКТОРЕ

Снигерев Б.А.

Институт механики и машиностроения обособленное структурное подразделение ФИЦ Казанского научного центра Российской академии наук

Аннотация. С единых позиций механики гетерогенных сред и кинетики химических реакций в приближении эйлерова подхода разработана математическая модель для расчета течения смеси жидкости и реагирующего химического вещества при их вдуве во входную часть пластинчатого реактора с нагретыми препятствиями. Исследуется влияние скорости вдува смеси, степень нагрева препятствий на гидродинамику перемешивания смеси, распределение объемной концентрации смеси, распределение скорости химической реакции в аппарате.

Ключевые слова: термическое разложение, химические реакции

Одним из основных инструментов в исследовании процессов химической технологии в настоящее время является математическое моделирование [1-2]. Процессы, происходящие в технологических аппаратах, разнообразны по своей физико-химической природе, аппаратурному оформлению, носят явно выраженный пространственно-распределенный характер. В данной работе исследуется поле течения и различные химические процессы в канале, в котором установлены нагретые препятствия. Такие конструкции широко встречаются в различных отраслях химической промышленности, аэрокосмической техники, нефтеперерабатывающей промышленности, в тепловыделяющих элементах ядерных реакторов [3-4]. Для моделирования процессов экзотермических реакций термического разложения вещества в параллельном пластинчатом реакторе используются уравнения переноса тепла и концентрации вещества, наряду с законами сохранения массы и импульса [5-7]. Наличие препятствий в канале приводит к сложной структуре течения смеси в реакторе, которая влияет на химические, тепловые и массо-обменные процессы. Записывается кинетическое уравнение химической реакции, характеризующее зависимость скорости реакции от концентрации реагирующих веществ и температуры. С помощью численного исследования выявлено влияния распределения концентрации вещества, его скорости, а также распределения температурного профиля в канале на распределение скорости химической реакции при изменении различных геометрических и технологических режимных параметров реактора. Исследовано влияние начальной скорости на входе, степени нагрева препятствия и их расположение на вышеупомянутые факторы в пластинчатом реакторе. Проведенные расчеты на основе полных математических моделей всех процессов, дали возможность выделить оптимальные технологические режимы, определяющие расположения и степень нагретых препятствий, выбор наиболее подходящих скоростей потока для получения максимального выходного продукта.

Литература

1. Островский Г.М., Бережинский Т.А. Оптимизация химико-технологических процессов. — М.: Химия, 1989. — 248с.
2. Кафаров В.В., Мешалкин В.П., Перов В.П. Математические основы автоматизированного проектирования химических производств. — М.: Химия, 1979. — 452с.
3. Кулов Н.Н., Гордеев Л.С. Математическое моделирование в химической технологии и биотехнологии// Теорет. основы хим. технологии. 2014. Т. 48. № 3. С. 243–252.
4. Абиев Р.Ш. Микросмесители и микрореакторы с сталкивающимися струями: современное состояние и перспективы применения в химической технологии наноматериалов (обзор) // Теорет. основы хим. технологии. 2020. Т. 54. № 6. С. 668–686с.
5. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. — М.: Наука, 1987. — 478с.
6. Холл Дж., Уатт Дж. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений. — М.: Мир, 1979. — 232с.
7. Моренко И.В., Федяев В.Л. Гидродинамика и теплообмен кругового цилиндра в ограниченном ламинарном потоке вязкой жидкости с частицами примеси // Теорет. основы хим. технологии. 2015. Т. 49. № 6. С. 708–716.

ОСНОВНЫЕ МОМЕНТЫ РЕИНЖИНИРИНГА ПОДШИПНИКОВЫХ УЗЛОВ ДИНАМИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Соколов Николай Викторович[1,2], Байбеков Рашит Рустемович[1], Егоров Александр Геннадьевич[2],

[1]АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа»,
[2]ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет», sokol-88@list.ru

Представлено краткое описание применяемых в динамическом оборудовании разных конструкций подшипников скольжения. Исходя из имеющегося производственного опыта АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» и теоретических исследований кафедры «Компрессорные машины и установки» ФГБОУ ВО «КНИТУ» разработан алгоритм проведения ремонтно-восстановительных работ узлов и деталей подшипников скольжения либо изготовление новых изделий. В качестве примера представлен реинжиниринг цилиндрического подшипника.

A brief description of the different designs of plain bearings used in dynamic equipment is presented. Based on the existing production experience of JSC «NIIturbocompressor named after V.B. Schnepp» and theoretical studies of the department «Compressor machines and installations» of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «KNRTU» developed an algorithm for carrying out repair and restoration work of units and parts of plain bearings or the manufacture of new products. The reengineering of a cylindrical bearing is presented as an example.

Ключевые слова: динамического оборудование, компрессор, цилиндрический подшипник, восстановление, рабочий зазор.

Одной из составляющей безаварийной работы динамического оборудования в нефтегазовой и нефтехимической отраслях промышленности является гарантированная компенсация нагрузок от вращающихся (роторных) частей оборудования, возникающих во время эксплуатации. Данные нагрузки воспринимают подшипниковые узлы, которые, как правило, в зависимости от направления воспринимаемого усилия представляют собой упорные и опорные подшипники скольжения.

В компрессоростроении простые по конструкции опорные цилиндрические подшипники скольжения используются в крупных поршневых компрессорах промышленного назначения, в винтовых компрессорах сухого сжатия, маслозаполненных винтовых компрессорах, холодильных машинах, мультипликаторах (редукторах) и др. динамическом оборудовании, в которых при низких частотах вращения сохраняется высокая масса роторной части [1]. В конструкциях центробежных компрессоров преимущественно применяются опорные и опорно-упорные подшипники скольжения типа Митчелл или Кингсберри, которые оснащены поворотными самоустанавливающимися колодками [2]. Такая усложненная конструкция отличается повышенной виброустойчивостью, например, за счет отсутствия «паразитных» циркуляционных сил в смазочном несущем слое опорного подшипника, которые могут привести к повышенной вибрации ротора при высоких частотах вращения [1, 3].

Во время эксплуатации динамического оборудования колебания роторов с большими амплитудами могут привести к разрушению баббитового слоя рабочего сегмента подшипников скольжения за механического воздействия, повышенной температуры слоя или за счет длительного периодического воздействия радиального усилия (усталостная прочность металла). Также на целостность расчетного геометрического профиля баббитовой поверхности, а, следовательно, и на номинальную несущую способность подшипниковых узлов, влияет присутствие в эксплуатируемом масле механических примесей. Для избежания предельного износа рабочих поверхностей подшипников скольжения необходимо вовремя и в полном объеме проводить все мероприятия технического обслуживания динамического оборудования.

В качестве антифрикционного материала рабочей поверхности сегмента подшипника крупных компрессоров используются отечественный баббит марки Б-83 ГОСТ 1320-74 или зарубежный материал Tegostar 738 на основе олова с пониженной характеристикой пластической деформации. Баббитовый слой при его разрушении или при уменьшении толщины при эксплуатации (истирании) можно восстановить двумя основными методами: методом классической наплавки или методом плазменного напыления, который широко применяется на производстве АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа», г. Казань.

В качестве примера реинжиниринга представлен процесс восстановления цилиндрического подшипника скольжения. В современных реалиях, связанных с полным прекращением поставок запасных частей от производителей иностранного компрессорного оборудования, находящихся в недружественных странах РФ, и сокращении лицензионной технической поддержки, изготовление полностью нового либо ремонт и восстановление существующих подшипниковых узлов является основной задачей для механических служб организаций нефтегазового и нефтехимического комплексов.

Основные этапы процесса плазменного напыления рабочих поверхностей подшипниковых узлов в АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» состоят в следующем:

- слесарная подготовка подшипников скольжения к технологическим операциям: очистка, обезжиривание и пр.;
- проточка «старого» баббитового слоя на подшипниках;
- токарная обработка проточенной поверхности подшипников на специализированных станках, например, координатно-расточных;
- предварительный нагрев детали;
- непосредственно плазменное напыление баббитового слоя с предварительной дробеструйной обработкой подложки. Для лучшего сцепления баббитового слоя с основанием предварительно напыляется композиционный порошок ПГ-Ю5-Н ГОСТ ТУ14-22-76-95, а далее наносится порошок баббита Пр-Б83 ТУ14-22-76-95.

Стоит отметить, что, несмотря на кажущуюся простоту, подготовительные операции являются одним из главных приоритетов, влияющих на качество проводимых работ. Также необходимо учитывать, что кроме очищения и обезжиривания деталей при работе с подшипниками скольжения в рамках программ импортозамещения предварительно необходимо выполнить следующие процедуры:

1. Создать эскиз детали с всеми размерами, необходимыми для проведения восстановления.

Размеры могут быть указаны на сборочном чертеже, в формуляре (паспорте) или др. отгрузочных документах иностранного предприятия-изготовителя. В случае отсутствия размеров рабочий зазор может быть отдельно рассчитан специализированными программами, исходя из исходных данных компрессора: частота вращения ротора, нагрузка, марка масла, температура подачи масла, геометрические размеры расходного кольца и др. элементов. В случае же отсутствия подобных данных, фактический рабочий зазор восстанавливается за счет разницы между неповрежденными статорными и роторными элементами подшипника скольжения. Например, для опорного подшипника с самоустанавливающимися колодками такой диаметральный зазор может быть вычислен по формуле:

$$(\mathrm{D}_{\text{КОРПУСА}} - \mathrm{d}_{\text{ВАЛА}} - \mathrm{d}_{\text{ЗАЗОР}}) = 2\mathrm{H}_{\text{КОЛОДКИ}}. \quad (1)$$

2. Разработать и изготовить приспособление для проточки баббитового слоя до напыления детали и после напыления.
3. Разработать и изготовить приспособление для установки колодок (комплект) в станок для напыления.

После проведения всех подготовительных операций следует выполнение основной технологической работы. При этом следует учесть, что, если баббитовый слой имеет разрушения до основания, то необходимо снять баббитовый слой полностью. Если же баббитовый слой не разрушен, а только изношен, баббит снимается на глубину примерно 0,5 мм на сторону.

Алгоритм выполнения работ основного этапа состоят в следующем:

- Дробеструйка рабочей поверхности до напыления с выполнением защиты открытых нерабочих поверхностей конструкции подшипникового узла.
- Выполнение защиты поверхностей, на которые не должен наноситься баббит: нанесение высокотемпературного лака, паронита или другими методами.
- Прогревание детали до определенной температуры.
- Нанесение специального подслоя толщиной не более 0,1…0,2 мм.
- Нанесение баббита. Толщина баббитового слоя должна превышать на 1,5 мм номинальный размер.

После выполнения данных операций необходимо провести очистку подшипников от излишек баббитового напыления, в том числе за счет проточки торцев цилиндрического подшипника (рис. 1а).

а) б)

Рис. 1. Торец цилиндрического подшипника: а) после проточки и б) проведение токарных операций

Проточка внутреннего диаметра выполняется по разработанного чертежу (эскизу) с обеспечением необходимых рабочих зазоров и других технологических параметров (рис. 1б). Окончательный контроль готового изделия перед установкой в корпус компрессора или другого динамического оборудования проводят специалисты ОТК предприятия (рис. 2).

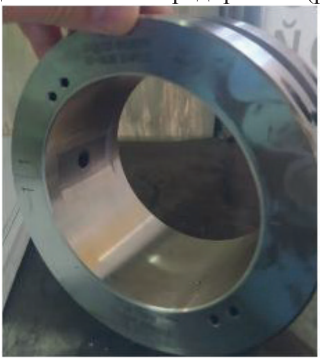


Рис. 2. Готовый цилиндрический подшипник после напыления и проведения токарных операций

Таким образом, разработанный в АО «НИИтурбокомпрессор им. В.Б. Шнеппа» совместно с кафедрой «Компрессорные машины и установки» ФГБОУ ВО «КНИТУ» алгоритм проведения ремонтно-восстановительных работ (реинжиниринга) узлов и деталей подшипников скольжения либо изготовление новых изделий позволяет на имеющемся оборудовании производить ремонт и вводить в эксплуатацию различное динамическое оборудование иностранных предприятий-производителей и минимизировать риски выхода из строя дорогостоящих установок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хисамеев, И. Г. Проектирование и эксплуатация промышленных центробежных компрессоров / И. Г. Хисамеев, В. А. Максимов, Г. С. Баткис, Я. З. Гузельбаев. – Казань : Изд-во «ФЭН». – 2010. – 671 с.
2. Максимов, В. А. Основы триюботехники и герметологии: учебник / В. А. Максимов, Г. С. Баткис. – Казань : Изд-во «Титул-Казань». – 312 с.
3. Подольский, М. Е. Редукторы энергетических машин: Справочник; Под общ. ред. Ю. А. Державца. – Л: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1985. – С. 177-210.

АНАЛИЗ ПРИЧИН АВАРИЙ, СВЯЗАННЫХ С ВЫБРОСОМ СЖИЖЕННОГО АММИАКА

Старовойтова Евгения Валерьевна, Поникаров Сергей Иванович

ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский технологический университет

Аннотация: В статье рассмотрены причины аварий, связанных с хранением, транспортировкой и производством сжиженного аммиака.

Annotation: The article discusses the causes of accidents associated with the storage, transportation and production of liquefied ammonia.

Ключевые слова: авария, причины аварии, опасные вещества, аммиак.

Keywords: accident, causes of the accident, hazardous substances, ammonia.

Аммиак относится к группе веществ, у которых критическая температура выше, а температура кипения ниже температуры окружающей среды. При разгерметизации емкостей с жидкостями данной категории процесс образования газовых облаков зависит от их условий хранения. В силу физико-химических свойств аммиака при аварийной разгерметизации емкости, т.е. при падении давления до нормального, происходит чрезвычайно быстрое испарение определенной части жидкости. Основная опасность в большей степени обусловлена возможностью его быстрого распространения на большое расстояние, что приводит к поражению людей парами аммиака и нарушению системы жизнеобеспечения населения [1, 2, 3, 4].

Аммиак хранится в изотермических резервуарах, вместимостью 10 т под избыточном давлением 2-8КПа при температуре -33^{o}C [1].

По результатам исследований [2, 3, 4] наиболее вероятным является сценарий, соответствующий мгновенному выбросу аммиака с образованием первичного и вторичного облака с последующим токсическим поражением персонала. Самым опасным является сценарий, соответствующий мгновенному воспламенению аммиака после образования первичного и вторичного облака с последующим взрывом смеси, но вероятность его возникновения очень мала.

Основная опасность при разгерметизации системы изотермического хранения жидкого аммиака обусловлена быстрым распространением его паров.

Изотермические резервуары (ИР), используемые для хранения сжиженного аммиака, представляют собой объекты повышенной опасности, разрушение которых может привести к техногенной катастрофе.

Причины аварий с выбросом в атмосферу ядовитого вещества аммиака достаточно разнообразны. Так, на техногенной аварии 6 августа 2013 года на заводе ПАО «Концерн Стирол» в Горловке, основной причиной несчастного случая стало неудовлетворительное состояние трубопровода жидкого аммиака, зонная толщина которого была уменьшена до 0,6-0,8 миллиметра по причине длительного коррозионного воздействия окружающей и эрозионного воздействия рабочей сред [5]. На другом предприятии [6] взрыв произошел после нажатия кнопки «Аварийная остановка агрегата» вследствие несрабатывания электропневматического клапана, поэтому отсекатель на линии подачи аммиака в смеситель оказался открытым. Анализ причин аварии показал, что клапан был собран некачественно, и неквалифицированно была проведена ревизия его после монтажа. Еще одним примером масштабной аварии является авария, произошедшая на изотермическом хранилище в ПО «Азот» в городе Ионава [7]. Возможными ее причинами называют превышение в хранилище избыточного давления и образование микротрещин в месте сварки цилиндра и днища резервуара.

Изотермические резервуары, несомненно, можно отнести к объектам, разрушение которых может привести к техногенной катастрофе. На территории РФ имеется более 20 единиц изотермических хранилищ жидкого аммиака. Эксплуатационный срок многих ИР превышает 30 лет, следовательно, риск развития коррозии, свищей, пор, трещин основных элементов возрастает [8].

Причины возникающих дефектов в подобном оборудовании могут быть классифицированы на несколько основных групп: пластическая деформация, включающая движение дислокаций; разрушение материала, зарождение и распространение трещин; фазовые превращения, под которыми подразумевают мартенситное превращение, затвердевание расплава; разновидности коррозии (точечная коррозия, водородное охрупчивание, коррозионная усталость, коррозионное растрескивание под напряжением); нарушение технологии сварки и сварочные дефекты (трещины, включения и пористость).

В табл. 1 приведены сводные данные по авариям и инцидентам на ИР сжиженных газов в России [9]. Основные дефекты, развитие которых при условии непринятия мер может привести к аварии на изотермических резервуарах, приведены в табл. 2 [8]. Исходя из табл. 2 видно, что традиционные периодические технические освидетельствования, включающие визуальный контроль и гидроиспытания, не позволяют получить объективных и качественных результатов для оценки состояния оборудования, что приводит проявлению скрытых дефектов. Также необходимо основательно подходить к процессу устранения выявленных дефектов, более внимательной проработке проблемных мест оборудования.

Для уменьшения количества аварий по причине проявления скрытых дефектов необходимо использовать современные методы обнаружения дефектов, включая неразрушающие методы контроля. Своевременное обнаружение критических изменений в толще металла оборудования способно предупредить до 30% аварий.

По данным, опубликованным в зарубежной печати, выбросы в атмосферу больших масс аммиака были связаны с разрушением трубопроводов, стационарных резервуаров, железнодорожных цистерн и автоцистерн [6]. Результаты анализа этих публикаций приведены в табл. 3.

Таблица 1. Сводные данные по авариям и инцидентам на изотермических резервуарах сжиженных газов в России [9]

№ п/п	Инцидент	Причины аварии, инцидента	% к итогу	Частота реализации сценария аварии, -1 год
1	Авария, полное разрушение изотермическог о резервуара	Отказ компрессора компримирования аммиака + «человеческий фактор»	10	$2{,}6 \cdot 10^{-4}$
2	Инцидент	Утечка аммиака через микротрещины во внутреннем днище резервуара, повышение концентрации аммиака в межстенном пространстве	10	$0{,}45 \div 0{,}5 \cdot 10^{-3}$
3	Инцидент	Трещина в «воротнике» трубопровода выхода жидкого аммиака. Ошибка проекта	10	$0{,}45 \div 0{,}5 \cdot 10^{-3}$
4	Инцидент	Недопустимая деформация анкерных полос, просадка ИР из-за гниения деревянного опорного кольца	10	$0{,}45 \div 0{,}5 \cdot 10^{-3}$

Таблица 2. Причины аварийности в зависимости от типа дефекта резервуара

Причина	Число случаев / %
Дефекты, обнаруженные и ликвидированные при осмотре резервуаров	63/29
Не обнаруженные (скрытые) дефекты, проявившиеся через некоторое время после планового осмотра	61/28
Усталостные явления	52/24
Коррозия	30/14
Другие причины, включая ползучесть	10/5

Таблица 3. Данные по аварийности от типа аварии с участием аммиака

Тип аварии	Число случаев, %	Масса образовавшегося облака аммиака, тонн
Разрушение трубопроводов	50	180 - 600
Разрушение стационарных резервуаров	20	40 - 160
Разрушение железнодорожных цистерн	20	75 - 90
Разрушение автоцистерн	10	20

Точных данных о зависимости числа погибших от массы газового облака нет. Например, при массе образовавшегося облака 600 – 270 тонн погибших не было. В то же время при аварии на стационарном резервуаре (масса облака 38 тонн) погибли 18 человек, на железнодорожной цистерне (90 тонн) – 9 человек, на автоцистернах (19 тонн) – в двух случаях по 6 человек, а при аварии на одном стационарном резервуаре (масса облака 90 тонн) погибших не было.

Исходя из сказанного, можно предположить, что на число погибших влияет не столько объем выброшенного аммиака, сколько наличие административно-территориальных единиц в районе разрушения. Принимая также во внимание стабильное наличие аварий на опасных производственных объектах химического комплекса и нефтеперерабатывающих производств можно сделать вывод, что для уменьшения количества пострадавших необходимо в первую очередь проводить работу по разработке средств и мероприятий по локализации аварий.

Литература

1. Баско Е.М. О повышении ресурса эксплуатации шаровых резервуаров для хранения жидкого аммиака // Промышленное и гражданское строительство. – 2006. – № 6.

2. Старовойтова Е.В. Прогнозирование последствий аварийных залповых выбросов сжиженных газов // дисс. на соиск. уч. ст. к. т. н. / Казанский национ. исслед. технол. ун-т. Казань, 2012.

3. Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И. Математическая модель процесса парообразования при аварийном проливе сжиженного газа // Вестник Казан. технол. ун-та. 2011. № 1. С. 323-325.

4. Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И. Оценка последствий аварийного выброса сжиженного аммиака с использованием вероятностного критерия поражения // Вестник Казан. технол. ун-та. 2013. Т. 16. № 17. С. 259-261.

5. Авария в Горловке [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Авария в Горловке (2013), свободный.

6. Бесчастнов М.В. Промышленные взрывы. Оценка и предупреждение / М.В. Бесчастнов. – М.: Химия, 1991. – 432 с.

7. Achema [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Achema, свободный.

8. Афанасьев С.В. Мониторинг изотермических хранилищ жидкого аммиака / С.В. Афанасьев [и др.] // Химическая техника. 2017. № 12.

9. Четвертухин Н.В. Ларионов М.В. Чернобров А.Р. Журавлев М.Д. Широнин Е.В. ООО «НПК Изотермик» Разработки инновационных конструкций изотермических резервуаров сжиженных газов на основе оценки риска // Теория и практика современной науки. М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2016. – № 3(9).

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АВАРИЙНОСТИ НА ОБЪЕКТАХ ХИМИЧЕСКОЙ, НЕФТЕХИМИЧЕСКОЙ И НЕФТЕГАЗОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Старовойтова Евгения Валерьевна, Поникаров Сергей Иванович

ФГБОУ ВО Казанский национальный исследовательский технологический университет

Аннотация: Эксплуатация химически опасных объектов сопровождается высоким риском аварий. В статье проанализированы данные аварийности и травматизма со смертельным исходом на объектах химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей промышленности. Анализ проведен с 2004 по 2020 годы включительно.

Annotation: The exploitation of chemically hazardous facilities is accompanied by a high risk of accidents. The article was analyzed the data on accidents and fatal injuries at the facilities of the chemical, petrochemical and oil refining industries. The analysis is given from 2004 to 2020.

Ключевые слова: авария, статистика, опасные вещества, разгерметизация.

Keywords: accident, statistics, hazardous substances, depressurization.

В настоящее время Федеральный государственный надзор в области промышленной безопасности осуществляется на более чем 3350 предприятиях химического комплекса и 4114 объектах нефтехимической, нефтегазоперерабатывающей промышленности [1].

Эксплуатация химически опасных объектов сопровождается высоким риском аварий, таких как взрывы с возгораниями и без него, пожары, связанные с розливом взрывопожароопасных веществ, выброс или истечение химически опасных, взрывоопасных и горючих веществ, полное или частичное разрушение (повреждение) технологического оборудования и трубопроводов, зданий и сооружений, не связанное с взрывом, пожаром. При этом основными поражающими факторами выступают ударная волна, тепловое воздействие и воздействие продуктами сгорания, токсическое воздействие распространяющегося облака высвободившихся веществ [2, 3, 4].

В данной статье проанализирована статистика аварийности на опасных производственных объектах (ОПО) химического комплекса и нефтехимической и нефтегазоперерабатывающей промышленности, расположенных на территории Российской Федерации. Анализ представлен на период с 2004 по 2020 года на основе ежегодных отчетов о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [1] в виде табличных данных (таблица 1).

Для сравнения в таблице приведено общее количество аварий на рассматриваемых объектах и аварии, которые произошли по причине разгерметизации оборудования и сопровождались с выбросом опасного токсичного вещества в атмосферу.

В результате анализа выявлено, что количество аварий по причине разгерметизации оборудования и выброса опасного вещества не превышает 50% на объектах нефтехимической и нефтегазоперерабатывающей промышленности от общего числа аварий. Однако, на производствах химического комплекса этот показатель был превышен в 2006, 2011, 2015, 2018 годах, а в 2020 году он равен данному значению (50%).

В таблице 1 также приведены данные по количеству погибших в результате аварий на рассматриваемых объектах. Самый пик всех погибших выявлено в 2005 году для объектов нефтехимии и нефтегазопереработки, а на химическом комплексе – в 2008 году. Количество погибших людей непосредственно от отравления токсичным веществом или в результате химического ожога не превышает 34% для производств и объектов химического комплекса.

Таблица 1. Сравнительный анализ распределения аварийности и несчастных случаев со смертельным исходом на территории Российской Федерации

Год	Объекты нефтехимической, нефтегазоперерабатывающей промышленности		Производства и объекты химического комплекса	
	Общее количество аварий/аварий по причине разгерметизации оборудования и выброса опасных веществ	Число погибших/ число погибших по причине химического ожога и отравления	Общее количество аварий /аварий по причине разгерметизации оборудования и выброса опасных веществ	Число погибших/ число погибших по причине химического ожога и отравления
2004	11/2	15/7	11/2	15/7
2005	27/2	41/5	9/3	10/2
2006	21/1	11/-	7/4	10/5
2007	22/3	10/-	10/4	18/6
2008	13/2	14/-	11/4	20/10
2009	13/2	5/-	7/3	9/4
2010	16/3	6/-	12/2	7/3
2011	20/3	16/-	8/5	3/1
2012	18/7	13/-	6/2	7/-
2013	14/5	4/-	2/1	5/2
2014	19/6	11/-	3/2	2/-
2015	19/2	7/-	11/6	12/2
2016	18/7	12/-	5/3	3/-
2017	19/4	12/-	2	3/1
2018	12/1	3/-	7/4	3/1
2019	18/3	8/-	2/-	3/-
2020	9/4	2/-	8/4	2/1

Анализ аварийности на опасных объектах химического комплекса и нефтегазоперерабатывающей промышленности показал неутешительную стабильность в ежегодном наличии аварий, связанных с разгерметизацией оборудования и последующим выбросом токсичных веществ. Однако по количеству погибших наблюдается положительная динамика уменьшения смертности за эти годы. В связи с этим возникает необходимость изучения причин возникновения аварий на опасных производственных объектах.

Литература

1. Годовые отчеты о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.gosnadzor.ru, свободный.

2. Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И. Экспериментальное исследование интенсивности парообразования сжиженного газа // Вестник Казан. технол. ун-та. 2012. Т. 15. № 9. С. 70-71.

3. Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И. Численное моделирование испарения бензина с учетом тепломассопереноса в жидкой фазе // Вестник Казан. технол. ун-та. 2013. Т. 16. № 8. С. 129-132.

4. Старовойтова Е.В., Галеев А.Д., Поникаров С.И. Численное моделирование последствий аварийного выброса сжиженного хлора при наличии препятствий // Вестник Казан. технол. ун-та. 2012. Т. 15. № 6. С. 207-209.

МИГРАЦИЯ ТОНКИХ СЛОЕВ ПО НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИМ ПОВЕРХНОСТЯМ В УСЛОВИЯХ ВАКУУМА

Тазюков Фарук Хоснутдинович, Карибуллина Фарида Рахимовна

КНИТУ (КХТИ) ул. Карла Маркса, 68, Казань, Респ. Татарстан, 420015

Аннотация. Статья посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию явления течения тонких покрытий на неравномерно нагретой подложке с учетом подвижной линии контакта. Это явление можно объяснить появлением тангенциальной силы, приложенной к свободной поверхности капли и приводящей к термокапиллярной конвекции за счет эффекта Марангони. Термокапиллярная конвекция приводит к продольному градиенту давления, который направлен в сторону охлажденного конца подложки. В результате происходит деформация поверхности капли, увеличивается контактный угол на линии натекания, что приводит к перемещению капель в сторону отрицательного градиента температуры.

This paper is devoted to theoretical and experimental investigation of the following phenomenon: coating flow of thin drop on the non-uniformly heated substrate with considering the moving contact line. This phenomenon is explaned by appearing the tangent force due to the Marangoni effect, applied to free surface of a drop and leads to thermocapillary convection. The occuring thermocapillary convection leads to a longitudinal pressure gradient, applied to the mass center of the drop and directed towards cooled end of the substrate. This convection defines the drop free surface deformation, incrises the contact angle at advancing front and leads to drop displacement.

Ключевые слова. Эффект Марангони, миграция тонких капель, моделирование

В вакуумных системах при использовании масляных насосов может происходить негативный эффект миграции рабочей жидкости в откачиваемый объем [1].

Моделирование этого эффекта основано на учете того фактора, что стенки паромасляного насоса находятся в неизотермическом состоянии, следовательно, как только небольшая капля рабочей жидкости попадает на неравномерно нагретую поверхность, то в результате зависимости поверхностного натяжения капли от температуры возникает термокапиллярная конвекции [2]. Эта конвекция приводит к миграции масла в сторону отрицательного температурного градиента (т.е. в сторону откачиваемого объема) независимо от его расположения.

Основной целью нашей работы является математическое описание явления поверхностной миграции.

Математическая постановка и принятые допущения

Явление перемещения тонких капель жидкости по неравномерно нагретой стенке объясняется действием тангенциальной силы, возникающей в результате воздействия эффекта Марангони на поверхности капель и приводящей к термокапиллярной конвекции в капле. Такая конвекция приводит к деформации поверхности, увеличении угла контакта на переднем фронте и перемещению капли.

Для описания процессов на линии контакта предложен ряд феноменологических гипотез:

- углы контакта являются чувствительными характеристиками взаимодействия на линии трехфазного контакта;

- граничные условия скольжения необходимы для уменьшения влияния сингулярности вблизи натекающей контактной линии.

Математически это может быть описано следующим образом:

$$\eta \frac{\partial u}{\partial y} = \beta u, \tag{1}$$

где b - коэффициент пропорциональности; $l = h / b$ коэффициент проскальзывания; *u*- горизонтальная компонента скорости; h - динамическая вязкость. Значение l настолько мало, что практически отсутствует скольжение на границе раздела жидкость/твердое тело, кроме линии контакта, где высота капли стремится к нулю.

Безразмерное уравнение, описывающее деформацию профиля капли в системе движущихся координат, связанную с каплей, в случае тонких слоев можно записать следующим образом:

$$-V\frac{\partial H}{\partial x}+\frac{\partial}{\partial x}[H^2(H+\varepsilon)\frac{\partial^3 H}{\partial x^3}]$$
$$=\frac{Ca}{\theta_o^2}\frac{\partial}{\partial x}[H(\frac{3}{2}H+\varepsilon)], \qquad (2)$$

где

$H=h(x)/(a\theta_o)$;

$\varepsilon=3\lambda/(a\theta_o)$;

$Ca=\frac{\partial\sigma}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial x}\frac{a}{\sigma}$.

Соответствующими граничными условиями являются:

$H(\pm 1)=0$,

$\left.\frac{\partial H}{\partial x}\right|_{x\to 1}=a$;

$a=\theta_a/\theta_o$

$$\int_{-1}^{1}H(x)dx=\frac{2}{3}, \qquad (3)$$

где $a=\theta_a/\theta_o$ - отношение контактного угла натекания к равновесному контактному углу.

Граничная задача (2) - (3) является задачей Неймана. В работе методом асимптотических разложений найдено решение, соответствующее центральной области капли (внешней области) и соответствующее области течения вблизи для линии контакта (внутренней области). Для получения составного решения этой проблемы использован метод сращивания асимптотических разложений.

Обсуждение

Проведенное моделирование позволяют выявить основные факторы, влияющие на процесс поверхностной миграции. К ним относятся: поверхностное натяжение вакуумной жидкости и его температурная зависимость, величина равновесного угла контакта (поверхностная миграция была предотвращена при угле контакта более, чем 20°) и градиент температуры на стене.

Другими словами, поверхностная миграция в вакуумных системах происходит, когда стены находятся в неравномерно нагретых условиях.

Скорость этой миграции зависит от угла контакта, который является характеристикой взаимодействия между тремя фазами на движущейся линии контакта.

Литература

1. Bascom, W. B., Cottington R. L., Singlaterry C. R.; Contact angle, wettability and adhesion; Advances in Chem., 1964, 43, 355-379
2. Тазюков Ф.К., Норден П.А., Гарифуллин Ф.А.; Течение масляных пленок с покрытием с учетом взаимодействия трех фаз; Тез. докл. 2 инт. Конференция по многофазному течению; Киото, апрель 1995 г.

СМЕШЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ НЕСОВМЕСТИМЫХ ПОЛИКАРБОНАТА И ПОЛИЭТИЛЕНА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ ПО МЕТОДУ SEDS

Хабриев Ильнар Шамилевич[1] – ассистент кафедры ТОТ, termi0@yandex.ru
Хайрутдинов Венер Фаилевич[1] – профессор кафедры ТОТ, kvener@yandex.ru
Гумеров Фарид Мухамедович[1] – заведующий кафедрой ТОТ, gum@kstu.ru
Хузаханов Рафаиль Мухаметсултанович[1] – профессор кафедры «ХТПЭ»

[1]ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»

Аннотация: В работе представлены результаты совместного диспергирования полимерных смесей поликарбоната (ПК) и линейного полиэтилена высокого давления (ЛПЭВД), осуществленного в диапазоне давлений 8.0÷25МПа при температурах 313-353 К с использованием метода SEDS.

Abstract: The paper presents the results of joint dispersion of polymer blends of polycarbonate (PC) and linear high-pressure polyethylene (LLDPE), carried out in the pressure range of 8.0÷25 MPa at temperatures of 313-353 K using the SEDS method.

Ключевые слова: сверхкритический флюид, полимерные смеси, диспергирование по методу SEDS, кристаллизация.

Key words: supercritical fluid, polymer blends, SEDS dispersion, crystallization.

В настоящее время одним из перспективных направлений смешения и диспергирования полимерных материалов является достаточно большая группа методов, использующих процессы с участием сверхкритических флюидных сред и, несомненно, сверхкритического диоксида углерода. В отличие же от традиционных методов смешения и измельчения эти высокочувствительные к режиму осуществления процесса технологии позволяют получать однородные, с определенными физико-химическими свойствами и размерами частицы.

Сверхкритические флюидные среды в различных методах диспергирования могут быть использованы как в качестве растворителя (RESS (Rapid expansion of supercritical solutions)), так и в роли антирастворителя или осадителя (SAS (Supercritical Anti-Solvent), GAS (Gas Anti-Solvent), SEDS

(Solution Enhanced Dispersion by Supercritical Fluids), ASES (Aerosol Solvent Extraction System)). Подробное описание этих методов можно найти в многочисленных обзорах, включая [1-3].

Предметом же настоящего исследования является смешение термодинамически несовместимых поликарбоната и полиэтилена высокого давления с использованием процесса диспергирования по методу сверхкритического флюидного антирастворителя, а именно по методу SEDS.

Экспериментальная часть

В качестве объектов исследований использованы следующие полимеры: поликарбонат марки 007u (ПК), линейный полиэтилен высокого давления марки 5118-QM (ЛПЭВД) (ПАО "СИБУР Холдинг").

Принципиальная схема экспериментальной установки, предназначенной для диспергирования смесей полимеров по методу SEDS, представлена на рисунке 1.

Для подачи раствора смеси полимеров в органическом растворителе (2) и CO_2 (1) используются плунжерные насосы фирмы THAR (США) (4,5). Цилиндрическая емкость из нержавеющей стали объемом 1 литр используется в качестве ячейки осаждения (10). Давление в ячейке измеряется с помощью манометра и регулируется регулятором обратного давления (11). Впрыскивание жидкого раствора и подача сверхкритического диоксида углерода происходят одновременно через коаксиальное сопло (9). При этом, раствор полимеров в органическом растворителе подается по внутреннему отверстию, а CO_2 по внешнему кольцевому зазору. Для сбора диспергированных частиц на дне реактора устанавливается металлическая подложка. Оставшийся после эксперимента органический растворитель собирается в сепараторе (12).

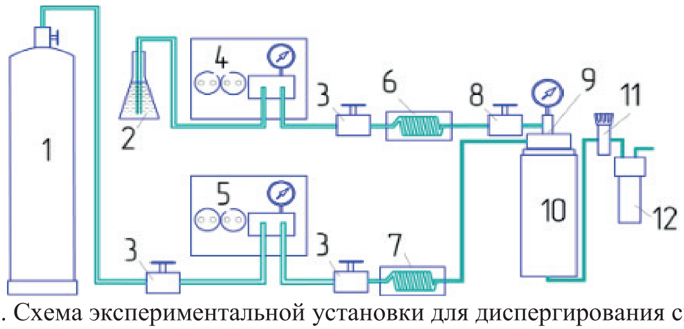


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для диспергирования смесей полимеров по методу SEDS: 1 – баллон с CO_2, 2 – емкость для раствора "исследуемое вещество – органический растворитель", 3 – вентиль, 4 – насос подачи раствора, 5 – насос подачи CO_2, 6 – нагреватель раствора, 7 – нагреватель CO_2, 8 – вентиль на линии подачи раствора в сопло, 9 – коаксиальное сопло, 10 – реактор, 11 – регулятор обратного давления, 12 – сепаратор.

Более подробное описание установки и методики проведения процесса приведено в работе [4].

Результаты и обсуждения

На рисунке 2 представлены СЭМ изображения смеси ЛПЭВД (50%)/ПК (50%), полученных при различных давлениях.

Полученные в ходе диспергирования частицы смеси ПЭ 5118 (50%)/ПК (50%) имеют сферическую форму диаметром от 300 до 700 нм, зависящим от режимных параметров осуществления процесса диспергирования.

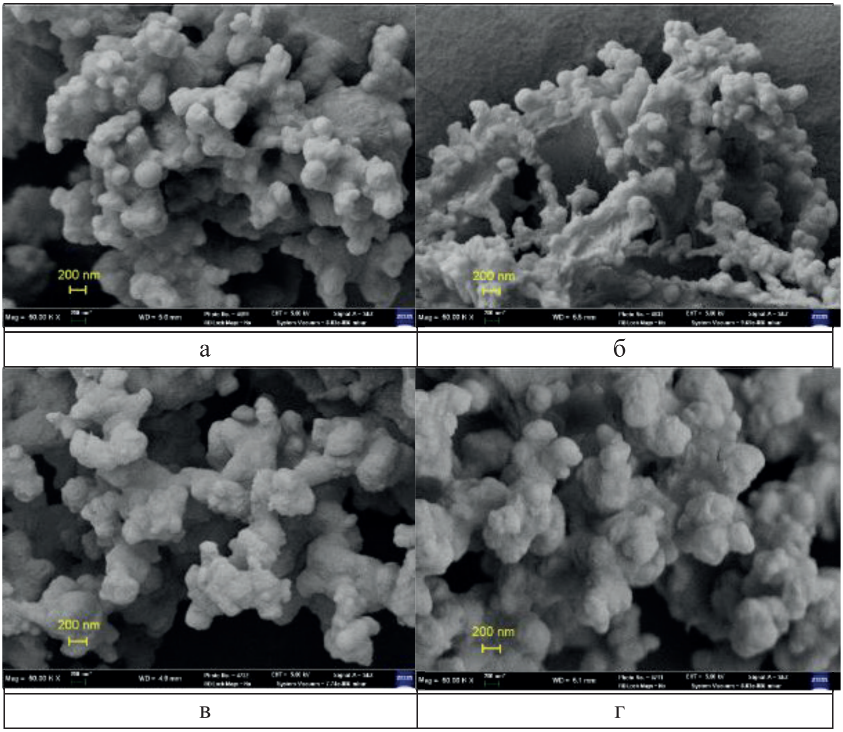


Рис. 2. СЭМ изображение и внешний вид смеси ЛПЭВД /ПК, полученной в результате диспергирования при разных температурах и давлениях: а - Т=313 К, Р=8 МПа; б - Т=313 К, Р=15 МПа; в - Т=313 К, Р=25 МПа; г - Т=333 К, Р=15 МПа;

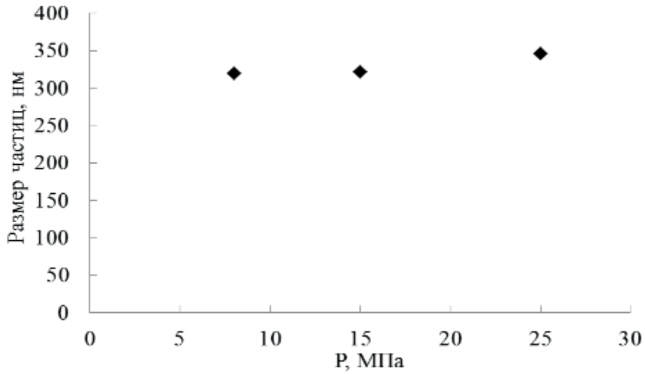


Рисунок.3. Зависимость среднего размера частиц смеси ЛПЭВД (50%)/ПК (50%) от давления при Т=313К

На рисунке 3 приведена зависимость среднего размера частиц полимерной смеси ЛПЭВД (50%)/ПК (50%), полученных в результате диспергирования, от значения давления и температуры в процессе. Согласно полученным результатам кривая зависимости среднего размера частиц от давления указывает на то, что в исследованном диапазоне давлений с увеличением давления средний размер частиц не меняется и составляет около 340 нм. Однако из кривой зависимости среднего размера частиц от температуры видно, что увеличение температуры приводить к росту полученных частиц от 320 мкм до 670 мкм.

Предварительно перед изучением процессов плавления и кристаллизации смесей ЛПЭВД и ПК полученных, как смешением в расплаве, так и смешением в сверхкритическом диоксиде углерода были проанализированы диаграммы плавления и кристаллизации исходных компонентов.

Анализируя все данные по изучению смесей ЛПЭВД – ПК можно сказать, что для всех смесей (кроме смеси ЛПЭВД 50% - ПК 50% при $t=40^{o}C$, Р=15МПа) и чистых полимеров, полученных по методу SEDS, удельная теплота плавления превышает значения смесей, полученных в расплаве. Это значит, что в условиях SEDS создаются лучшие условия для процесса кристаллизации поэтому удельная теплота плавления выше аддитивной и соответственно больше степень кристалличности, причем этот эффект сохраняется и после термообработки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 19-73-10029, https://rscf.ru/project/19-73-10029/

Список литературы

1. Jung, J.; Perrut, M. Particle design using supercritical fluids: Literature and Patent Survey. J. Supercritical Fluids 2001, 20, 179–219. doi.org/10.1016/S0896-8446(01)00064-X

2. Knez, M.; Škerget, M.; Knez, H.; Čuček, D. Particle formation using sub- and supercritical fluids. In: Supercritical Technology for Energy and Environmental Applications. Elsevier 2014, Chap. 2, 31-67. doi.org/10.1016/B978-0-444-62696-7.00002-2

3. Yang, L.; Huang, J.-M.; Zu, Y.-G.; Ma, C.-H.; Wang, H.; Sun, X.-W.; Sun, Z. Preparation and radical scavenging activities of polymeric procyanidins nanoparticles by a supercritical antisolvent (SAS) process. Food Chemistry 2011, 128, 1152-1159. doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.04.017

4. Khabriev, I.Sh.; Khairutdinov, V.F.; Gumerov, F.M.; Khuzakhanov, R.M.; Garipov, R.M.; Abdulagatov. I.M. VLE properties and the critical parameters of ternary mixture of CO2 + toluene/dichloromethane involved in the SEDS precipitation process. J. Molecular Liquids. 2021, 337, 116371. doi.org/10.1016/j.molliq.2021.116371

ПИРОЛИЗАТОР С ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ НАГРЕВОМ

Хайруллин Ильдар Фаритович

Казанский национальный исследовательский технологический университет, учебный мастер кафедры ПДМ

Аннотация. В работе представлена установка для пиролиза органических веществ с электронагревателем.

Ключевые слова: уголь, пиролиз, органические отходы

Установка для пиролиза (рис. 1) углеводородных отходов содержит термореактор 1 с герметично закрывающейся крышкой 2. Внутри термореактора 1 размещен электронагреватель 3 с катализатором 4. Термореактор 1 через электронагреватель 3 с газоприемной щелью 5 соединен с конденсатором 6, выполненным в виде холодильника с проточной водой и соединенным с отстойником 7 для жидких осадков. Отстойник 7 соединен газоотводной трубой с гидрозатвором 8, соединенным газоотводной трубой с измерительным гидрозатвором 9. На внутренней поверхности участков газоотводных труб, размещенных в водном объеме гидрозатворов 8, 9 имеются катализаторы 8.1, 9.1. Гидрозатвор 9 соединен с компрессором 10, который соединен с ресивером 11. Ресивер 11 соединен с вентилем 12, через который газ подается потребителю. Приемники 13, 14 жидких углеводородов 15 гидрозатворов 8, 9 через насос 16 соединены с форсункой 17, расположенной в термореакторе 1. Приемник отстойника 7 для жидких осадков через патрубок с вентилем 18 соединен с термореактором 1. Термореактор 1 и труба газохода для пиролизных газов имеют теплоизоляционное покрытие 19 [1].

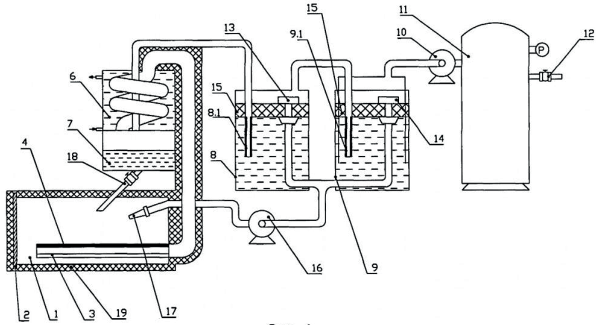


Рис. 1. Пиролизер с нагревом от электронагревателя.

Установка для пиролиза углеводородных отходов работает следующим образом. В термореактор 1 загружают углеводородные отходы и герметично закрывают его крышкой 2. На электронагреватель 3 подается напряжение питания. Температура внутри термореактора 1 поднимается, и происходит пиролиз загруженной биомассы. В результате деструкции биомассы в термореакторе 1 вокруг электронагревателя 3 образуется угольный осадок, а газовая составляющая, пройдя через него, уходит через приемную щель 5 электронагревателя 3 в конденсатор 6. Охлаждаясь и конденсируясь, кислотные и масляные составляющие попадают в отстойник 7 для жидких осадков. Более легкие топливные фракции газа, проходя через газоотводную трубу с катализатором 8.1 и гидрозатвор 8, очищаются, образуют жидкие углеводороды 15 и поступают через газоотводную трубу с катализатором 9.1 в гидрозатвор 9 измерительный, где также образуют слой жидких углеводородов 15. Охлажденный и очищенный топливный газ компрессором 10 закачивается в ресивер 11, откуда подается потребителю через вентиль 12. После прекращения процесса пиролиза полученные отделенные от газа жидкие углеводороды 15 через приемники 13, 14 насосом 16 подаются в форсунку 17. Кислотно-органические фракции из отстойника 7 гравитационно поступают в термореактор 1 через патрубок с вентилем 18 и попадают на термоактивный уголь. При этом реагентами, подаваемыми через форсунку 17 и патрубок 18, осуществляется ворошение биомассы и пирокарбона. Поверхность угля увеличивается, он становится более активным. Углерод, отбирая кислород у кислотно-органических фракций, превращает их в топливные газы. Процесс пиролиза жидких составляющих повторяется [2,3]

Литература

1. Патент 2644908 (РФ) C10B 53/02 (2006.01) Способ получения сорбента органических соединений / Михайлов О.Ю., Исьемин Р.Л., Кузьмин С.Н., и др.;заявлено 15.11.2016; опубл. 14.02.2018.

2. Родионов А.С. «Традиционная и инновационная наука: история, современное состояние, перспективы». УСТАНОВКА ПИРОЛИЗА ШАХТНОГО ТИПА. с. 7-9.

3. Родионов А.С. «Интеллектуальный потенциал общества как драйвер инновационного развития науки». КОНВЕКТИВНАЯ СУШКА ДРЕВЕСНЫХ ОТХОДОВ. с. 7-9.

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ ФИЛЬТРАЦИИ ОСАДИТЕЛЬНЫХ ЦЕНТРИФУГ ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВ

Хамидуллина Дина Александровна
Кондрашева Светлана Геннадьевна
Лашков Вячеслав Александрович

КНИТУ (КХТИ), 420015, Казань, ул. К.Маркса, 68

В связи с особенностью производства бумаги и картона целлюлозно-бумажная промышленность относится к крупным водопотребителям. В технологическом цикле образуются сточные воды, содержащие взвешенное волокно, которое необходимо выделять из суспензии. Для улавливания волокнистой массы используются способы механической очистки, наиболее практичным из которых является очистка в поле действия центробежных сил. В работе рассматриваются вопросы повышения эффективности процесса разделения малоконцентрированных суспензий в осадительных центрифугах. С этой целью была разработана конструкция осадительной центрифуги с фильтрующими элементами. Благодаря этому, жидкость беспрепятственно отфильтровывается через волокнистый наполнитель, а волокнистая массы за счет оказываемого сопротивления наполнителя отфильтровывается с замедлением скорости, т.е. обеспечивается сгущение твердой фазы.

Ключевые слова: целлюлоза, малоконцентрированные суспензии, осадительная центрифуга, фильтрующие элементы.

In connection with the peculiarity of the production of paper and cardboard, the pulp and paper industry is one of the largest water consumers. In the technological cycle, wastewater containing suspended fiber is formed, which must be separated from the suspension. To capture the fibrous mass, mechanical cleaning methods are used, the most practical of which is cleaning in the field of centrifugal forces. The paper deals with the issues of increasing the efficiency of the process of separating low-concentration suspensions in settling centrifuges. For this purpose, a design of a settling centrifuge with filter elements was developed. Due to this, the liquid is filtered unhindered through the fibrous filler, and the fibrous mass is filtered out at a slower speed due to the resistance of the filler, i.e. thickening of the solid phase is ensured.

Key words: cellulose, low-concentration suspensions, settling centrifuge, filter elements.

В процессе производственно-хозяйственной деятельности многие предприятия потребляют большое количество воды, которая используется для самых разнообразных целей: охлаждения, промывки, замочки, увлажнения, в качестве гидротранспорта и в составе производимой продукции.

В связи с особенностью производства бумаги и картона целлюлозно-бумажная промышленность относится к крупным водопотребителям. Целлюлозу в технологическом процессе многократно промывают водой и, кроме того, вода используется для транспортировки получаемой волокнистой массы на различные технологические операции. При подаче ее на бумагоделательную машину в составе суспензии 99% воды и 1% волокна. На современных заводах по производству небеленой целлюлозы (бумаги), из которой делают облицовочный картон, расход воды может составлять 42 $м^3$/т, а на заводах, где производят беленую целлюлозу (бумагу) - 63-83 $м^3$/т.

Предприятия с таким потреблением воды проектируются по принципу оборотной системы водоснабжения с замкнутым циклом.

Однако, несмотря на наличие очистных сооружений в системе оборотного водоснабжения, на целлюлозно-бумажных предприятиях образуются сточные воды, содержащие взвешенное волокно, источниками которых являются стадии промывания, сортирования, многократного разбавления и сгущения.

Для улавливания волокон целлюлозы на предприятиях используются способы механической очистки (фильтрование, центрифугирование), мембранные технологии и т.п.

Наиболее практичным способом, рассчитанным на большое количество оборотной воды, является очистка в центробежном поле (осадительных и фильтрующих центрифугах).

В литературе конструкции осадительных и фильтрующих центрифуг представлены достаточно широко [1-4] и предназначены они для достижения определенных целей. Например, для перемешивания слоев крупных и мелких частиц шнеком, что улучшает фильтрационные свойства осадка и регулирования соотношения количества и размера частиц в потоках разделенной суспензии [3]; для предотвращения разбивания агломератов или отдельных частиц твердой фазы при ее движении в сторону зоны разделения и соответственно повышения качества легкой фазы за счет уменьшения содержания в ней твердых частиц [4].

Однако, перечисленные центрифуги малоэффективны при выделении тонкодисперсных волокон целлюлозы из малоконцентрированных сточных вод целлюлозно-бумажных производств. Это объясняется рядом причин: взмучиванием волокнистой массы в потоке жидкости при взаимодействии с радиальными перегородками; неэффективным предварительным разделением суспензий, содержащих высокодисперсную твердую фазу, состоящую из волокон со значительным разбросом размеров; перемешиванием суспензии в раскручивающим устройстве перед выходом на разделение.

Для повышения эффективности разделения высокодисперсных суспензий (сточных вод целлюлозно-бумажных производств) с низким содержанием твердой фазы с учетом результатов математического моделирования [5] и инженерного анализа в системе APM WinMachine [7, 8] разработана осадительная центрифуга с фильтрующими элементами [9] (рис.1).

Осадительная центрифуга включает цилиндроконический ротор 1 с окнами для отвода фугата 2 и осадка 3. Внутри ротора с кольцевым зазором установлен шнек, состоящий из цилиндроконического барабана 4 с отверстиями 5 для прохода исходной суспензии и закрепленных на нем витков 6. Внутри барабана расположена питающая труба 7. Отверстия 5 снабжены перфорированными камерами 8, размещенными с наружной стороны барабана 4, и по высоте, не превышающими высоту витков шнека 6. Камеры 8 заполнены наполнителем 9, выполненным в виде волокон, и через перфорацию сообщены с кольцевым зазором.

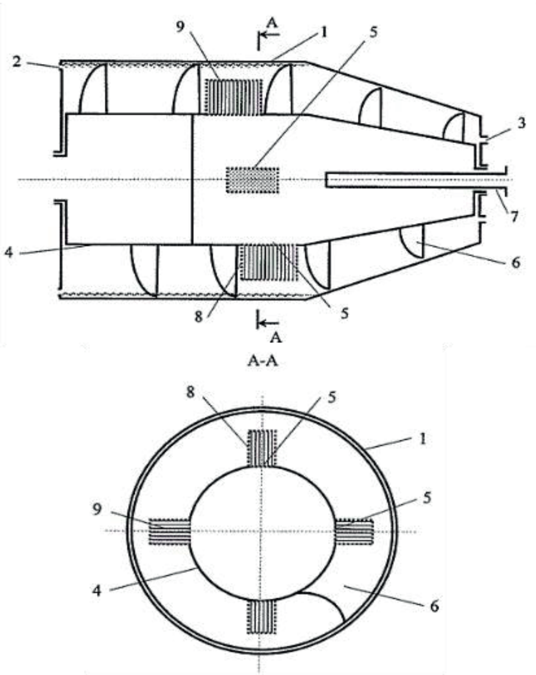


Рис.1. Осадительная центрифуга с фильтрующими элементами

Волокна сориентированы по радиусу ротора и имеют толщину 0,05-0,08 мм. Удельное количество волокон в перфорированных камерах составляет 450-500 шт/см^2.

Осадительная центрифуга работает следующим образом. Внутрь вращающегося шнека при вращающемся цилиндроконическом роторе 1 центрифуги по питающей трубе 7 подают исходную суспензию. Суспензия через отверстия 5 в цилиндроконическом барабане 4 поступает в перфорированные камеры 8.

Камеры заполнены волокнистым наполнителем 9, волокна которого имеют определенную плотность заполнения, радиальную ориентацию в кольцевом зазоре между шнеком и ротором и обладают заданными размерами. Благодаря этому, жидкость беспрепятственно отфильтровывается при прохождении суспензии через волокнистый наполнитель в поле действия центробежных сил, а тонковолокнистая фаза за счет оказываемого сопротивления наполнителя – с замедлением скорости. В перфорированных камерах 8 осуществляется сгущение твердой фазы. Жидкая фаза, как более легкая, отводится из осадительной центрифуги через окна 2, а твердая фаза витками шнека 6 удаляется с внутренней поверхности ротора 1 через окна 3.

Экспериментальные исследования по очистке в центробежном поле сточных вод целлюлозно-бумажных производств с объемным содержанием твердой фазы 12-15% (целлюлозные волокна и микрофибриллы) позволили выявить влияние параметров наполнителя на степень разделения малоконцентрированных суспензий.

При толщине волокон 0,05 мм и плотности заполнения 450 шт/см^2 остаточное количество твердой фазы составляет 3%, что повышает степень разделения в 4-5 раз. Уменьшение толщины волокон и увеличение плотности заполнения приводит к увеличению сопротивления волокнистого наполнителя и его засорению без повышения степени разделения суспензии.

При толщине волокон 0,08 мм и плотности заполнения 400 шт/см^2 остаточное количество твердой фазы составляет 5%, что повышает степень разделения в 2,4-3 раза. Увеличение толщины волокон и уменьшение плотности заполнения снижает степень очистки малоконцентрированных суспензий.

Список литературных источников

1. Лукьяненко В.М., Таранец А.В. Промышленные центрифуги. М.:, Химия, 1974. 376 с.

2. Шкоропад Д.Е., Новиков О.П. Центрифуги и сепараторы для химических производств. М.: Химия, 2010. 256 с.

3. Осадительная центрифуга: Авт. св-во 1446740 СССР. № 4100016/13 / Шевелин Б.П., Евстюнин В.А., Попов В.А.; заявл. 27.08.86; опубл. 15.12.94. 8 с.

4. Осадительная центрифуга: Авт. св-во 1464354 СССР. № 4088056/13 / Снегин А.И., Шевелин Б.П.; заявл. 09.07.86; опубл. 30.11.94. 9 с.

5. Мухтаров Я.С., Суфиянов Р.Ш., Лашков В.А. Разработка математического описания процесса центробежного отделения жидкой фазы //

Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 7. С. 237-238.

6. Мухтаров Я.С., Суфиянов Р.Ш., Гданский Н.И., Лашков В.А. Моделирование процесса обращения с нефтезагрязненными грунтами // Вестник Казанского технологического университета. 2012. Т. 15. № 11. С. 201-204.

7. Лашков В.А., Кондрашева С.Г., Ганин Е.А. Расчет прочности валов машин с помощью расчетно-графического модуля APM SHAFT // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т. 19. № 7. С. 94-96.10.

8. Каратаев О.Р., Завьялова В.Е., Лашков В.А. Расчет параметров цепных передач в модуле APM Trans // Вестник Казанского технологического университета. 2016. Т. 19. № 12. С. 140-142.

9. Осадительная центрифуга: Пат. 2656330 Рос. Федерация. №2017123817/ Шакиров Р.И., Лашков В.А., Вавилов Ю.Г.; заявл. 05.07.2017; опубл. 04.06.2018, Бюл. №16. 11 с.

УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ УГЛЕРОДНЫХ НАНОТРУБОК ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Хантимеров Сергей Мансурович, Гарипов Ранис Рамисович,
Львов Сергей Глебович, Сулейманов Наиль Муратович

Казанский физико-технический институт им. Е.К. Завойского - обособленное структурное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Казанский научный центр Российской академии наук», 420029, г. Казань, ул. Сибирский тракт, д. 10/7

Аннотация. В работе продемонстрирована возможность улучшения электропроводящих свойств композиционных материалов на основе полимеров, легированных функционализированными углеродными нанотрубками. Было установлено, что эффективность электрического поля для управления перколяционной структурой возрастает по мере увеличения частоты поля и по мере снижения концентрации частиц наполнителя в полимерной матрице.

Abstract. The paper demonstrates the possibility of improving the electrically conductive properties of composite materials based on polymers doped with functionalized carbon nanotubes. It was found that the efficiency of the electric field for controlling the percolation structure increases with increasing the frequency of the field and with the decreasing of filler particles concentration in the polymer matrix.

Ключевые слова: углеродные нанотрубки, электропроводящий полимерный композиционный материал, перколяция, электрическое поле

Композиционные материалы на основе полимеров, легированных различными микро и нано частицами, находят свое применение в различных областях промышленности [1]. Интерес к таким материалам обусловлен высоким уровнем их функциональных свойств. В частности, при легировании диэлектрической полимерной матрицы проводящими мелкодисперсными частицами материал при определенной концентрации наполнителя приобретает перколяционный механизм проводимости [2]. Наиболее перспективными наполнителями в полимерные среды для создания электропроводящих композиционных материалов являются углеродные нанотрубки (УНТ). Благодаря уникальным физико-химическим свойствам, а также высокому аспектному соотношению (отношение длины к диаметру) УНТ, их добавление к полимерной матрице даже в количестве 0,1% вызывает повышение электропроводности полученного композита на несколько порядков.

Основной проблемой создания композиционных материалов с применением углеродных нанотрубок является сложность их распределения в объеме модифицируемого материала. Данная сложность обусловлена склонностью нанотрубок к агломерированию [3]. Агломерирование УНТ происходит из-за электростатического взаимодействия между собой поверхностей отдельных УНТ. Поэтому создание композиционных материалов с применением УНТ, в качестве модифицирующей добавки, требует создания методов предварительной обработки нанотрубок и методов их введения в матрицу материала.

Одним из эффективных методов предварительной обработки углеродных нанотрубок является термохимическая обработка. Термохимическая обработка позволяет с одной стороны снизить количество примесей в материале, с другой – снизить поверхностную энергию УНТ за счет прикрепления различных функциональных групп к поверхности нанотрубок. Однако, в зависимости от условий термохимической обработки УНТ электропроводность композиционного материала может улучшаться или ухудшаться по сравнению с материалом на основе необработанных нанотрубок, что было показано в нашей прошлой работе [4]. Кроме того, было показано, что концентрационная зависимость электропроводности композиционного материала на основе функционализированных углеродных нанотрубок (фУНТ) имеет нелинейный характер. При этом электропроводность образцов была однородной во всем объеме образца.

В некоторых случаях могут быть востребованы комозиционные материалы с неоднородным распределением частиц наполнителя для создания в материале направлений низкой и высокой проводимости. Для создания таких неоднородностей и управления распределением углеродных в полимерной матрице могут эффективно применяться постоянные и переменные электрические поля, прикладываемые к композиционному материалу в процессе его формирования. Такой подход благодаря переориентации и перераспределению УНТ позволяет улучшать электропроводящие свойства композиционного материала в несколько раз при заданной концентрации проводящих частиц (Рис.1).

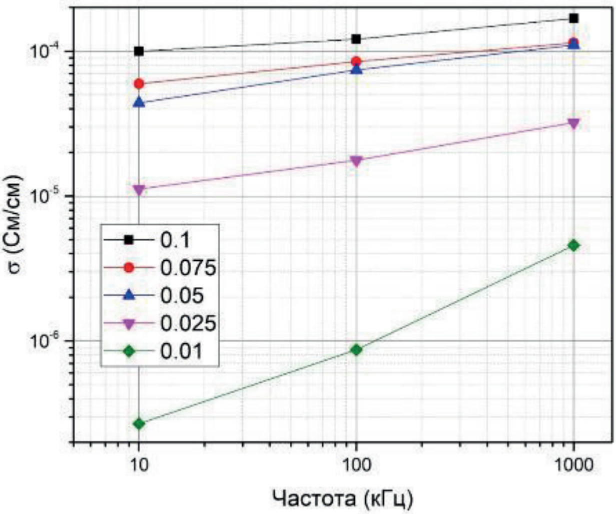


Рис. 1. Электропроводность образцов композиционного материала при различных концентрациях и частотах электрического поля

Из рисунка видно, что по мере увеличения частоты электрического поля и по мере снижения концентрации углеродных нанотрубок повышается эффективность внешнего электрического поля.

Таким образом, в работе продемонстрирована возможность улучшения электропроводности композиционного материала за счет управления распределением и ориентацией углеродных нанотрубок в полимерной матрице.

Работа выполнена за счет средств Государственного задания ФИЦ КазНЦ РАН.

Литература

1. Song, J. H.; Min, S. H.; Kim, S. G.; Cho, Y.; Ahn, S. H. Multi-Functionalization Strategies Using Nanomaterials: A Review and Case Study in Sensing Applications. Int. J. Precis. Eng. Manuf-Green. Technol. [Online early access]. DOI: 10.1007/s40684-021-00356-1. Published Online: May 10, 2021.

2. Abdulhameed, A.; Wahab, N. Z. A.; Mohtar, M. N.; Hamidon, M. N.; Shafie, S.; Halin, I. A. Methods and Applications of Electrical Conductivity Enhancement of Materials Using Carbon Nanotubes. J. Electron. Mater. 2021, 50, 3207–3221.

3. Shehzad, K.; Hussain, T.; Shah, A. T.; Mujahid, A.; Ahmad, M. N.; Sagar, R. u. R.; Anwar, T.; Nasir, S.; Ali, A. Effect of the Carbon Nanotube Size Dispersity on the Electrical Properties and Pressure Sensing of the Polymer Composites. J. Mater. Sci. 2016, 51, 11014–11020. DOI: 10.1007/s10853-016-0322-9.

4. Garipov, R. R.; Khantimerov, S. M.; L’vov, S. G.; Shustov, V. A.; Kurbatova, N. V.; Suleimanov, N. M. Effect of Thermochemical Treatment on the State of SWNT and on the Electrical Conductivity of epoxy-SWNT Composites. Fuller. Nanotub. Carbon Nanostruct. 2021, 29, 251–257.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НЕФТЕГАЗОХИМИЧЕСКИХ ПРОИЗВОДСТВ

Харламов Илья Евгеньевич, Валеев Сергей Ильдусович

Казанский национальный исследовательский технологический университет (ФГБОУ ВО КНИТУ), г. Казань
vsi73@mail.ru

Аннотация: Проведены исследования дефекта типа «расслоение» в зависимости от глубины его залегания на возможную безопасную эксплуатацию технологического оборудования методом конечных элементов с помощью программного комплекса ANSYS. По результатам исследований установлено, что расслоение не оказывает влияния на несущую способность оборудования, пока оно локально и не распространяется.

Abstract: Studies of a defect of the "stratification" type, depending on the depth of its occurrence, have been carried out on the possible safe operation of technological equipment by the finite element method using the ANSYS software package. According to the results of the research, it was found that the stratification does not affect the load-bearing capacity of the equipment, as long as it is local and does not spread.

Ключевые слова: срок службы, дефект, метод конечных элементов, эксплуатация, авария.

В настоящее время оборудование потенциально опасных химических, нефтехимических, нефтегазоперерабатывающих производств изношено на 80-90 %. Это приводит к снижению надежности и долговечности оборудования и в свою очередь к повышению аварийности на производстве [1,2,4,8,9].

Оборудование нефтехимических, нефтегазоперерабатывающих производств изготавливается в основном из различного вида металлов. Причины возникновения аварийных ситуаций связаны в основном с образованием и развитием дефектов, которые могут появиться не только при эксплуатации, но и изначально присутствовать в металле оборудования, не замеченном при входном контроле [2,3,7,10]. Все это может привести к разгерметизации технологического оборудования, выбросу и проливу взрывопожароопасных веществ.

Причинами дефектов и разрушения материалов могут быть причины металлургического характера, когда имеются дефекты в заготовках.

Одним из наиболее опасных дефектов металлургического происхождения, приводящий к авариям, является трещиноподобный дефект типа расслоение основного металла или сварного соединения [1,4,10].

В общем случае расслоение-нарушения сплошности внутри прокатанного металла, представляющие собой раскатанные крупные дефекты слитка (глубокие усадочные раковины, усадочная пористость, скопления пузырей или неметаллических включений). Характерным для расслоения является то, что поверхность нарушения сплошности параллельна плоскости прокатки, раскатанные скопления неметаллических включений дают внутреннюю прослойку, разделяющую лист или профиль на две, три или более частей.

Обычно эксплуатация такого оборудования разрешается при условии ремонта дефектного участка с применением сварки или периодического обследования дефектного участка неразрушающими методами с целью контроля увеличения размеров расслоения, если размеры и расположение расслоения не позволяет произвести его ремонт [7]. Проведение периодического контроля процесс дорогой и трудоемкий, особенно в случае невозможности вывода оборудования из технологического процесса.

При принятии решения о дальнейшей эксплуатации оборудования с дефектом типа расслоение необходимо учитывать в первую очередь глубину его залегания и направленность.

Известные экспериментальные данные не позволяют дать количественную оценку характеристик разрушения элемента, имеющего расслоение. Для аналитических методов эта задача представляет определенную трудность. Перспективным в этом отношении являются численные методы, среди которых ведущая роль отводится методу конечных элементов.

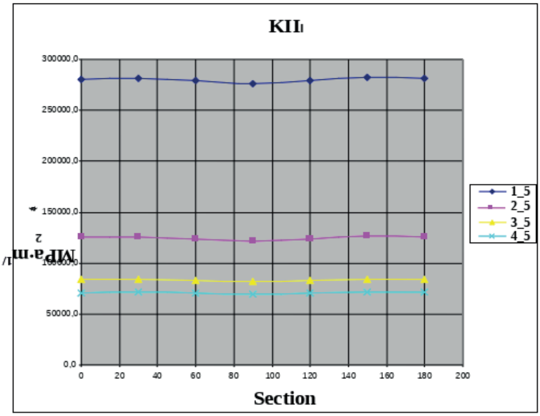


Рис. 1 Расчетные значения коэффициента интенсивности напряжения KII для различных глубин залегания расслоения.

При оценке безопасной эксплуатации элемента оборудования с расслоением необходимо, прежде всего, оценить возможность его хрупкого разрушения или сопротивление хрупкому разрушению, так как разрушения этого вида особенно опасны. Основным критерием для анализа хрупких и квазихрупких разрушений (температура эксплуатации не превышает первую критическую температуру) является коэффициент интенсивности напряжений КИН [5,6,10].

Расслоение дефект трещиноподобный, отличается от других дефектов этого типа (трещин нормального отрыва) своим особенным расположением в металле. Как уже отмечалось выше, этот дефект располагается параллельно поверхности стенки элемента. Над силами нормального отрыва берегов расслоения значительно преобладают силы продольного и поперечного сдвига.

Для подтверждения этого утверждения проведены исследования конечно-элементной модели обечайки с расположенными в ней расслоениями. Размеры обечайки и внутреннее давление постоянны.

Расчет напряженно-деформированного состояния и вычисление коэффициентов интенсивности напряжений выполнены методом конечных элементов с помощью программного комплекса ANSYS [3,5,6,10]. Рассмотрена модель половины обечайки с записью соответствующих граничных условий на плоскости симметрии. Для имитации реакции днищ к торцевым плоскостям прикладывались соответствующие растягивающие напряжения. Расслоения моделировались на разных глубинах залегания. Расслоения моделировались параллельно поверхности обечайки. Не учитывалось влияние концентраторов напряжений (швов, штуцеров, опор и т.д.). Для создания правильной сетки в области фронта расслоения использовались 2-D элементы со смещенными центральными узлами (с целью реализации функции формы с корневой особенностью) PLANE82 и 3-D элементы SOLID186 с добавлением контактных элементов CONTA174 и TAR

Решалась нелинейная контактная статическая задача без учета пластических деформаций в зоне фронта трещины.

На рисунках 1 показаны расчетные значения коэффициентов интенсивности напряжения (КИН) KII (для KI, KIII графики не показаны) для 7 точек вдоль фронта круглого расслоения расположенных через каждые 30 град от 0 до 90 град относительно оси расслоения, проходящей по нормали к плоскости через его центр. Значения получены при различных глубинах залегания расслоения для отношений глубины залегания к толщине стенки от 1/5 до 4/5. Аналогичные расчеты проведены для коэффициентов интенсивности напряжения (КИН) KI, KIII.

По результатам расчетов установлено, что максимальные значения относительно других коэффициентов интенсивности напряжения достигают коэффициенты интенсивности напряжения второго типа-RII (трещина продольного сдвига) расположенная ближе к внутренней стенке обечайки.

Таким образом при прочих равных условиях преобладают коэффициенты интенсивности напряжения второго RII типа, которые в свою очередь достигают максимальных значений для расслоений, расположенных ближе к внутренней стенке обечайки.

Проведенные исследования подтверждают [4], что расслоение не оказывает существенного влияния на несущую способность оборудования, пока оно локально и не распространяется.

Список литературы

1. Алексеев В.А. и др. Некоторые аспекты обеспечения промышленной безопасности опасных объектов / В.А. Алексеев, С.И. Валеев, П.В. Вилохина, М.А. Зотов, Л.Н. Москалев, А.А. Назаров, А.С. Поникаров, А.С. Поникарова, И.Н. Поникарова Поникаров С.И., Салин А.А., Салина А.А., Старовойтова Е.В., Теляков Э.Ш., Хоменко А.А. - Казань. - АН РТ, 2019. - с.160.

2. Валеев С.И. Прочность элементов оборудования длительное время находящегося в эксплуатации / С.И. Валеев, Н.В. Пластинкин // Фундаментальные основы механики. -2018.-№3.-С.129-130.

3. Валеев С.И. Эксплуатация технологического оборудования на опасном производственном объекте / С.И. Валеев // Современные проблемы теории машин.-2020.-№ 9.-С. 50-52.

4. Исследование расслоений различной формы и ориентации в обечайке с определением параметров трещиностойкости / И.Е. Харламов [и др.] // Вестник Казанского технологического университета.-2014.-Т. 17.-№ 20.-С. 267-269.

5. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера. Практическое руководство / А. Б. Каплун, Е. М. Морозов. М. А. Олферьева // М.: Едиториал, УРСС. – 2003. – 272 с.

6. Морозов Е.М. Методы конечных элементов в механике разрушения / Е.М. Морозов, Г.П. Никишков.- М.: «Наука» Главная редакция физико-математической литературы, 1980.-256 с.

7. Монтаж, техническая диагностика и ремонт основного технологического оборудования химических производств и нефтегазопереработки / И.И. Поникаров [и др.]. -Казань: Изд-во Академии наук РТ,-2018.-798 с.

8. Нгуен Ван Ань, Москалев Л. Н., Поникарова И.Н., Поникаров С. И. Компьютерное моделирование температурных напряжений в технологических сосудах в мкстах врезки штуцеров в SolidWorks / Вестник технологического университета.2019, т.22, в7, с. 144-150.

9. Нгуен Ван Ань, Москалев Л. Н., Поникаров С. И. Исследования напряжений в месте пересечения штуцера малого диаметра с обечайкой в условиях нестационарного нагрева / Машиностроение и техносфера XXI века // Сборник трудов XXVIII международной научно-технической конференции. – Донецк: ДонНТУ, 2021. – с.360-363.

10. Valeev S.I, Kharlamov I.E. Determination of powerful active zones of petrochemicai equipment / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019, т.537, в.032059, с.1-5.

ТЕХНОЛОГИЯ РЕВЕРСИВНОГО ИНЖИНИРИНГА В НЕФТЕХИМИЧЕСКОМ МАШИНОСТРОЕНИИ

Юрченко Яна Александровна - студент кафедры ХТПНГ КНИТУ, YanaYurchenko0407@gmail.com;

Мухаметзянова Асия Габдулматизовна - доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой - Кафедра «Инженерной компьютерной графики и автоматизированного проектирования» КНИТУ, Asia@kstu.ru.

Описан проект реверсивного инжиниринга действующего оборудования утилизации нефтешламов, выполненного силами рабочей группы, состоящей из преподавателя-наставника и студентов, успешно освоивших цикл графических дисциплин.

The project of reverse engineering of the existing oil sludge disposal equipment, carried out by a working group consisting of a teacher-mentor and students who have successfully mastered the cycle of graphic disciplines, is described.

Ключевые слова: Реверсивный инжиниринг, CAD-модель, оборудование для утилизации нефтяных отходов, нефтешламы, машиностроение.

В настоящее время всё большее развитие получают технологии реверсивного инжиниринга, которые при помощи специальных комплексов аппаратных и программных средств позволяют получать трёхмерные CAD-модели материальных объектов. Полученные модели служат основой создания проектной документации объекта, его анализа, копирования или воспроизведения с внесением изменений.

Аппаратными средствами технологий реверсивного ижиниринга являются 3D сканеры, 3D принтеры, компьютеры для сбора и обработки полученной информации и создания CAD-модели объекта.

Технологии реверсивного инжиниринга чрезвычайно востребованы в следующих случаях:

- утеряна документация с первоначального проекта (касается в первую очередь советских разработок);
- первоначальный производитель снял оборудование с производства, но продукт нужен покупателям;
- на основе длительного использования оборудования необходимо улучшить его качественные характеристики и устранить ставшие понятными со временем дефекты;
- получить преимущество на рынке, изучив конкурентов и таким образом улучшив свой продукт;
- производители оригинального оборудования отказываются поставлять комплектующие и запасные части для обслуживания и ремонта по политическим мотивам;

- создание собственного продукта в рамках программ импортозамещения;
- восстановление изношенных или вышедших из строя деталей;
- сохранение информации об оборудовании для его дальнейшего ремонта или воспроизведения.

По запросу частной компании [1], осуществляющей комплекс услуг по сбору, транспортированию, утилизации, обезвреживанию промышленных отходов с учетом всех современных технических и экологических требований, кафедрой «Инженерная компьютерная графика и автоматизированное проектирование» Казанского национального исследовательского технологического университета (ИКГАП КНИТУ) технологии реверсивного инжиниринга были применены к оборудованию для утилизации и обезвреживания нефтяных отходов.

Для выполнения проекта по обратному инжинирингу оборудования утилизации нефтешламов была создана рабочая группа из преподавателя-наставника и студентов, успешно освоивших цикл графических дисциплин [2]. Цель взаимодействия преподавателя и студентов - создать условия для развития у студентов новых возможностей. Наставник выступает не только в роли катализатора процесса, он помогает создать индивидуальный вектор личностного развития студента. В данном случае, речь идет не просто о передаче опыта эксплуатации оборудования и его проектирования, а в создании условий для расширения горизонта видения новых возможностей и формирования нового мышления, что позволяет научить студентов применять свои практические навыки для самореализации и саморазвития, ставить перед собой и успешно решать новые задачи.

Реверс инжиниринг противоположен прямому проектированию и состоит из следующих этапов:

1. Сбор информации об объекте реверс-инжиниринга, анализ функциональных характеристик оборудования;
2. Выезд на месторасположение объекта для проведения замеров;
3. Перевод реального физического объекта в виртуальную трехмерную модель (3D CAD-модель);
4. Выпуск конструкторской документации по ЕСКД.

Реверс-инжиниринг оборудования, состоящего из множества деталей и узлов - это не простое копирование, а полноценный творческий процесс, предполагающий кроме обратной разработки всех деталей и узлов оборудования, также понимание технологий, принципа работы, использование конструкторской смекалки, опыта, умение соединять все части механизма так, чтобы добиться обеспечения заданных характеристики работы оборудования.

Перед выездом на месторасположение оборудования рабочей группой проекта были изучены способы утилизации нефтешламов, их преимущества и недостатки. Подробно была изучена информация об организации, заинтересованной в выполнении проекта. На сайте этой организации отмечается, что миссией компании является установка и поддержание высоких стандартов производства, путем сохранения и улучшения экологического состояния окружающей среды, а также разработка новых технологий и их совершенствование. Компания использует термические установки для утилизации нефтяных шламов и еще более 250 видов отходов.

Установка утилизации нефтесодержащих отходов состоит из блока загрузки нефтешлама, барабана сжигания нефтешлама и модуля многоступенчатой очистки газов (рис.1).

Загружаемый нефтешлам попадает во вращающуюся камеру сгорания, где перемешивается за счет вращения барабана и встроенных лопастей. Возгорание перемешиваемого нефтешлама происходит за счет действия пламени горелки. Поддержание интенсивности горения, а также, удаление дыма происходит благодаря мощному дымососу. Дымовая масса проходит грубую очистку от пылевых частиц в циклоне. Отожженный грунт убирается из контейнера шнеком.

Заинтересованное предприятие [1] организовало выезд рабочей группы проекта на место расположения оборудования. Для сбора первичной информации об объекте чаще всего применяются бесконтактные оптические системы 3D сканирования, за исключением случаев, когда возможно замерить изделие универсальными инструментами (штангенциркулем и т.п.).

3D-моделирование выполнялось в системе трехмерного твердотельного поверхностного параметрического проектирования Inventor, крупнейшего в мире поставщика программного обеспечения для промышленного и гражданского строительства, машиностроения, рынка средств информации и развлечений Autodesk. Autodesk Inventor предназначен для создания цифровых прототипов промышленных изделий. Инструменты Autodesk Inventor обеспечивают полный цикл проектирования и создания конструкторской документации: 2D-/3D- моделирование; создание изделий из листового материала и получения их разверток; разработка электрических и трубопроводных систем; проектирование оснастки для литья пластмассовых изделий; динамическое моделирование; параметрический расчет напряженно-деформированного состояния деталей и сборок; визуализация изделий; автоматическое получение и обновление конструкторской документации по ЕСКД.

В настоящее время компании [1] переданы созданная и скорректированная, согласно требованиям, CAD-модель оборудования для утилизации и обезвреживания нефтешламов, и конструкторская документация модели в цифровом формате. Полученная CAD-модель может быть использована в CAE-системах при выполнении инженерных расчетов, в случае необходимости модернизации оборудования.

Рис.1. Установка утилизации нефтесодержащих отходов

Описанное взаимодействие университета и производственного предприятия не привело к ожидаемым конкретным финансовым результатам, что, возможно, объясняется отсутствием строгой формализации договоренностей о добровольной финансовой поддержке предприятием рабочей группы проекта. Но полагаясь на то, что для университета получение прибыли - не основная цель развития взаимодействия предприятия и университета, можно утверждать, что студенты, участвовавшие в выполнении задач реверсивного инжиниринга оборудования для утилизации и обезвреживания нефтешламов, получили знания и опыт, обеспечивающие формирование и развитие познавательной деятельности, способностей, умений и навыков инновационной инженерной деятельности, творческого мышления.

Литература

1. Официальный сайт [Электронный ресурс]. - Режим доступа: https://imgrt.ru/

2. А.Г. Мухаметзянова, А.И. Шигапов Обучение студентов машиностроительных направлений работе с профессионально-ориентированными компьютерными программами // В сборнике: Автоматизация и энергосбережение машиностроительного и металлургического производства: технология и надежность машин, приборов и оборудования. материалы XIV Международной научно-технической конференции. Вологда, 2020. С. 74-77.

СЕКЦИЯ № 4

«Энергетическое машиностроение. Электротехническое и теплоэнергетическое оборудование»

Модераторы:

Ахметова Ирина Гареевна – проректор по развитию и инновациям ФГБОУ ВО «КГЭУ», д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Экономика и организация производства»

Валеева Юлия Сергеевна – директор центра публикационной активности ФГБОУ ВО «КГЭУ», к.э.н., доцент, доцент кафедры «Экономика и организация производства»

Мингалеева Гузель Рашидовна – д.т.н., зав. кафедрой «Энергетическое машиностроение» ФГБОУ ВО «КГЭУ»

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СЕТОЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ЧИСЛЕННОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ОБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО МАШИНОСТРОЕНИЯ

Абдуллина А.А.,
студент кафедры «Экономика и организация производства»,

Зинуров В.Э.
аспирант кафедры «Теоретические основы теплотехники»,
Казанский государственный энергетический университет

При численном моделировании для улучшения оборудования энергетического машиностроения должен производится контроль качества сеточных элементов. Для этого необходимо рассмотреть критерии качества элементов расчетной сетки, основными из которых являются ортогональное качество (Orthogonal Quality), асимметрия (Skewness), качество элемента (Element Quality) и соотношение сторон (Aspect Ratio). Также необходимо учитывать предельные и рекомендованные значения критериев.

Abstract. In numerical modeling, in order to improve the equipment of power engineering, quality control of grid elements should be carried out. To do this, it is necessary to consider the quality criteria of the elements of the calculated grid, the main of which are Orthogonal Quality, Skewness, Element Quality and Aspect Ratio. It is also necessary to consider the specific and recommended values of the criteria.

Ключевые слова: численное моделирование, качество сеточных элементов, энергетическое машиностроение, сеточная модель.

Key words: numerical modeling, quality of grid elements, power engineering, grid model.

В настоящее время интенсивное развитие энергетического машиностроения осуществляется при помощи численного моделирования. Например, в работах [1, 2] рассматриваются методики моделирования методом конечных элементов конструкций энергетических котлов. Показано, что предложенные методики апробированы в ходе проектирования при моделировании напряженно-деформированного состояния энергетических котлов с производительностью от 100 до 1710 тонн пара в час. В [3] работе представлено CFD-моделирование потока, реагирующего с воздухом и водородом, внутри диффузионной камеры сгорания с одним валом газовой турбины. На надежность компонентов, предназначенных для работы на природном газе, могут повлиять температуры, сосредоточенные на стенках и на входе в турбину. Также в [4] работе с помощью прямого численного моделирования был изучен несжимаемый поток во впускной трубе двигателя внутреннего сгорания лабораторного масштаба. Было обнаружено, что поток может очень быстро стать турбулентным в зависимости от профиля притока, установленного на входе в трубу, даже несмотря на то, что не было добавлено никакой дополнительной преграды для имитации турбулентных колебаний скорости [5, 6].

Однако для проведения достоверных исследований необходимо качественно подготавливать сеточную модель. Для этого есть множество различных критериев, например, асимметрия (Skewness), параллельное отклонение (Parallel Deviation), коэффициент деформации (Warping Factor), соотношение сторон (Aspect Ratio) и др. Наиболее важными из них являются ортогональное качество (Orthogonal Quality), асимметрия (Skewness), качество элемента (Element Quality) и соотношение сторон (Aspect Ratio). Рассмотрим их поподробнее.

1.Ортогональное качество (Orthogonal Quality) – величина, показывающая насколько близко между собой значение углов к идеальному. Значение данного критерия вычисляется по следующей формуле: $\text{Ортогональное качество} = \cos \vec{C}_i \vec{A}_i$, где $\vec{A}_i$ - вектор нормали для каждой стороны нашей фигуры; $\vec{C}_i$ - вектор от центра нашей фигуры до центров соседних фигур(граней). Оно может принимать значение от 0 до 1, где 0 – наихудшее значение, а 1 – наилучшее. Также принято рекомендованное значение, являющимся больше 0.6.

2. Асимметрия (Skewness) – показатель отклонения нашей фигуры от идеальной, то есть четырехугольника с углами по 90^0, треугольника – 60^0. Значение данного критерия вычисляется по следующей формуле: $\text{Асимметрия} = \frac{\text{Оптимальный объем - Размер ячейки}}{\text{Оптимальный объем}}$, где оптимальный объем – объем идеальной фигуры, но с тем же радиусом, описанной окружности, лежащей в основании фигуры, м^3; размер ячейки – объем нашей фигуры, м^3. Оно может принимать значение от 0 до 1, где 1 – наихудшее значение, а 0 – наилучшее. Также принято рекомендованное значение, являющимся меньше 0.5.

3. Качество элемента (Element Quality) - показатель близости нашей фигуры к идеальной. Значение данного критерия для 3D фигур вычисляется по следующей формуле:

$$\text{Качество} = c \cdot \frac{\text{Объем}}{\sqrt{\left(\sum (\text{Длина ребра})^2\right)^3}}$$

, где c – постоянная величина для различных фигур. Оно может принимать значение от 0 до 1, где 0 – наихудшее значение, а 1 – наилучшее. Также принято рекомендованное значение, являющимся больше 0.5.

4. Соотношение сторон (Aspect Ratio) – величина, показывающая насколько растянуты ячейки. Значение данного критерия для 3D фигур вычисляется по следующей формуле:

$$\text{Соотношение сторон} = \frac{\text{Максимальная длина}}{\text{Минимальная длина}}$$

, где максимальная длина – диагональ фигуры, м; минимальная длина – расстояние между 2 ближайшими плоскостями, считая от середины этих плоскостей, м. Оно может принимать значение от 1 до $+\infty$, где $+\infty$ – наихудшее значение, а 1 – наилучшее. Также принято рекомендованное значение, являющимся меньше 5.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-4522.2018.8.

Список литературы

1. Курепин М. П., Сербиновский М. Ю. Эффективные методики конечно-элементного моделирования сложных конструкций энергетического машиностроения //Современные наукоемкие технологии. – 2017. – №. 10. – С. 19-25.

2. Зинуров, В. Э. Численное и экспериментальное исследование сужающего устройства на основе трубы Вентури / В. Э. Зинуров, И. И. Насырова, К. Д. Вьюгова, И. Н. Мадышев // Вестник Технологического университета. – 2022. – Т. 25. – № 7. – С. 106-111. – DOI 10.55421/1998-7072_2022_25_7_106.

3. Hoffren J. Talonpoika, T., Larjola, J., & Siikonen, T.. Numerical simulation of real-gas flow in a supersonic turbine nozzle ring //J. Eng. Gas Turbines Power. – 2002. – Т. 124. – №. 2. – С. 395-403.

4. Giannakopoulos G. K. ., Frouzakis, C. E., Boulouchos, K., Fischer, P. F., & Tomboulides, A. G.. Direct numerical simulation of the flow in the intake pipe of an internal combustion engine //International Journal of Heat and Fluid Flow. – 2017. – Т. 68. – С. 257-268.

5. Giannakopoulos, G. K., Frouzakis, C. E., Boulouchos, K., Fischer, P. F., & Tomboulides, A. G. (2017). Direct numerical simulation of the flow in the intake pipe of an internal combustion engine. International Journal of Heat and Fluid Flow, 68, 257-268.

6.Салахова, Э. И. Исследование структуры газового потока в сепарационном устройстве с дугообразными элементами / Э. И. Салахова, А. В. Дмитриев, В. Э. Зинуров // Вестник Технологического университета. – 2022. – Т. 25. – № 5. – С. 60-64. – DOI 10.55421/1998-7072_2022_25_5_60.

ПРИМЕНЕНИЕ ЛАЗЕРНО-ОПТИЧЕСКОГО РЕГИСТРАТОРА АЭРОЗОЛЬНЫХ ЧАСТИЦ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ОЧИСТКИ ЦИКЛОВОГО ВОЗДУХА В ГТУ

Баженова Е.С. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), bale01@mail.ru

Кесель Л.Г. Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева (КНИТУ-КАИ), bak1951@yandex.ru

Аннотация: В работе представлены особенности применения лазерно-оптического регистратора аэрозольных частиц для диагностики степени очистки циклового воздуха на входе в компрессор газотурбинной установки.

Ключевые слова: Система очистки циклового воздуха ГТУ, комплексное воздухоочистительное устройство, кассетный фильтр очистки воздуха, дисперсность абразивных аэрозольных частиц, лазерно-оптический регистратор

Abstract. The paper presents the features of using a laser-optical aerosol particle recorder to diagnose the degree of purification of cyclic air at the inlet to the compressor of a gas turbine installation.

Key words: GTU cyclic air purification system, integrated air purifier, cassette air purification filter, dispersion of abrasive aerosol particles, laser-optical recorder

В практике эксплуатации газотурбинных установок (ГТУ) очистка циклового воздуха является одной из важнейших операций, обеспечивающих стабильность показателей их эффективности и надёжности. Требования нормативно-технической документации к качеству очистки циклового воздуха ГТУ имеют достаточно высокий уровень показателей очищенного воздуха [1], [2]. Согласно указанным требованиям воздухоочистительное устройство ГТУ должно обеспечивать очистку циклового воздуха до значения остаточной среднегодовой запылённости не более 0,3 мг/м^3, в том числе с концентрацией пыли с размерами частиц 20 мкм. не выше 0.03 мг/м^3.

Для очистки циклового воздуха в ГТУ используется достаточно большая номенклатура технических средств. Классификация конструктивных схем выполнения комплексных воздухоочистительных устройств (КВОУ) представлена на рисунке 1 [3].

В большинстве эксплуатируемых газотурбинных установок эффективность очистки циклового воздуха не контролируется в непрерывном режиме. Контролю подвергается только степень засорения фильтров очистки воздуха путём измерения их гидравлического сопротивления за счёт измерения перепада давления перед фильтрами и за ними. Этот контроль носит косвенный характер и не отражает действительной степени очистки циклового воздуха в воздушном тракте ГТУ, т.к. в силу конструктивных особенностей после фильтрации имеется ещё много элементов, способствующих загрязнению указанного воздуха.

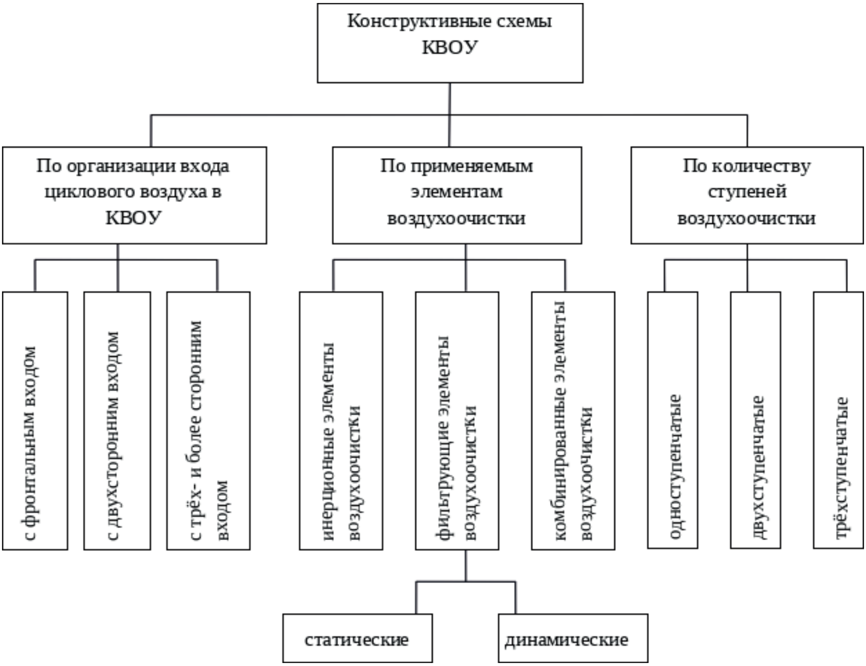


Рисунок 1. Классификация конструктивных схем выполненных конструкций КВОУ.

В связи с обширным характером номенклатуры исполнения конструктивных элементов КВОУ весьма актуальной является задача диагностики очистки циклового воздуха в ГТУ.

В настоящей работе предлагается использовать в качестве источника получения объективной информации о степени очистки циклового воздуха лазерно-оптический регистратор для определения концентрации и дисперсного состава пылевых частиц.

Структурная схема лазерно-оптического регистратора представлена на рисунке 2. Теоретические основы метода дистанционного зондирования представлены в работах [4], [5]. Задача определения оптических характеристик реального аэрозоля в общем случае решения не имеет.

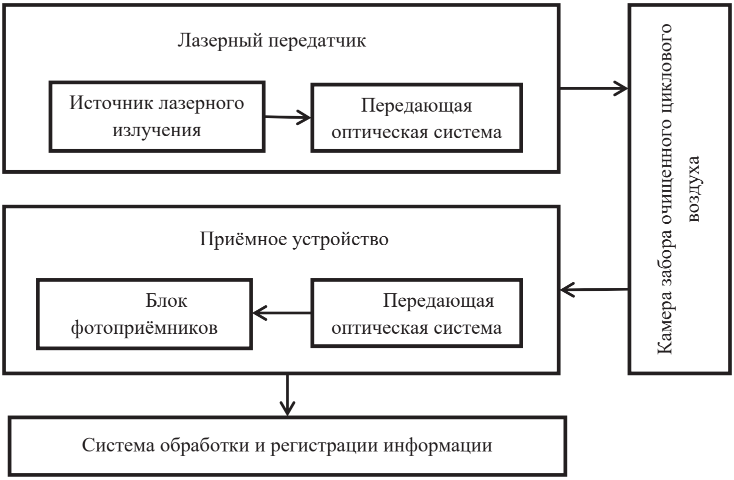


Рисунок 2. Структурная схема лазерно-оптического регистратора.

Основу структуры лазерно-оптического регистратора представляет лазерный передатчик, который содержит источник лазерного излучения и передающую систему. Лазерный луч проходит в контрольный объём камеры забора очищенного циклового воздуха ГТУ и воспринимается посредством передающей оптической системы на блок фотоприёмников. Информация с приёмного устройства передаётся на систему обработки и регистрации информации, которая преобразует её в диаграмму диапазонов дисперсности аэрозольных частиц, находящихся в очищенном цикловом воздухе. Система способна работать в автоматизированном режиме с заданным временным интервалом выполнения замеров.

Это даёт возможность получать информацию по остаточной запылённости циклового воздуха в непрерывном режиме и фиксировать экстремальные условия работы КВОУ, например – в случае срабатывания байпасных клапанов во всасывающей шахте воздухозаборного тракта.

Чаще всего совокупность аэрозольных частиц представляют в виде ансамбля однородных сферических частиц с одинаковыми химическими свойствами, распределение которых по размерам описывается функцией $f(a)$, а концентрация равна N_a, показатели ослабления, рассеяния и поглощения принято записывать в следующем виде:

$$\varepsilon = N_a \int_0^\infty (\pi a)^2 Q(\rho, m) f(a) da$$

$$\sigma = N_a \int_0^\infty (\pi a)^2 Q_p(\rho, m) f(a) da$$

$$k = N_a \int_0^\infty (\pi a)^2 Q_n(\rho, m) f(a) da$$

где Q, Q_p, Q_n факторы эффективности ослабления, рассеяния, и поглощения отдельной частицы. Функция $f(a)$ нормирована условием $\int_0^\infty f(a)da = 1$ и представляет собой плотность вероятности обнаружения частицы размером между a и $a + da$ в единице объёма:

$$f(a) = \frac{dN}{N_a da}$$

Реализация приведенной на рисунке 2 структурной схемы, кроме подбора соответствующего оборудования, включает в себя ряд достаточно серьёзных этапов, к числу которых относятся: тарировка системы по диапазонам дисперсности частиц, содержащихся в цикловом воздухе ГТУ после фильтрации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 54403-2011 Национальный стандарт РФ. Установки газотурбинные для привода турбогенераторов. Общие технические условия. ФГУП «Стандартинформ», М: 2012 г., 14с.

2. ГОСТ 54404-2011 Национальный стандарт РФ. Агрегаты газоперекачивающие с газотурбинным приводом. Общие технические условия. ФГУП «Стандартинформ», М.: 2012 г., 11с.

3. Кесель Л.Г., Милочкин В.А., Кесель Б.А. Квантово-электронный метод диагностики загрязнений газовоздушного тракта газотурбинного двигателя. Труды Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций» Самарский научно-исследовательский университет им. С. П. Королёва, 2022, С. 126-127.

4. Азаров В.Н. О концентрации и дисперсном составе пыли в воздухе рабочих и обслуживаемых зон предприятий стройиндустрии // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды: материалы международной конференции. Волгоград, 2003

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОГНЕСТОЙКОСТИ ДЕРЕВЯННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Гирфанов Артем Альбертович (аспирант, кафедра архитектуры и дизайна изделий из древесины, ФГБОУ ВО «Казанский национальный исследовательский технологический университет»)

Рассмотрены вопросы обеспечения огнезащиты деревянных строительных конструкций действующих промышленных зданий. В соответствии с требованиями контроля качества обработки разработана экспериментальная установка для исследования огнестойкости древесины.

The issues of fire protection of wooden building structures of existing industrial buildings are considered. In accordance with the requirements of quality control of the treatment, an experimental one has been developed to study the flame-retardant effectiveness of protective equipment.

Ключевые слова: древесина, огнезащита, пропитка.

Key words: wood, fire protection, impregnation.

Использование древесины в качестве строительного материала является актуальным даже в том случае, когда здание возводится с использованием других современных строительных материалов. При изготовлении внутренних дверных рам, перекрытий, крыш часто используют именно древесину. Благодаря хорошим физико-механические свойствам [1, 2] древесина применяется для изготовления несущих и ограждающих конструкций и при строительстве крупных композиционных конструкций, таких как стены, потолки и полы. Это объясняется тем, что при малой плотности древесные конструкции имеют несомненное преимущество при равной несущей способности.

Не смотря на достоинство, древесные конструкции имеют недостатки, обусловленные природным происхождением, такие как биологическое поражение, высокая гигроскопичность, и что немаловажно, высокая пожарная опасность [3]. Для повышения срока эксплуатации несущих и ограждающих деревянных конструкций, и обеспечения требуемого уровня пожарной безопасности применяются средства био- и огнезащиты.

К огнезащитным средствам относятся вспучивающиеся краски, а также огнезащитные средства и огнебиозащитные составы для поверхностной и глубокой пропитки изделий из древесины. При этом важным вопросом, связанным с использованием огнезащитного состава, является определение наличия антипиренов на деревянных строительных изделиях при осуществлении надзора за соблюдением требований пожарной безопасности на предприятии, а также при расследовании пожаров.

Согласно ГОСТ 53292-2009 «Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на её основе» необходимо соблюдать технологию обработки огнезащитным составом и осуществлять контроль качества выполняемых работ [4]. Особое внимание заслуживает защита деревянных конструкций промышленных зданий, находящихся в эксплуатации. Как известно, на сегодняшний день больше половины производственных зданий и сооружений промышленных предприятий являются постройками прошлого века и включают деревянные конструкции (перекрытия, опалубка, полы). Не смотря на значительный срок, они пригодны к эксплуатации при проведении качественных мероприятий по защите и повышению их огнестойкости. Определенную трудность при этом вызывают способы защиты от пожарной опасности деревянных конструкций, находящихся уже в эксплуатации. Очевидно, что существуют различия в механизме пропитки между «новыми» деревянными конструкциями и конструкциями, которые прослужили боле пяти десятков лет. Для подбора средств огневой защиты и методов их нанесения на эксплуатируемые объекты необходимо провести исследования огнестойкости различных древесных образцов.

В связи с этим разработана экспериментальная установка (рис. 1) для исследования различных по возрасту образцов древесины, позволяющая определить огнезащитную эффективность различных средств защиты. Установка состоит из источника тепла (1) газовой горелки с баллоном сжиженного газа; полированной трубы d=108x4 (сталь 12Х18Н10Т), высотой 350 мм с опорной конструкцией (2); крепления для образцов (3); двух преобразователей термоэлектрических НСХ с пределом измерения от 0 ^{0}С до 400 ^{0}С (4); прибора для фиксации температур ТМ5104 (5); исследуемого образца древесины (6).

Установка работает следующим образом. На контрольные образцы древесины в виде прямоугольных брусков размером 30×60 мм наносится определенный вид огнезащитного средства, после чего измеряется их начальная масса m_0. Далее образец помещают в предварительно разогретую до 200 ^{0}С трубу. Температура внутри трубы контролируется при помощи двух термопар. Образец находится в пламени в течение двух минут при постоянном расходе газа в течение этого времени. Далее подача газа в горелку прекращается, образец древесины остывает в трубе. После извлечения из установки? образец взвешивается и определяется его текущая масса m_i. Опыт повторяется до момента установления постоянной (конечной) массы образца $m_к$. По относительному изменению массы образца в результате проведенных испытаний устанавливается группа огнезащитной эффективности защитного средства, нанесённого на образец древесины.

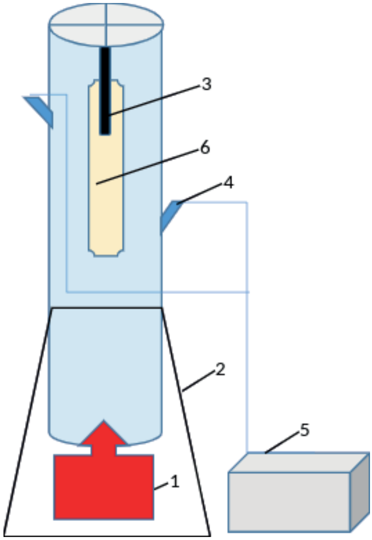


Рис.1. Экспериментальная установка для исследования огнестойкости древесины

При потере массы не более 9% устанавливается первая группа огнезащитной эффективности применяемого средства.

При потерях массы от 9 % до 25 % устанавливается вторая группа эффективности. При потере массы более 25 % считают, что данный состав не обеспечивает огнезащиту древесины и не является огнезащитным.

Полученные результаты будут использованы для исследований процессов пропитки деревянных строительных конструкций, находящихся в эксплуатации, и последующего усовершенствования способов нанесения на них огнезащитных средств.

Список использованных источников

1. Dietenberger M. Update for combustion properties of wood components. Fire Mater. 2002. 26(6):255–67.
2. M.H. Ramage et al. The wood from the trees: the use of timber in construction Renew. Sustain. Energy Rev. (2017) https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107
3. Desch HE, Dinwoodie JM. Timber structure, properties, conversion and use. London: Macmillan Education; 1996
4. ГОСТ 53292-2009 «Огнезащитные составы и вещества для древесины и материалов на её основе». Общие требование. Методы испытания.

АНАЛИЗ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА И ПРОДУКТОВ ЕГО ГОРЕНИЯ НА ГАЗОВЫХ ТУРБИНАХ ГТЭ НА ПРИМЕРЕ УРЕНГОЙСКАЯ ГРЭС

Аспирант Заитов Руслан Ильдарович Email: zaitov_ruslan@rambler.ru
Д.х.н., профессор Новиков Вячеслав Федорович Email: npo_aist@mail.ru
К.х.н., доцент Танеева Алина Вячеславовна Email: alinataneeva@mail.ru

ФГБОУ ВО «Казанский Государственный энергетический университет»

Аннотация: в статье рассмотрены экологические показатели ГТУ и соответствие этих показателей нормативам.

Описан перечень загрязняющих веществ, выбрасываемых в атмосферный воздух дымовыми трубами Уренгойской ГРЭС, а также произведен расчет объемов дымовых газов и максимально-разовых выбросов загрязняющих веществ из дымовых труб.

Ключевые слова: *газотурбинная установка, камера сгорания, выбросы оксидов азота, дымовые газы.*

Abstract: The article deals with the environmental performance of GTU and compliance of these indicators with the standards.

It describes the list of pollutants emitted into the atmospheric air by the chimneys of Urengoyskaya GRES, as well as calculates the volume of flue gases and maximum single emissions of pollutants from the chimneys.

Key words: gas turbine unit, combustion chamber, nitrogen oxide emissions, flue gases.

Введение. Газотурбинные и парогазовые установки – одни из самых перспективных энергетических установок для производства электрической и тепловой энергии. Их широкое применение позволило существенно повысить экономичность электростанций и улучшить их экологические характеристики.

Однако при работе газотурбинной установки необходимо выполнять технические требования по поддержанию заданной мощности, экологической чистоте, вибрации, шуму и др. При этом степень опасности загрязнений атмосферного воздуха оценивается значениями концентраций, рассчитанными при неблагоприятных метеоусловиях, в том числе при опасной скорости ветра, когда создаются наибольшие приземные концентрации вредных веществ. Вещества, которые поступают в окружающую среду вместе с отработавшими (выхлопными) газами, токсичны и включают в себя следующие химические соединения: оксид азот NO, диоксид азота NO2, оксид углерода CO, диоксид углерода CO2, оксиды серы SOx, углеводороды CnHm, аммиак NH3, летучие органические соединения. [1-3]

Важно отметить, что, в соответствии с программой импортозамещения мощностей, в России начали программу освоения производства современных отечественных энергетических газовых турбин класса ГТЭ-65 и ГТЭ-170 производства ОАО «Силовые Машины». На текущий момент в АО «Интер РАО

- Электрогенерация» филиала «Уренгойская ГРЭС» реализован проект парогазового энергоблока ПГУ-450 в составе:

- 2 газовых турбины типа ГТЭ-160 Ленинградского машиностроительного завода (ЛМЗ) с турбогенераторами переменного тока типа ТЗФГ-160- 2МУЗ (Электросила);
- 1 кондиционная паротурбинная установка типа К-180-8,0 (ЛМЗ) в комплекте с турбогенераторами переменного тока типа ТЗФГ-160- 2МУЗ (Электросила);
- 2 паровых котла-утилизатора типа П-96 завода им. Орджоникидзе (г. Подольск).

Для газотурбинных установок, работающих в составе ПГУ, удельные выбросы оксидов азота в дымовых газах при работе на газообразном топливе не должны превышать 50 мг/нм3 (при температуре 0°С, давлении 0,1013 МПа и объемной концентрации кислорода 15% или коэффициенте избытка воздуха α=3,5). Газотурбинные установки оснащены малотоксичными камерами сгорания, обеспечивающими на расчетных режимах выбросы оксида углерода СО <30 - 40 мг/ нм3. [4-5]

Основными источниками выбросов загрязняющих веществ блока ПГУ-450 являются две дымовые трубы.

При сжигании природного газа в камерах сгорания газовых турбин образуются азота диоксид, азота оксид, углерода оксид.

В таблице 1.1 приведен расчет объемов дымовых газов и максимально-разовых выбросов загрязняющих веществ из дыма. труб(топливо-газ) две ГТ с котлами-утилизаторами. Уренгойская ГРЭС.

Таблица 1.1

			Самая хол.5 дн.	Ср.t хол.мес.	Ср. год t	Абс.макс
			t = -56град	t = -26град	t = -7,8град	t =+34град
Расчет объемов, плотности и массы газов						
Теор. кол-во сухого воздуха	V_0	нм^3/ нм^3	9,528	9,528	9,528	9,528
Теор. Объема азота	V_0N_2	нм^3/ нм^3	7,534	7,534	7,534	7,534
Теор. объем трехатомных газов	VRO_2	нм^3/ нм^3	1,005	1,005	1,005	1,005
Теор. объем водяных паров	V_0H_2O	нм^3/ нм^3	2,161	2,161	2,161	2,161
Объем водяных паров	VH_2O	нм^3/ нм^3	2,4544	2,4728	2,4789	2,4989
Объем дымовых газов	Vг	нм^3/ нм^3	29,192	30,354	30,741	32,00
Плотность сухого прир. газа при н.у.	р	Кг/ нм^3	0,7286	0,7286	0,7286	0,7286
Масса дым.газов,отнесенная к 1нм^{3}природ.газа	Gг	Кг/ нм^3	36,941	38,435	38,932	40,550
Плотность дымовых газов при н.у. и «альфа»	Р ДГ(н.у.)	Кг/ нм^3	1,2655	1,2662	1,2665	1,2672
Плотность дымовых газов при tух и «альфа»	Р ДГ(tух)	Кг/ м^3	0,9020	0,9025	0,9027	0,9032

Таблица 1.1

Расчет расхода дымовых газов и скорости газов в дымовой трубе						
Расход дымовых газов при н.у. и а	Vг	нм^3/с	392,648	404,109	409,265	426,021
Расход дымовых газов при tyx и а (1котел)	Vyx	м^3/с	550,858	566,937	574,170	597,678
Суммарн. Расход дым.газов на n при tyx и а	Сумм Vyx	м^3/с	550,858	566,937	574,170	597,678
Расчет выбросов оксидов азота из дымовой трубы (n котлов) в атмосферу						
Стандартный избыток воздуха	а	доли	3,5	3,5	3,5	3,5
Объем сухих дымовых газов	Vсг	нм^{3}н/м^3	32,360	32,360	32,360	32,360
Расход сух. дым.газов при н.у и станд. “а” (n котлов)			435,251	430,810	430,810	430,810
Концентрация NOx в дым. газах при н.у и станд. “а”	C NOx	мг/ нм^3	50	50	50	50
Концентрация CO в дым. газах при н.у и станд. “а”	Cco	мг/ нм^3	18,6	18,6	18,6	18,6
Максимально-разовые выбросы от одного агрегата						
Максим-разовый выброс NOx из дымовой трубы	M NOx	г/с	21,763	21,540	21,540	21,540
Максимально-разовый выброс NO2 из дым. трубы	M NO2	г/с	17,410	17,232	17,232	17,232
Максимально-разовый выброс NO из дым. трубы	M NO	г/с	2,829	2,800	2,800	2,800
Максимально-разовый	M CO	г/с	8,096	8,013	8,013	8,013

Выводы. Проведен анализ влияния климатических факторов на экологические показатели выбросов загрязняющих веществ. Выбраны средние, самые холодные и самые высокие температуры при которых исследованы показатели выбросов загрязняющих веществ. Проведен расчет объемов дымовых газов, а также максимально-разовых и годовых выбросов загрязняющих веществ из дымовых труб(топливо-газ) работы газотурбинных установок в составе с котлами утилизаторами. Рассмотренные экологические показатели ГТУ соответствуют нормативным показателям.

Список литературы

1. Влияние давления на эмиссии NOx и устойчивости процесса горения МЭКС ГТ-110/ Л.А. Булысова, В.Д. Васильев, А.Л. Берне и др. // Электрические станции. – 2016. - №9.- С. 13-17.

2. Ауесбаев Е.Т., Майсутов Т.Б., Абушахманов К.И. Практика оценки экологической безопасности работы ГТУ // Вестник КазАТК, Алматы. – 2007. - №6. – С. 232-235.

3. Пчелкин Ю.М. Камеры сгорания газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1984. – 280с.

4. Руководство по эксплуатации газовых турбин ГТЭ-160 (Проект Уренгойская ГРЭС);

5. Муравьев И.К., Тверской Ю.С. Исследование на математической модели эффективности совместной работы газовой и паровой турбин энергоблока с ПГУ // Автоматизация в промышленности. – 2016. - №1 – С. 53-57.

СОБСТВЕННАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ТЕПЛОВОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ НА ОСНОВЕ РАЗРАБОТАННОЙ ГАЗИФИКАЦИОННОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ПТИЦЕВОДЧЕСКОЙ ОТРАСЛИ

Зиганшин Булат Гусманович
zigan66@mail.ru
ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет»

Фахреев Наиль Насихович
fakhreevnn@mail.ru
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Аннотация. Планомерный рост цен на энергоресурсы стимулирует предприятия для внедрения энергосберегающих технологий и оборудования. На ровне с энергосбережением на предприятиях агропромышленного комплекса остро стоит вопрос утилизации отходов. Решение первой задачи представляется в перевооружении предприятий с использованием энергосберегающих осветительных приборов, утепление помещений птичников и другие. Вторую задачу решают внесением органических отходов на сельскохозяйственные поля в качестве удобрения, но при условии достаточных площадей для внесения. Кроме выше изложенных решений авторами предлагается технология получения тепловой и электрической энергии из отходов производства, а именно отходов жизнедеятельности птицы. Такая установка, разработанная авторами, позволяет выработать синтез-газ с высокими теплотворными способностями тем самым снизить зависимость от внешних источников энергии, а также снизить экологическую нагрузку на окружающую среду в результате снижения объемов отходов и перевода их в удобрение с длительным сроком хранения.

Ключевые слова: синтез-газ, энергообеспечение, птицеводство, газификационная установка.

Технология газификации углеродсодержащего сырья осуществляется в режиме термической деструкции в синтез-газ при высоких температурах и значениях коэффициента избытка воздуха меньше стехиометрического.

Проведенные теоретические исследования по технологиям газификации наибольшую заинтересованность показала технология паровой газификации, т.е. с использованием в качестве газификационного агента – водяного пара, что позволяет получить водород с концентрацией порядка 35 – 47 мас.% [1].

Теоретические подходы основ процесса газификации, в частности, использования пара в качестве газифицирующего агента, рассматриваются в ранних исследованиях Токарева Г.Г. В своей работе Токарев Г.Г. экспериментально доказывает значимость влияния пара на эффективность газификации [2].

Дальнейшее проведение исследований позволил составить математическую модель процесса газификации в присутствии водяного пара для обоснования наилучших режимов работы газификационных установок [3].

Модель позволила обосновать наилучшие режимные характеристики процесса газификации и позволила реализовать экспериментальную модель газификационной установки [4].

Обоснование по внедрению газификационной установки с выработкой тепловой и электрической энергии проводится в три этапа.

На первом этапе анализируется расходная часть энергетического баланса предприятия.

Расходная часть энергетического баланса предприятия разработана по рекомендациям ГОСТ 27322-87 [5].

Для типового предприятия с поголовьем 5000 голов структура энергопотребления (таблица 1) выглядит следующим образом.

Таблица 1 – Структура энергопотребления, кВт/ч

Расход электроэнергии на отопление	47 520
Расход электроэнергии на освещение	840
Расход электроэнергии на вентиляцию	689,8
Расход электроэнергии на раздачу корма	22,4
Всего	49 072,2

На втором этапе проводится обоснование конструкционных характеристик газификационной установки и составляется структура энергетического баланса (Таблица 2) газификационной установки.

Структура энергетического баланса газификационной установки на 1 кг сырья

	Потребление		Источник		
Значение	кДж	%	Значение	кДж	%
Парогенератор	85,3	0,21	Газификационная установка	10 800	13,08
Газификационная установка	41 280	99,79	Электрогенератор	41 280	50,00
			Природное топливо	30 480	36,92
Итого	41 365,3	100	Итого	82 560	100

На третьем этапе по результатам расчета разрабатывается технологическая схема станции с газификационными установками (рисунок 1) для птицеводческого предприятия.

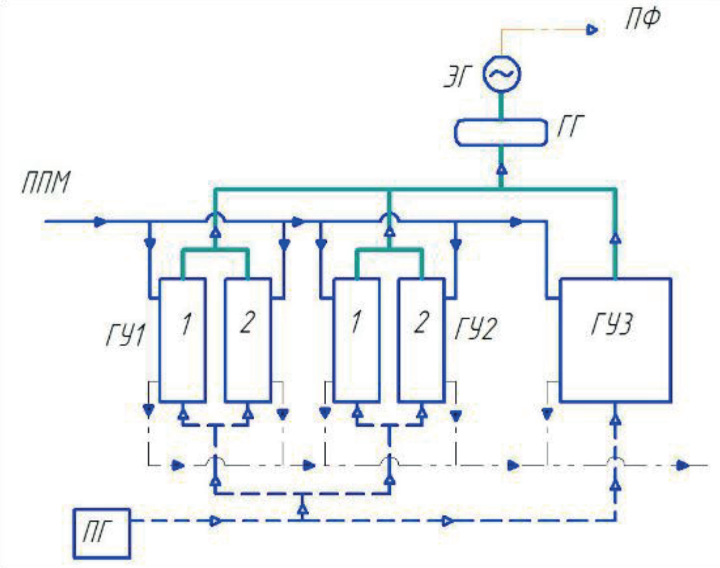


Рисунок 1 – Технологическая схема станции с газификационными установками на птицеводческом предприятии:
ПГ – парогенератор; ГУ1, ГУ2 – секции газификационных установок; ГУ3 – третья секция ГУ; 1, 2 – газификационные установки в секциях ГУ1 и ГУ2; ППМ – подстилочно-помётная масса; ГГ – газгольдер; ЭГ – электрогенератор; ПФ – птицеферма

Потребление получаемого синтез-газа возможно в котельных или двигателях внутреннего сгорания, работающих на газу, бензине или в двухтопливных двигателей (ДТД) (Рисунок 2) [6].

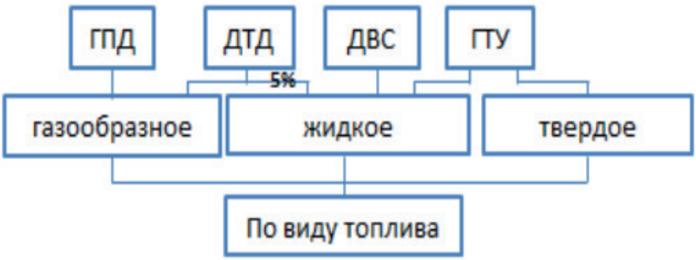


Рисунок 2 – Варианты подбора потребителя генераторного синтез – газа для выработки ЭЭ

Выводы. Экспериментально подтверждено повышение эффективности работы газификационной установки при добавлении водяного пара в процесс газификации. Так, выход синтез-газа при добавлении водяного пара в количестве 0,230 кг/кг и регулировании температуры до 1273 К калорийность синтез-газа увеличивается и составит порядка 120 тыс. кДж/кг.

Таким образом, предлагаемая газификационная установка в полной мере может обеспечить производственные нужды птицеводческого предприятия в электрической и тепловой энергии. Срок окупаемости при этом составляет 1,36 лет.

Литература

1. Демчук, С.В. Пат. 9767 Республика Беларусь, МПК F23G5/27 C10J3/00 C02F11/10 Способ газификации органических отходов или низкокалорийного топлива / Демчук, С.В., Скоромник, О.Д.; патентообладатель Демчук Сергей Всеволодович, Скоромник Олег Дмитриевич. – а 20040607; заявл. 01.04.2004; опубл. 28.02.2006.

2. Токарев, Г.Г. Газогенераторные автомобили / Г.Г. Токарев. – М.: Машгиз, 1955. – 207 с.

3. Зиганшин, Б.Г., Гайфуллин, И.Х., Фахреев, Н.Н. Математическое моделирование и экспериментальные исследования газификации отходов птицеводства // Техника и технологии в животноводстве. 2022. № 3 (47). С. 78-84.

4. Дыганова Р.Я., Демин, А.В., Фахреев, Н.Н. Установка для газификации углеродсодержащих отходов// Патент на изобретение 2754911 C1, 09.09.2021. Заявка № 2021104704 от 11.11.2020.

5. ГОСТ 27322−87 Энергобаланс промышленного предприятия. Общие положения (с Изменением N 1) / Госстандарт СССР.− М., 1988 г.

6. Gil'Manshin, I.R. Mini−central heating and power plant (CHP): the choice of the optimal structure and modes of operation / Gil'Manshin I.R., Konahina I.A., Kashapov N.F., Fahreev N.N. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering ser. "InnovativeMechanicalEngineeringTechnologies, Equipmentand Materials−2013". 2014. – 3 P.

ЗАВИСИМОСТЬ СТРУКТУРЫ ФЕРМЫ ОТ ВИДА НАГРУЖЕНИЯ

Зинькова Виктория Анатольевна[1]
Токарева Лия Андреевна[2,3],
Сабитов Линар Салихзанович[2,3]
[1]ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», 308012 г. Белгород, Россия
[2]ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», 420066, г. Казань, Россия
[3]ФГАОУ ВО «Казанский (Приволжский) федеральный университет», 420008 г. Казань, Россия

Аннотация: Естественный фактор оптимизации конструкций способствовал выбору конфигурации решетки в консольной ферме. Рассмотрено два варианта нагружения и четыре варианта расположения раскосов. Энергетический критерий для ферм из однородного линейно-упругого материала отождествляется с равнопрочностью виртуальной системы с внутренними силами Ni/φi.

Abstract: The natural design optimization factor contributed to the choice of the grid configuration in the cantilever truss. Two variants of loading and four variants of the arrangement of braces are considered. The energy criterion for trusses made of homogeneous linear elastic material is identified with the equidistance of a virtual system with internal forces Ni/φi.

Ключевые слова: ферма, оптимизация структуры фермы, энергетический критерий.

Технический прогресс немаловажную роль отводит созданию инженерных систем на основе естественных законов структурообразования, которые согласуются с общефизическим принципом стационарного действия [1].

Обстоятельное исследование обеспечения жизнедеятельности организмов нашло отражение в трудах В. Ру. Функциональное раздражение органа требует его усиления повышением поставки необходимого вещества. Существует гипотеза, что сигнализатором в таких случаях является изменение биоэлектрического потенциала клеток. Живые системы приобретают способность приспосабливаться к многократным колебаниям внешних факторов умеренной интенсивности посредством морфологической перестройки структур.

В настоящей работе эти естественнее принципы структурообразования находят применение пи определении структуры фермы, в частности, построения ее решетки. Это относится как к ее первозданному виду, так и к вариантам реконструкции, вызванным изменением нагрузки [2,3].

В качестве примера рассмотрим консольную ферму (рис.1). Для геометрической неизменяемости в ее решетки должны содержаться два раскоса, которые до определения оптимального варианта топологии фермы показаны штрихами. Остаются четыре варианта сочетания раскосов: 1) 2-4 и 3-5; 2) 2-4 и 2-6; 3) 1-5 и 3-5; 4) 1-5 и 2-6.

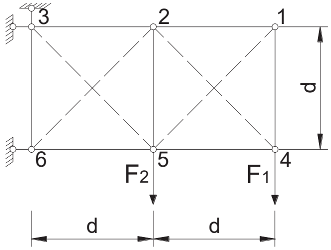


Рис. 1. Консольная ферма

Рассмотрено два варианта нагружения: 1) $F_1=F_2=F$; 2) $F_1=F$, $F_2=2F$. Для однородного линейно-упругого материала критерий оптимальности конструкции представляется как минимум потенциальной энергии деформации. Для ферм его можно отождествлять с равнопрочностью виртуальной системы с внутренними силами N_i/φ_i, где φ_i – коэффициент уменьшения расчетного сопротивления R для сжатых стержней.

Таким образом, получаем:

$$J=\sum_{i=1}^{n}\frac{N_i^2\lambda_i}{2E\varphi_i^2 A_i}, \tag{1}$$

где li – длина стержня, n – число стержней, E – модуль Юнга.

В данном примере при φi =0,75 1-му и 2-му вариантам нагружения соответствуют величины потенциальной энергии деформации:

$$J_{(1)}=7{,}94k_1\frac{RFd}{E}, \quad J_{(2)}=9{,}83k_2\frac{RFd}{E} \tag{2}$$

и объемы материала

$$V_{(1)}=13{,}67k_3\frac{Fd}{R}, \quad V_{(2)}=17k_4\frac{Fd}{R}. \tag{3}$$

Тенденция насыщения материалом внешнего силового поля обозначилась здесь в присутствии двух раскосов в окрестности нагруженных узлов. Невыгодные варианты содержат один такого рода раскос. При 1-м варианте нагружения оказалось возможным даже отсутствие раскоса в одном из нагруженных узлов (3-е сочетание раскосов). При 2-м варианте нагружения оказалось не обязательным наличие двух раскосов в наиболее нагруженном узле (1-е сочетание раскосов), но наличествующий раскос оказался в три раза металлоемким по сравнению с соседним.

Заметим, что в оптимальных вариантах ($k_1=k_2=1$; $k_3=k_4=1$) соотношение величин J_2/J_1 и V_2/V_1 оказалось постоянным (в данном случае равным 1,24). Это как раз и свидетельствует о равнопрочности виртуальной системы, т.е. в определенном смысле обобщает теорему Васютинского [4] на случай фермы при наличии сжатых стержней.

Практический интерес может представить оптимизация распределенной нагрузки по узлам пояса фермы [5].

Список литературы

1. Юрьев А.Г. Естественный фактор оптимизации конструкций. Белгород: БГТУ, 2003. 110 с.

2. Сабитов Л.С., Гатиятов И.З., Кашапов Н.Ф. Математическое моделирование узлов соединений опор ВЛ из тонкостенных стержней оболочек закрытого профиля // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2018. Т. 10. № 2 (38). С. 16-26.

3. Гатиятов И.З., Сабитов Л.С. Способы и установки контроля опор из трубчатых стержней, применяемых в энергетическом строительстве при воздействии на них статических и динамически нагрузок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 5-6. С. 93-101.

4. Wasiutynski Z. On the congruency of the forming according to the minimum potential energy with that according to the equal strength // Bulletin de L'Academie Polonaise des Sciences. Serie des Sciences Techniques, 1960.Vol. 8. No 6. P. 259-268.

5. Юрьев А.Г., Зинькова В.А. Оптимизация нагружения металлических ферм // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 2. С.56-61.

ВНЕДРЕНИЯ ТЕХНОЛОГИИ 3D ПЕЧАТИ В СПОСОБ ЛИТЬЯ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

Ильинкова Т.А., Юсупов И.И.

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ, ул. К. Маркса 10, Казань, 420111

Аннотация: в данной статье анализируется возможность применения аддитивных технологий, в частности, внедрения FDM-печати в способ литья по выплавляемым моделям.

Annotation: this article analyzes the possibility of using additive technologies, in particular, the introduction of FDM printing in the investment casting method.

Ключевые слова: 3D печать, FDM-технология, литье по выплавляемым моделям.

В настоящее время идет активный переход от традиционных способов получения деталей к аддитивным технологиям. В отличие от традиционных технологий, в которых детали получают путем съема материала, аддитивные технологии, наоборот, представляют собой изготовления продукта путем печати слоя за слоем.

Данный переход связан с рядом преимуществ, которые открывают аддитивные технология, а именно: консолидация деталей, геометрическая свобода изготовления, сокращение отходов материалов, уменьшения стоимости различных оснасток. Большим плюсом аддитивного производства также является возможность использования различных материалов (металлы, керамику, полимеры, композиты, биологические системы).

Уже сейчас аддитивные технология находит свое применения в самых разных областях производства: авиа-, судо- и машиностроительная промышленности, медицина, легкая промышленности и т.д.

В данной работе рассмотрим способ литья по выплавляемым моделям и возможность внедрения в него FDM-печать.

Литье по выплавляемым моделям (ЛВМ) является одним из традиционных способов литья, который применяется для изготовления деталей высокой точности и сложной конфигурации, невыполнимых другими методами литья. Данный способ литья состоит из следующих этапов:

- изготовление жертвенной модели, путем впрыска воска или парафина в пресс-форму;
- приклеивание нескольких моделей в одну литниковую систему;
- окунание моделей в жидкую суспензию и обсыпка керамическим материалом с дальнейшей сушкой;
- выплавление (выжигание) моделей из керамической оболочки;
- заливка металла в керамическую оболочку.

Однако экономические преимущества данного способа литья ограничены массовым производством из-за высокой стоимости инструментов и длительного времени изготовления восковых моделей, особенно когда модель имеет сложную геометрию.

Решением данной задачи может стать внедрение аддитивных технологий, в частности FDM-печати. Для этого необходимо использовать в качестве модели детали, напечатанные с помощью 3D-принтера. В работе [1] было подсчитано, что благодаря такому внедрению время изготовления продукта может снизиться до 89%, а производственные затраты упасть на 60%. Поэтому в зарубежной литературе этот способ получил название быстрое литье по выплавляемым моделям (БЛВМ).

Первоначальное сокращение стоимости происходит из-за отсутствия необходимости в твердой оснастке для штампов для производства восковых деталей. К тому же FDM-печать может уменьшить количество дефектов и включений в отливках на 99,5% и 35% соответственно за счет доступа к оптимизации каждого элемента системы литья для лучшей текучести расплавленного материала [2].

Отметим, что отказ от металлических оснасток и печать жертвенных моделей позволяет использовать более продвинутые подходы к проектированию – топологическую оптимизацию (ТО).

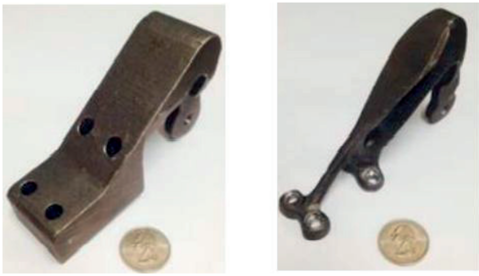
ТО — это мощный инструмент для создания легких и функциональных деталей с улучшенными механическими характеристиками. Такие детали часто имеют геометрию, слишком сложную для изготовления традиционными методами. Комбинируя FDM-печать ЛВМ появляется возможность быстрого изготовления моделей с оптимальной геометрией и характеристиками, недоступными для обычных способов. Хотя деталь, изготовленная с помощью аддитивного производства, имеет практически бесконечную геометрическую свободу, каждый процесс аддитивного производства имеет свои особенности проектирования, такие как минимальный размер элемента, необходимость опорной конструкции, чистота поверхности, прочность материала, эксплуатационные расходы и другие. Конструкторам необходимо выбрать процесс, который в данном случае лучше всего подходит для литья. Что еще более важно, модель, независимо от того, изготовлена ли она с помощью традиционной оснастки или аддитивной обработки, должна соответствовать всем требованиям ЛВМ. Поэтому важно понимать все конструктивные и производственные ограничения всего процесса БЛВМ уже на этапе проектирования модели.

В настоящее время уже известны попытки печати исходных жертвенных моделей как из воска, так и из других полимеров (например, ABS-пластик). В работе [3] отмечают, что модели, полученные печатью ABS-пластиком, имели хорошие прочностные характеристики, но периодически вызывали такие проблемы как растрескивание керамооболочки, неполное выгорание модели и остаточный пепел.

Но уже несколько компании, разрабатывающие нити для печати, имеют в своем ассортименте новые термопластичные полимеры на восковой основе (к примеру, WAX3D Base от компании Filamentarno). Эти воскоподобные материалы будут иметь неплохие прочностные и в тоже время при нагревании керамооболочки хорошо плавиться, как горячий парафин, оставляя почти идеальную форму для отливки.

При изготовлении моделей для БЛВМ необходимо учитывать важнейшие параметры FDM-печати: температура экструзии и стола, толщина слоя, скорость печати, охлаждение, плотность заполнения, наличие поддержки. Для каждого принтера необходимо подобрать эти оптимальные параметры путем печати тестовых образцов.

В работе [4] был изготовлен кронштейн из стали ASTM A216 WCB технологией БЛВМ, путем топологической оптимизацией исходной детали (рис. 1)



а) б)

Рисунок 1 – Кронштейн, полученный методом БЛВМ:
а – без ТО; б – с ТО

Все модели были напечатаны на 3D принтере MakerBot Replicator с использованием коммерческой воскоподобной нити MOLDLAY, которая обладает хорошей размерной стабильностью и достаточной жесткостью при комнатной температуре. При нагревании до 270 °C этот воскоподобный материал плавится и вытекает из оболочки, как горячий парафиновый воск, оставляя почти идеальную форму для литья. Автор поделился некоторыми параметрами печати: температура печати 200°С, скорость печати 10 мм/с, толщина слоя 0,2 мм, плотность заполнения 30%, поддержки и охлаждение – есть.

Еще одним направлением внедрения аддитивных технологий в ЛВМ является разработка расплавляемой оснастки. К примеру, в статье [5] получали спираль технологией двухкомпонентного литья под давлением, где форма для литья керамического тигля была распечатана из PVC на FDM-принтере.

Таким образом, идет активный поиск внедрения аддитивных технологий различные области производства. Литейная промышленность не является исключением. Уже сейчас есть работы, в которых как модель, так и оснастка может быть распечатана на FDM-принтере.

Список литературы

1. C. Cheah, C. Chua, C. Lee, C. Feng, and K. Totong, "Rapid prototyping and tooling techniques: a review of applications for rapid investment casting," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 25, pp. 308-320, 2005

2. Sama, S. R., Badamo, T., Lynch, P., & Manogharan, G. (2019). Novel sprue designs in metal casting via 3D sand-printing. Additive Manufacturing, 25, 563-578.

3. Sama, S. R., Wang, J., & Manogharan, G. (2018). Non-conventional mold design for metal casting using 3D sand-printing. Journal of Manufacturing Processes, 34, 765-775.

4. Wang, J., Sama, S. R., Lynch, P. C., & Manogharan, G. (2019). Design and Topology Optimization of 3D-Printed Wax Patterns for Rapid Investment Casting. Procedia Manufacturing, 34, 683–694. doi:10.1016/j.promfg.2019.06.224

5. Wick-Joliat R., Tschamper M.. Water-soluble sacrificial 3D printed molds for fast prototyping in ceramic injection molding. Additive Manufacturing 48 (2021) 102408.

АНАЛИЗ ИСПАРИТЕЛЬНОГО И ЖИДКОСТНОГО МЕТОДОВ ОХЛАЖДЕНИЯ БЛОКОВ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДОМ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Карелин Дмитрий Леонидович, Болдырев Алексей Владимирович, Болдырев Сергей Владимирович, Колбина Татьяна Юрьевна

Набережночелнинский институт КФУ

Аннотация. В работе проведено численное исследование процесса теплоотдачи в топливном элементе с протонообменной мембраной при использовании жидкостной и испарительной системы охлаждения. Результат показывает, что испарительная система охлаждения позволяет поддерживать меньший перепад температур на биполярной пластине, следовательно, обеспечивает большую стабильность параметров работы топливного элемента и увеличивает его эффективность.

Abstract. In the article, a numerical research of the heat transfer process in a fuel cell with a proton-exchange membrane was carried out utilization liquid and evaporative cooling systems. The result shows that the evaporative cooling system makes it possible to maintain a smaller temperature difference across the bipolar plate, thus providing greater stability of the fuel cell parameters and increasing its efficiency.

Ключевые слова: топливный элемент, жидкостная система охлаждения, испарительная система охлаждения, температура биполярной пластины.

Введение

Водородные топливные элементы представляют собой альтернативный источник энергии для транспортных средств с электрической энергоустановкой, являющейся альтернативой двигателю внутреннего сгорания. Такая энергоустановка имеет ряд преимуществ перед ДВС: отсутствие вредных выбросов выхлопных газов, более высокий КПД и использование водорода, как возобновляемого источника энергии.

Для широкого распространения транспортных средств с энергетической установкой на водородных топливных элементах (ТЭ) необходимо решить множество задач, одна из которых заключается в том, чтобы эффективно термостатировать ТЭ и отводить избыточное тепло. Низкий тепловой поток выхлопных газов ТЭ с протонообменной мембраной (PEM) по сравнению с ДВС ведет к уменьшению теплового потока, отводимого через радиатор, несмотря на то, что количество теплоты выделяемой ТЭ в систему охлаждения выше [1]. Это обстоятельство в сочетании с более низкими рабочими температурами создает дополнительные трудности для работы системы охлаждения ТЭ.

Авторы предыдущих исследований, в которых сравнивались требования к теплообменникам двигателей внутреннего сгорания и силовых агрегатов на топливных элементах, пришли к выводу, что для транспортных средств на топливных элементах требуется лобовая площадь радиатора, в два-четыре раза превышающая размер радиаторов обычных ДВС равной мощности, и до четырех раз превышающий поток охлаждающего воздуха [1-3].

Анализ используемых систем охлаждения ТЭ. Описание проблемы.

Пропускание (протекание) окружающего воздуха либо через катод, либо через дополнительные охлаждающие пластины между элементами является простейшим методом отвода тепла от топливных элементов и существенно упрощает систему охлаждения. Известны несколько примеров транспортных средств на ТЭ с воздушным охлаждением [4, 5]. По мере увеличения электрической мощности (и, следовательно, требуемого отвода тепла) поток охлаждающего воздуха и необходимая площадь теплопередачи подходят к пределу своей эффективности по теплоотдаче, и становится предпочтительнее использовать контур жидкостного охлаждения или охлаждения с фазовым переходом [6-9].

В системе с жидкостным охлаждением (рис. 1) тепло отводится от блока ТЭ за счет принудительной конвекции жидкой воды через круглые каналы внутри биполярных пластин. Обычный радиатор с жалюзийными ребрами с поперечным потоком жидкость-воздух используется для отвода отработанного тепла в окружающую среду. Температура блока регулируется с помощью обратной связи перепускного клапана радиатора, повышение температуры охлаждающей жидкости в блоке поддерживается на уровне не более 5 °С за счет насоса с регулируемым расходом.

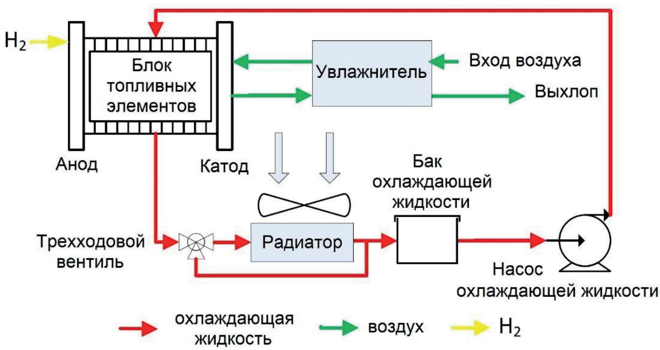


Рисунок 1 – Жидкостная система охлаждения ТЭ

В испарительной системе охлаждения (рис. 2) тепло отводится от блока ТЭ за счет кипения эфира HFE7100 в круглых каналах внутри биполярных пластин. Аналогично используется обычный радиатор с жалюзийными ребрами с поперечным потоком жидкость-воздух. Температура блока регулируется изменением частоты вращения вала компрессора и проходного сечения расширительного клапана (дросселя).

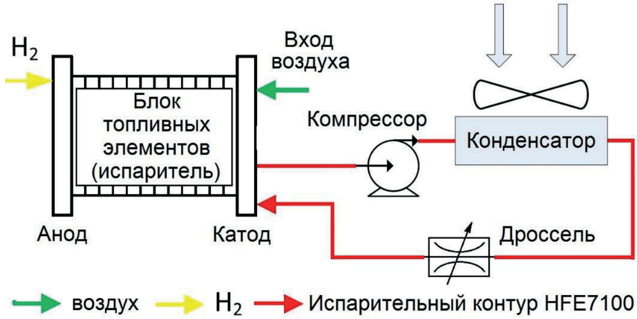


Рисунок 2 – Испарительная система охлаждения ТЭ

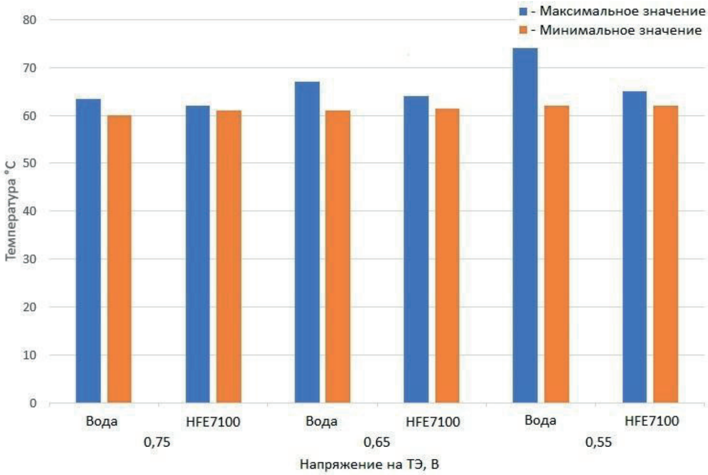


Рисунок 3 – Отношение температур теплоносителя на входе и выходе ТЭ в зависимости от типа системы охлаждения

Как видно из рисунка 3, разность температур при использовании двухфазного метода охлаждения HFE 7100 меньше зависит от условий нагрузки на топливный элемент. Она определяется, как разность значений между максимальной и минимальной температурой ячейки по причине того, что при фазовом переходе и постоянном давлении температура неизменна. При напряжении элемента 0,75 В разница температур составляет 3,6 °С и 1,9 °С для водяного и HFE-7100 методов охлаждения соответственно. Разница температур увеличивается до 18,2 °С для метода водяного охлаждения и до 6,2 °С для метода охлаждения HFE-7100 при напряжении ячейки 0,55 В.

Для всех условий нагрузки проверено и доказано, что двухфазный метод охлаждения обеспечивает более равномерное распределение температуры по сравнению с однофазном методом охлаждения. Это хорошо согласуется с общими результатами многих литературных источников, показывающими, что перегрев стенки существенно не меняется в зависимости от изменения теплового потока при двухфазном способе охлаждения [10, 11].

Литература

1. Fronk MH, Wetter DL, Masten DA, Bosco A. Pem fuel cell system solutions for transportation. SAE Tech Pap 2000. 2000–01–0373, 2011-32-0644.
2. Adams JA, Chul Yang W, Oglesby KA, Osborne KD. The development of ford's p2000 fuel cell vehicle. SAE Tech Pap 2000. 2000–01–1061, 2011-32-0644.
3. Rogg S, Hoglinger M, Zwittig E, Pfender C, Kaiser W, Heckenberger T. Cooling modules for vehicles with a fuel cell drive. Fuel Cells 2003;3:153–8.
4. Ikeya K, Hirota K, Takada Y, Eguchi T, Mizutani K, Ohta T. Development and evaluation of air-cooled fuel cell scooter. JSAE 2011. 2011-32-0644.
5. Larminie J, Dicks A. Fuel cell systems explained. 2nd ed. Wiley; 2006.
6. Karayiannis TG, Mahmoud MM. Flow boiling in microchannels: fundamentals and applications. Appl Therm Eng 2017;115:1372-97.
7. Zhang G, Kandlikar SG. A critical review of cooling techniques in proton exchange membrane fuel cell stacks. Int J Hydrogen Energy 2012;37(3):2412-29.
8. Meyers JP, Darling RM, Evans C, Balliet R, Perry ML. Evaporatively-cooled PEM fuel-cell stack and system. ECS Trans 2006;3(1):1207-14.
9. Karelin, D.L., Boldyrev, A.V., Boldyrev, S.V. Math Modeling and Transient Characteristics Research of Vapor Compression Cooling System // AIP Conf. Proc. 2141, 050005 (2019). - pp. 1–3.
10. Hetsroni G, Mosyak A, Segal Z, Ziskind G. A uniform temperature heat sink for cooling of electronic devices. Int J Heat Mass Tran 2002;45(16):3275-86.
11. Zhang L, Koo ZM, Jiang L, Asheghi M. Measurements and modeling of two-phase flowin microchannels with nearly constant heat flux boundary conditions. J Microelectromech Syst 2002;11(1):12-9.

ВЛИЯНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА ПОТРЕБИТЕЛЕЙ И ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКИ

Каримов Данил Рамилевич, магистр кафедры ЭОС
Рыжков Денис Витальевич, доцент кафедры ЭОС

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»,

Аннотация. В работе рассматривается влияние показателей качества электрической энергии на потребителей и работу электроприемников. Отклонения показателей качества электроэнергии от нормируемых значений ухудшают условия эксплуатации электрооборудования энергоснабжающих организаций и потребителей электроэнергии, могут привести к значительным убыткам, как в промышленности, так и в бытовом секторе.

Annotation. The paper considers the influence of indicators of the quality of electrical energy on consumers and the operation of electrical receivers. Deviations of power quality indicators from standard values worsen the operating conditions of electrical equipment of power supply organizations and consumers of electricity, and can lead to significant losses, both in industry and in the domestic sector.

Ключевые слова: частота, электроприемник, показатели качества электроэнергии, напряжение, потребитель.

Качество энергии (КЭ) – это совокупность свойств электроэнергии, которые определяют ее потребительские качества, а также степень соответствия параметров установленным значениям. Напряжение и частота – главные нормированные параметры характеризующие КЭ. Качество энергии влияет на эффективность работы электроприемников, что выражается в изменении экономических и технических показателей их работы [1].

В зависимости от характера воздействия параметров электрической энергии на электроприемники, различают:

- технологическое влияние;
- электромагнитное влияние.

Технологическая составляющая связана с недовыпуском продукции предприятиями, что несет для них прямые убытки. Электромагнитная составляющая характеризуется ростом потребления реактивной мощности и значительными потерями активной мощности [2].

Изменение частоты. При детальном рассмотрении влияния КЭ на технологические потери можно заметить, что основной фактор снижения производительности – снижение частоты в электрической сети (ЭС). Это провоцирует снижение скорости вращения электрических двигателей и соответственно снижает производительность технологического оборудования. При этом увеличение частоты в сети также провоцирует аварийные ситуации. Это связано с выходом из строя технологического оборудования вследствие повышения скорости вращения электропривода.

Изменение напряжения. Колебание величины напряжения питающей ЭС негативно влияет на работу осветительных устройств и асинхронных электродвигателей. При понижении напряжения снижается яркость и мощность светового потока от ламп накаливания, а дроссельные светильники могут вообще не работать. Это значительно снижает производительность и может стать причиной травматизма на рабочем месте. Пониженное напряжение также служит причиной остановки электрических двигателей и возникновению системной аварии на предприятии.

В случае увеличения напряжения, яркость освещения увеличится, но и срок службы лампы значительно сократится. Установлено, что при увеличении напряжения на 10% сверх нормативного, рабочий ресурс лампы сокращается в три раза. При росте напряжения на зажимах электропривода, существенно возрастает потребление реактивной мощности и соответственно нагрев. Это может стать причиной перегрузки электрического мотора и выхода его из строя. Кроме этого существует высокая вероятность пробоя изоляции на корпус и поражение людей электрическим током [3].

Таким образом, качество электроэнергии существенно влияет на причины травматизма потребителей на рабочем месте и в быту, а также на работу электроприемников, поскольку аварийность в сетях с низким качеством электроэнергии выше, чем в случае, когда показатели качества электроэнергии находятся в допустимых пределах.

Литература

1. Неганов Л., Тульский В., Олексюк Б. Концепция системы мониторинга показателей бесперебойности электроснабжения потребителей московской области // Электроэнергия. Передача и распределение. 2016. №1 (34). С. 28–33.

2. Хацевский К.В., Денчик Ю.М., Клеутин В.И. Проблемы качества электроэнергии в системах электроснабжения// Омский научный вестник. 2012.Т.110, № 2.С. 212-214.

3. Бирюлин В.И., Куделина Д.В., Брежнев И.В. Исследование проблем качества электроэнергии в сетях напряжением 0,4 кВ// Вестник КГЭУ. 2022. Т.14. №1 (53). С.109-121.

АНАЛИЗ СВОБОДНЫХ И ВЫНУЖДЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ СОСУДОВ И БАЛЛОНОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ МКЭ. ПОДОГРЕВАТЕЛЬ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ И РЕСИВЕР ВОДОРОДА.

Ольга Владимировна Клейдман [1], Максим Дмитриевич Клейдман[2]

[1]ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Республика Татарстан, [2]НИУ «МЭИ», г. Москва

[1]olgakdpm@mail.ru, [2]max02d@mail.ru

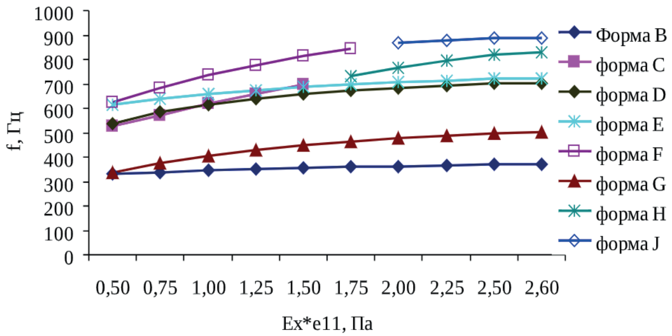
Аннотация: Построена расчетная схема МКЭ на примере подогревателя высокого давления и ресивера водорода для анализа свободных и вынужденных колебаний, резонансных явлений. Получены результаты для изотропных и ортотропных свойств материала.

Ключевые слова: МКЭ, НДС, ортотропные материалы, колебания, ANSYS.

Abstract: A calculation scheme of the FEM is constructed using the example of a high-pressure heater and a hydrogen receiver for the analysis of free and forced oscillations, resonance phenomena. Results are obtained for isotropic and orthotropic properties of the material.

Keywords: FEM, SSS, orthotropic materials, vibrations, ANSYS.

Явление резонанса играет большую роль в ряде научных и производственных процессов. Механика деформирования и разрушения твердых тел с учётом колебаний является областью эффективного применения МКЭ [1]. Изменение геометрических параметров модели, наличие неоднородностей значительно влияют на частоты свободных колебаний [2]. Увеличение прочности и уменьшение массы неоднородных корпусов сосудов высокого давления, широко используемых в энергетике, по сравнению с цельнометаллическими корпусами достигается армированием высокомодульными волокнами, ориентируя их в продольном и поперечном направлениях. В расчетах композиционные материалы моделируются свойствами ортотропии. В последние годы происходит быстрый рост производства искусственных композитов [3]. Рассмотрено поведение элементов конструкций подогревателя высокого давления, ресивера водорода из изотропных и ортотропных материалов при свободных и вынужденных колебаниях. Получены формы и частоты колебаний неоднородных элементов их корпуса при различных геометрических параметрах на основе метода конечных элементов в программе ANSYS. При увеличении модуля упругости в окружном и продольном направлении значение частоты свободных колебаний для разных форм возрастает (рис.1).



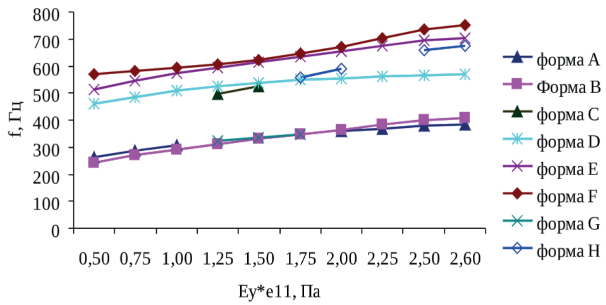


Рис.1. Зависимость частоты свободных колебаний от модуля упругости

Вынужденные колебания происходят под действием переменных во времени внешних сил и возможны при работе насоса, электродвигателя, периодичном спуске или закачке газа. Применяя модальный анализ в ППП ANSYS, колебательный процесс возбуждается силой $F=F_o\cos(wt)$, приложенной в зоне входа, выхода газа, где F_o - максимальное значение силы, w- циклическая частота колебаний.

Резонанс возникает при совпадении собственных и вынужденных частот и возможен при резком увеличении скорости пара из отбора турбины с плохим креплением внутренних трубок, при совпадении частот колебаний турбины с частотами колебаний ПВД с плохим креплением корпуса.

При рассмотрении различных форм свободных колебаний выявлена зона с наибольшим перемещением, для которой при исследовании вынужденных колебаний построен график, показывающий при какой частоте вынуждающей силы возникают резонансные явления. Нелинейное решение учитывает 50 шагов по диапазону частот. Для найденных резонансных частот проведён анализ НДС исследуемых моделей. При варьировании значением $F_{0,}$ определена предельная сила, для которой интенсивность напряжений больше допустимой, и соответствующий резонансный всплеск становится опасным, приводит к разрушению [4].

Источники

1. Гапоненко С.О., Кондратьев А.Е., Ульябаева Ш.У. Анализ результатов численного моделирования колебательных процессов в бездефектных и дефектных трубопроводах // Вестник КГЭУ. 2022. Т. 14. № 3 (55). С. 38-47.

2. Владимиров О.В., Загретдинов А.Р., Ившин И.В., Низамиев М.Ф. Исследование влияния дефектов на собственные частоты колебаний деталей энергетических установок // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2015;(5-6):66-74.

3. Соловьев С.А., Соловьева О.В., Ахметова И.Г., Ваньков Ю.В., Шакурова Р.З. Численное исследование теплопроводности композитного теплоизоляционного материала с микрогранулами // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2022;24(1):86-98.

4. Кушнаренко В.М., Чирков Ю.А., Клещарева Г.А., Решетов С.Ю. Причины преждевременного разрушения теплообменных труб энергетического оборудования // Вестник КГЭУ. 2021. № 1 (49). С. 75-84

АРХИТЕКТУРА ГАЗОРАСПРЕДЕЛЯЮЩИХ КАНАЛОВ БИПОЛЯРНОЙ ПЛАСТИНЫ ДЛЯ ПОМТЭ, КРИТЕРИИ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ

Кудинов Даниил Владимирович[1]
Симонов Иван Владимирович[2]
Климов Алексей Викторович[1]
Шевченко Денис Иванович[1]

Набережночелнинский институт КФУ, г. Набережные Челны[1].
Университет ИТМО, г. Санкт-Петербург[2].
dan79361@gmail.com[1], Ivan.Simonov.fez@yandex.ru[2],
Feliks116@yandex.ru[1], xuz@rambler.ru[1].

Аннотация. В данной статье описывается структура газораспределяющих каналов биполярной пластины (БП), применяемая в водородных топливных элементах с протонообменной мембраной (ПОМТЭ), с водяным охлаждением, выделяются критерии оптимизированные профили газораспределяющих каналов.

Ключевые слова: топливный элемент с протонообменной мембраной, биполярная пластина, газораспределяющие каналы.

Abstract. This article describes the most widespread architecture of the bipolar plate gas distribution channels found in water-cooled hydrogen PEMFCs, and the most optimal parameters of the gas distribution channels.

Key words: PEMFC, bipolar plate, gas distribution channels.

Введение. Известно, что ПОМТЭ является электрохимическим источником тока, преобразующим химическую энергию топлива (водород) и окислителя (воздух) путем окислительно-восстановительной реакции в электрическую энергию. На анодной стороне ПОМТЭ протекает реакция окисления:

$$2H_2 - 4e^- \rightarrow 4H^+$$

На катодной стороне протекает реакция восстановления:

$$O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$$

Для повышения вырабатываемой электрохимическим источником тока мощности, ячейки ТЭ объединяют в батареи. Ключевыми параметрами, влияющими на электрическую мощность батареей ПОМТЭ, являются – ток и напряжение, которые определяются интенсивностью химической реакций (ток) в ячейке ТЭ и количеством ячеек в батарее (напряжение). Напряжение, снимаемое с одной ячейки ПОМТЭ в идеальном случае, является величиной постоянной, зависящей от потенциала окислительно-восстановительной реакции (= +1,229 В). Увеличение количества ячеек ТЭ в батарее приводит к ухудшению ее массогабаритных характеристик, а плотность тока можно повысить увеличением количества протекающих одномоментно реакций, при этом без ухудшения массогабаритных характеристик батареи.

Повышение плотности тока снимаемой с ячейки ПОМТЭ возможно несколькими путями, например, увеличением плотности подаваемых газов за счет подачи топлива и окислителя под более высоким давлением, что увеличивает энергопотребление обеспечивающих систем батареи ТЭ, и ужесточает требования к конструкции ее элементов. Одним из решений, данной задачи может являться оптимизация структуры и профиля газораспределяющих каналов БП, по критерию снижения внутреннего сопротивления каналов для увеличения массового расхода реагентов.

Сравнение архитектуры газораспределительных каналов БП

Исходя из мировых исследований, можно определить несколько наиболее распространенных архитектур газораспределительных каналов [1].

- Столбчатые каналы. У данных типов каналов наблюдается не значительное падение давления. Однако, потоки газов будут двигаться по пути наименьшего сопротивления и это вызывает застойные зоны, которые в свою очередь вызывают неравномерное распределение газов и образовывающейся жидкости. Это вызывает ряд сложностей при эксплуатации ТЭ.
- Последовательно-параллельные каналы. Имеют проблемы с зонами застоя газов, плохим распределением образовывающейся влаги. Но из-за низкого падения давления и высокой скорости прокачки, используются для катодного пространства. В данной геометрии важное значение имеют расположение входного и выходного канала. Лучшие расположение – в противоположных углах ТЭ.
- Серпантинные каналы. Имеют хорошее распределение газов, у данной геометрии не наблюдаются застойные зоны, чаще используют для анодного пространства. Однако большое падение давления является существенным недостатком данного типа геометрии (т.к. заставляет использовать БП с большими габаритами для уменьшения влияния перепада давления).
- Гибридные каналы.
- Структуры с закрытыми каналами. Реагенты диффундируют через ТЭ в газодиффузионном слое. Данный тип каналов хорошо отводит воду и повышает производительность ТЭ, т.к. на всей пощади ТЭ идет реакция. Имеются сложности по обеспечению равномерного распределения газов по всему объему газодиффузионного слоя из-за необходимости давления для диффузии газов.

Ведущими разработчиками ПОМТЭ применяются следующие типы архитектуры БП:

- Toyota – серпантинные каналы;
- ZBT – серпантинные каналы;
- Honda – последовательно-параллельные каналы;
- PowerSwedenAB – последовательно-параллельные каналы;
- Audi Volkswagen – последовательно-параллельные каналы;
- Ballard – комбинированный тип параллельно-серпантинные каналы.

Проведя анализ этих типов архитектур можно выделить следующие плюсы и минусы:

Тип	Описание	«+»	«–»
Серпантинные каналы	Распределение газов по нескольким серпантинным каналам	Хороший отвод воды; Вся поверхность задействована в реакциях; Подходит для ТЭ большой площади;	Падение давления существенно; Не равномерное распределение реагентов по каналам;
Последовательно-параллельные каналы	Реагенты проходят по параллельным каналам	Низкое падение давления; Равномерное распределение газов;	Возможно наличие зон топливного голодания; Плохой отвод воды при малом объеме прокачки; Плохо подходит для длительных режимов работы;
Комбинированные параллельно-серпантинные каналы	Цель комбинирования: увеличения подачи реагентов в активную область ТЭ. Чаще применяют комбинированный тип с серпантинными каналами	Сильно зависит от конфигурации. Низкое падение давление; Равное распределение реагентов; Увеличение эффективности работы ТЭ;	Падение давления в зависимости от числа каналов; Рекомендуется только для ТЭ с большим объемом потока реагентов;

Отмечается, что увеличение толщины ребер каналов БП снижает мощность батареи ПОМТЭ, из-за уменьшения объема подводимых газов, уменьшение же толщины ребер соответственно увеличивает мощность. Однако требуется соблюдать баланс, при значительном снижении толщины ребер и пропорциональном увеличении ширины каналов БП, поток газов может обрести свойства турбулентности, что в свою очередь снизит поглощение газов активным слоем ПОМТЭ и так же уменьшит мощность. [3]

Одним из факторов снижения мощности ПОМТЭ является накапливаемая в ходе восстановительной реакции в газораспределительных каналах БП вода. Для уменьшения накопления воды, при проработке архитектуры БП рекомендуется применять следующие решения [4]:

- гидрофобные поверхности каналов;

- скругленные углы каналов;
- узкие газораспределительные каналы.

Дополнительно

Анализируя материалы исследований газораспределительных каналов, можно вывести, что падение давления на каналах не должно превышать [2]:

- на катоде <0,18 бар;
- на аноде <0,07 бар.

Выводы

Данная работа дает необходимое описание различных типов геометрий биполярных пластин, для дальнейших исследований.

Исходя из анализа можно выделить три основных типа архитектур БП:

1. Последовательно-параллельные каналы;
2. Комбинированный тип с серпантинными каналами;
3. Серпантинные каналы параллельного соединения.

Во время исследований и оптимизации архитектуры БП следует учитывать ряд критериев:

1. Равномерное распределение реагентов по площади БП;
2. Равномерное распределение плотности тока по площади БП;
3. Равномерное распределение влажности воды в мембране;
4. Малый перепад давления по площади БП;
5. Отсутствие завихрений газовых потоков;
6. Отсутствие застойных зон;
7. Низкие массогабаритные параметры БП;
8. Высокие прочностные показатели БП;
9. Легкость серийного производства.

Список литературы

[1] L. Peng и X. Lai, «Design and manufacturing of stainless steel bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells», *International Journal of Hydrogen Energy*, т. 39, сс. 21127–21153, 2014, doi: 10.1016/j.ijhydene.2014.08.113.

[2] A. Tang, L. Crisci, L. Bonville, и J. Jankovic, «An overview of bipolar plates in proton exchange membrane fuel cells», *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, т. 13, вып. 2, с. 022701, мар. 2021, doi: 10.1063/5.0031447.

[3] Y.-G. Yoon, W.-Y. Lee, G.-G. Park, T.-H. Yang, и C.-S. Kim, «Effects of channel and rib widths of flow field plates on the performance of a PEMFC», *International Journal of Hydrogen Energy*, т. 30, вып. 12, сс. 1363–1366, сен. 2005, doi: 10.1016/j.ijhydene.2005.04.008.

[4] T. A. Trabold, J. P. Owejan, D. L. Jacobson, M. Arif, и P. R. Huffman, «In situ investigation of water transport in an operating PEM fuel cell using neutron radiography: Part 1 – Experimental method and serpentine flow field results», *International Journal of Heat and Mass Transfer*, т. 49, вып. 25, сс. 4712–4720, дек. 2006, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.07.003.

ИССЛЕДОВАНИЕ УЗЛА РЕГЕНЕРАЦИИ ОТРАБОТАННОГО МАСЛА С АГРЕГАТОМ ДЛЯ КОМБИНИРОВАНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЙ И МЕТОДОВ ОЧИСТКИ

Лаптев Сергей Александрович

ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань, Россия
laptev.sa@kgeu.ru

Аннотация: Исследуется возможность использования центробежного агрегата для проведения последовательных стадий грубой и тонкой очистки отработанного моторного масла

Ключевые слова: регенерация, отработанное масло, центробежный аппарат.

Annotation: The possibility of using a centrifugal unit for carrying out successive stages of coarse and fine cleaning of used engine oil is being investigated.

Keywords: regeneration, waste oil, centrifugal apparatus.

Существенную экономию материальных средств на технических объектах, а также резкое сокращение вредных выбросов в окружающую среду позволяет своевременная и грамотная регенерация отработанного моторного масла.

Среди разнообразных физико-химических методов очистки отработанного масла и их аппаратурного оформления для сокращения времени процесса регенерации привлекательным является использование центробежных аппаратов [1, 2].

Аппараты центробежного типа можно использовать для организации в одном агрегате комбинации различных избирательных зон для удаления с высокой интенсивностью отдельных вредных примесей как химическим, так и физическим способом [3].

Избирательное удаление из отработанного масла водорастворимых кислот, а также солей органических кислот может осуществлено промывкой масла подогретой водой, поэтому одной из стадий регенерации масла является процесс перемешивания. Для удаления из масла крупных механических примесей возможно использование закрученного потока в гидроциклоне. Для быстрого разделения водно-масляной эмульсии требуется достаточно сильное центробежное поле, созданное в центрифуге.

Все эти стадии регенерации отработанного масла можно осуществить в одном агрегате, а в качестве движущей силы для перемещения жидкой среды между стадиями очистки использовать комплекс из сил тяжести и скоростного напора, создаваемого при помощи центробежного аппарата. Для доведения очищаемого масла до требуемой чистоты рекомендовано использование многократной рециркуляции.

Организация процесса промывки масла с использованием центробежного аппарата может осуществлена следующим образом (см. рисунок).

Отработанное масло и вода самотёком поступают в зону аппарата, предназначенную для интенсивного перемешивания с одновременным подогревом теплоносителем через внешнюю стенку аппарата.

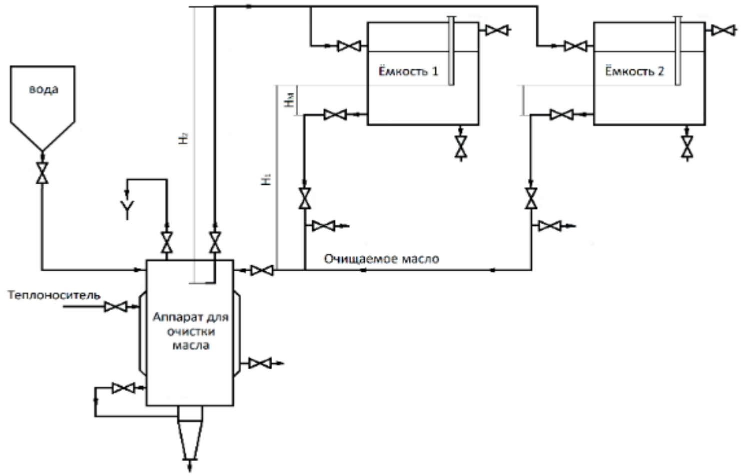


Рис. Технологическая схема узла регенерации отработанного масла

Подогретая масловодяная эмульсия из зоны перемешивания скоростным напором подаётся в гидроциклон, расположенный в нижней части агрегата, где происходит грубая очистка от механических примесей. Обратный центральный выходной патрубок гидроциклона доставляет водно-масляную эмульсию в зону центрифугирования. Отвод очищенного масла и воды осуществляется заборными трубками, соответственно из отсеков легкой и тяжёлой фракций центрифуги за счет скоростного напора. Очищаемое масло для уменьшения концентрации вредных примесей отводится из агрегата попеременно в разные емкости.

Для варьирования времени пребывания очищаемого масла в агрегате, а также для выравнивания расходов подачи и отвода узел регенерации снабжен необходимым количеством регулирующих вентилей. Буферные емкости для стабилизации напора подачи выполнены в виде сосудов Мариотта.

Расходы подаваемого и отводимого масла были оценены с использованием уравнения Бернулли для полного напора. Неопределенность в уравнениях Бернулли по коэффициенту трения в трубопроводах для слива масла из емкостей и для возврата в емкости разрешалась численным методом с последующей проверкой режима течения по критерию Рейнольдса.

При проведении расчетов варьировались такие параметры как высота установки буферных ёмкостей, температура очищаемого масла, диаметры подводящих и отводящих трубопроводов. Полученная карта по расходным характеристикам позволяет правильно назначить диаметры подводящих и отводящих трубопроводов и наметить требуемую высоту размещения буферных емкостей.

При использовании промывки отработанного масла с использованием центробежного аппарата, содержащего зоны перемешивания, зону грубой и тонкой очистки возможно осуществить рециркуляцию отработанного масла и доведения очищаемого масла до требуемых характеристик.

Литература

1. Шашкин П.И., Брай И.В. Регенерация отработанных нефтяных масел. М.: Химия, 1970. - 304 с.

2. Красюк, М.С. Методы очистки отработанных масел, применяемых на предприятиях нефтегазодобывающей промышленности / М. С. Красюк, А. А. Мирошниченко // Экологические проблемы региона и пути их разрешения: Материалы XIV Международной научно-практической конференции, Омск, 14–15 мая 2020 года / Под общей редакцией Е. Ю. Тюменцевой. – Омск: Омский государственный технический университет, 2020. – С. 60-64. – EDN RXKBQO.

3. Набиуллина М.Ф., Лаптев С.А. Разработка рациональной компоновочной схемы установки регенерации отработанного масла. В сборнике: Тинчуринские чтения - 2020 "Энергетика и цифровая трансформация". Материалы Международной молодежной научной конференции. В 3-х томах. Под общей редакцией Э.Ю. Абдуллазянова. Казань, 2020. С. 204-207.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОДЫ С РАЗЛИЧНЫМИ РЕГУЛЯРНЫМИ НАСАДКАМИ И ОПОРНЫМИ РЕШЕТКАМИ В МИНИ-ГРАДИРНИ

Лаптева Елена Анатольевна, доцент кафедры ЭОС
Тактамышева Рушания Рифадовна, доцент кафедры ЭОС
Власова Маргарита Андреевна, магистр кафедры ЭОС

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»,

Аннотация. В работе показана методика и результаты расчетов для регулярных насадок в виде гофрированных и гладких труб с применением различных опорных решеток. Проанализировано изменение параметров эффективности охлаждения по воде и газу, коэффициент гидравлического сопротивления. Сделаны выводы о наиболее подходящей конструкции градирни для интенсификации тепло- и массообмена.

Annotation. The paper shows the methodology and calculation results for regular nozzles in the form of corrugated and smooth pipes using various support grids. The change in the parameters of the cooling efficiency by water and gas, the coefficient of hydraulic resistance is analyzed. Conclusions are drawn about the most suitable design of the cooling tower for the intensification of heat and mass transfer.

Ключевые слова: теплообмен, интенсификация, мини-градирня, охлаждение воды, регулярные насадки, контактное устройство

В конце XX века за рубежом, а затем и в РФ начали активно создаваться и внедряться мини градирни. Их хорошо использовать на предприятиях нефтехимии и топливно-энергетического комплекса (ТЭК) для остужения оборотной жидкости на очень близком расстоянии к теплотехнологическим установкам. В том случае есть необходимость в подачи жидкости в общий водооборотный цикл промышленного предприятия и в таких градирнях легче управлять температурном режимом в зависимости от начальной температуры жидкости.

Самый важный узел градирни – это насадка. Тепло и массообменные свойства контактного устройства (насадки), наряду с аэродинамическими свойствами определяют, в основном, эффективность градирни, т.е. влияют на выбор определенного размера новой градирни или оценку возможностей теплосъема данной градирни [1]. Для оросителей применяют различные материалы: дерево, цемент, пластмасса, металл. В данное время все большее используются сетчатые и рельефные контактные устройства, выполненные в виде дырчатых (перфорированных) или рельефных полиэтиленовых труб, и укладываемых равно, либо в навал.

Экспериментальные данные были получены на научно-исследовательском стенде градирня. Установка предназначена для проведения исследовательских работ по тепломассообмену при использовании различных насадок [2]. При проведении эксперимента использовались регулярные насадки в виде гофрированных и гладких труб, которые устанавливаются на поддерживающей опорной решетке, рассматривались две геометрии – с отверстиями и ситчатая. Комбинации использования регулярных насадок и опорных решеток представлены на рисунке 1.

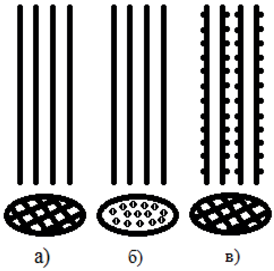


Рисунок 1. Комбинации использования регулярных насадок и опорных решеток при проведении экспериментов - а) гладкие трубы и ситчатая опорная решетка; б) гладкие трубы и опорная решетка с отверстиями; в) гофрированные трубы и ситчатая опорная решетка

В процессе исследования изменяли параметры подаваемого воздуха, для анализа изменения расчетных параметров, эксперимент проводился при различных скоростях воздуха в колонне: 0,5 - 1,8 м/с. Рассчитывались такие параметры как: эффективность по воде и по газу, коэффициент массоотдачи, коэффициент гидравлического сопротивления. Плотность орошения устанавливали 8,8 м^2/м^3·ч и 15,9 м^2/м^3·ч.

Эффективность по воде рассчитывается по выражению:

$$E_{\text{ж}} = \frac{t_{\text{н}} - t_{\text{к}}}{t_{\text{н}} - t_{\text{м.т.н}}} \cdot 100\%, \qquad (1)$$

где $t_{\text{н}}$ – температура воды на входе в градирню, С; $t_{\text{к}}$ – температура воды на выходе из градирни, С; $t_{\text{м.т.н}}$ – температура мокрого термометра на входе в градирню, С.

Эффективность по газу:

$$E_{\text{г}} = \frac{I_{\text{н}} - I_{\text{к}}}{I_{\text{н}} - I_{\text{гр.н}}} \cdot 100\%, \qquad (2)$$

где $I_{\text{н}}$ – энтальпия воздуха на входе, Дж/кг. сух. возд.; $I_{\text{к}}$ – энтальпия воздуха на выходе, Дж/кг. сух. возд.; $I_{\text{гр.н}}$ – энтальпия воздуха при температуре $t_{\text{н}}$ на границе раздела фаз, Дж/кг.

Объемный коэффициент массоотдачи *β,* кг/м^3· с:

$$\beta = \frac{Q_w}{I_{\text{ср}} \cdot V}, \qquad (3)$$

где Q_w– тепловая мощность по воде, Вт; $I_{\text{ср}}$– средняя разность энтальпий, Дж/кг. сух. возд; V – объем блока насадки, м^3.

Коэффициент гидравлического сопротивления насадки ξ:

$$\xi = \frac{2 \cdot d_{\text{э}} \cdot \Delta P \cdot \varepsilon_{\text{св}}^2}{H \cdot \rho_{\text{г}} \cdot w_{\text{г}}^2}, \qquad (4)$$

где $d_{\text{э}}$– эквивалентный диаметр насадки, м ($d_{\text{э}} = 0{,}0247$ м); ΔP– перепад давления воздуха в орошаемой насадке, Па; $\varepsilon_{\text{св}}$ – удельный свободный объем насадки, м^3 /м^3 ($\varepsilon_{\text{св}} = 0{,}95$); H – высота насадки, м; $\rho_{\text{г}}$ – плотность воздуха, кг/м^3; $w_{\text{г}}$ –скорость воздуха, м/с.

Были получены графики зависимости показателей, которые представлены на рисунках 2-5.

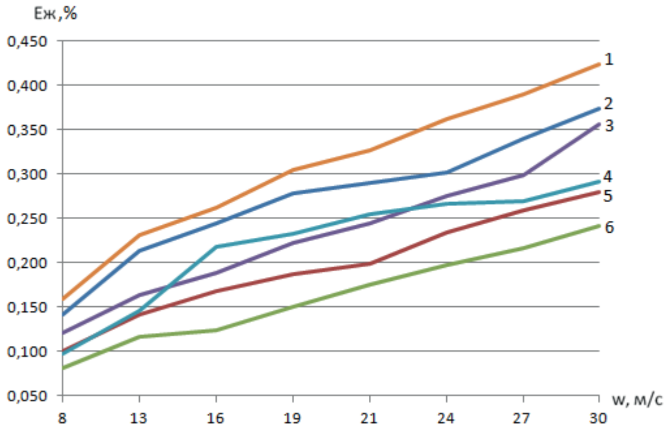


Рисунок 2. График зависимости эффективности воды от скорости воздуха в колонне (1 - $q_ж$ = 8,8 $м^2/м^3 \cdot ч$ решетка ситчатая, гофрированные трубы; 2 - $q_ж$ = 8,8 $м^2/м^3 \cdot ч$, решетка с отверстиями, гладкие трубы; 3 - $q_ж$ = 8,8 $м^2/м^3 \cdot ч$ решетка ситчатая, гладкие трубы; 4 - $q_ж$ = 15,9 $м^2/м^3 \cdot ч$ решетка ситчатая, гофрированные трубы; 5 - $q_ж$ = 15,9 $м^2/м^3 \cdot ч$ решетка с отверстиями, гладкие трубы; 6 - $q_ж$ = 15,9 $м^2/м^3 \cdot ч$ решетка ситчатая, гладкие трубы).

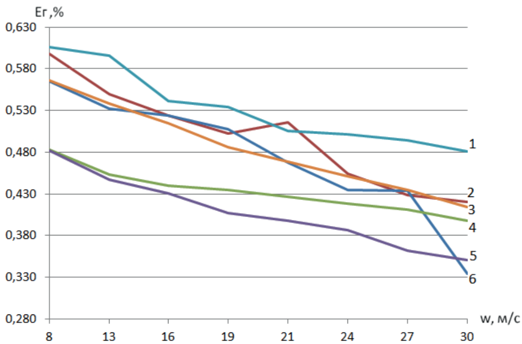


Рисунок 3. График зависимости эффективности газа от скорости воздуха в колонне (1 - $q_ж$ = 15,9 $м^2/м^3 \cdot ч$ решетка ситчатая, гофрированные трубы; 2 - $q_ж$ = 15,9 $м^2/м^3 \cdot ч$, решетка с отверстиями, гладкие трубы; 3 - $q_ж$ = 8,8 $м^2/м^3 \cdot ч$ решетка ситчатая, гофрированные трубы; 4 - $q_ж$ = 15,9 $м^2/м^3 \cdot ч$ решетка ситчатая, гладкие трубы; 5 - $q_ж$ = 8,8 $м^2/м^3 \cdot ч$ решетка ситчатая, гладкие трубы; 6 - $q_ж$ = 8,8 $м^2/м^3 \cdot ч$ решетка с отверстиями, гладкие трубы).

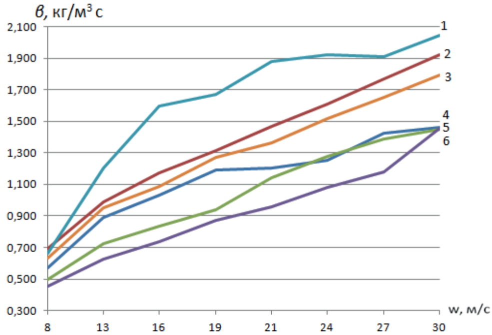


Рисунок 4. График зависимости коэффициента массотдачи от скорости воздуха в колонне (1 - $q_ж$ = 15,9 $м^2/м^3 \cdot$ч решетка ситчатая, гофрированные трубы; 2 - $q_ж$ = 15,9 $м^2/м^3 \cdot$ч, решетка с отверстиями, гладкие трубы; 3 - $q_ж$ = 8,8 $м^2/м^3 \cdot$ч решетка ситчатая, гофрированные трубы; 4 - $q_ж$ = 8,8 $м^2/м^3 \cdot$ч решетка с отверстиями, гладкие трубы; 5 - $q_ж$ = 15,9 $м^2/м^3 \cdot$ч решетка ситчатая, гладкие трубы; 6 - $q_ж$ = 8,8 $м^2/м^3 \cdot$ч решетка ситчатая, гладкие трубы).

Проанализировав полученные графики, можно сделать вывод, что наиболее эффективной конструкцией мини-градирни будет использование гофрированных регулярных насадок с ситчатой решеткой для более интенсивного охлаждения оборотной воды. Более полное использование геометрической поверхности насадки, а также более полное обновление поверхности контакта фаз, ведущее в конечном итоге к повышению эффективности массопереноса, обеспечивается гофрированной насадкой. Наиболее лучшая пропускная способность воздуха у ситчатой опорной решетки, что позволяет избежать процесса барботаж, как при использовании опорной решетки с отверстиями.

Исследование выполнено в рамках научного проекта РНФ 18-79-101-36

Литература

1. Лаптева Е. А., Шагиева Г. К. Эффективность охлаждение оборотной жидкости в мини градирнях //Вопросы технических наук в свете современных исследований. – 2017. – С. 84-90.

2. Лаптева Е.А. Исследование гидравлических и массообменных характеристик системы газ-жидкость регулярной насадки с поверхностными интенсификаторами //современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. – 2022. – С.98-102.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОДЫ С РЕГУЛЯРНОЙ НАСАДКОЙ ПРИ ПРИМЕНЕНИИ РАЗЛИЧНЫХ ОПОРНЫХ РЕШЕТОК В МИНИ-ГРАДИРНИ

Лаптева Елена Анатольевна, доцент кафедры ЭОС
Тактамышева Рушания Рифадовна, доцент кафедры ЭОС
Власова Маргарита Андреевна, магистр кафедры ЭОС

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»,

Аннотация. В работе показаны результаты расчетов для регулярной насадки в виде гофрированных труб с применением различных опорных решеток. Сделаны выводы о наиболее эффективной конструкции.

Annotation. The paper shows the results of calculations for a regular nozzle in the form of corrugated pipes using various support grids. Conclusions are drawn about the most effective design.

Ключевые слова: теплообмен, интенсификация**,** мини-градирня, охлаждение воды, регулярные насадки, контактное устройство

Охлаждение оборотной воды является неотъемлемой частью ряда промышленных технологических процессов на ТЭС, АЭС и т.д. Самыми распространенными устройствами для охлаждения больших объемов воды являются градирни [1]. Использование оборотной воды на предприятиях теплоэнергетической, химической, нефтеперерабатывающей и металлургической отраслей промышленности составляет от 60 до 96% от общего водопотребления [2]. В практике охлаждение оборотной воды широко используют испарительное охлаждение воды в градирнях. Интенсивность работы градирни зависит от условий, какие предоставляются для поверхностного испарения воды в ней. В связи с этим можно выделить два типа величин, влияющих на испарительное охлаждение: зависящие от условий внешней среды и от конструкции охладителя (градирни).

Экспериментальные данные были получены на научно-исследовательском стенде градирня. Установка предназначена для проведения исследовательских работ по тепломассообмену при использовании различных насадок [3]. При проведении эксперимента использовались регулярные насадки в виде гофрированных труб, которые устанавливаются на поддерживающей опорной решетке. Схема регулярной насадки из гофрированных труб представлена на рисунке 1.

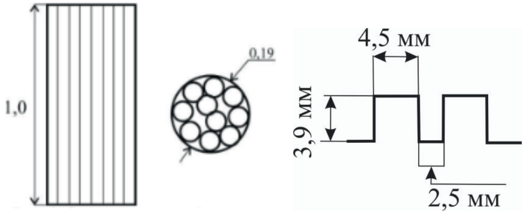


Рисунок 1. Схема трубчатой регулярной насадки с дискретной шероховатостью в виде прямоугольных выступов

Внутри цилиндрической колонны размещены 10 гофрированных труб, являющихся регулярной насадкой, высотой 1 м. Дискретная шероховатость поверхности труб выполняется в форме отдельных точечных выступов, расположенных поперечно к потоку вдоль периметра поперечного сечения канала, с использованием данных труб повышается интенсивность тепло – и массообмена.

Опорные решетки устанавливаются под регулярной насадкой (гофрированные трубы), рассматривались две геометрии решеток, которые представлены на рисунке 2.

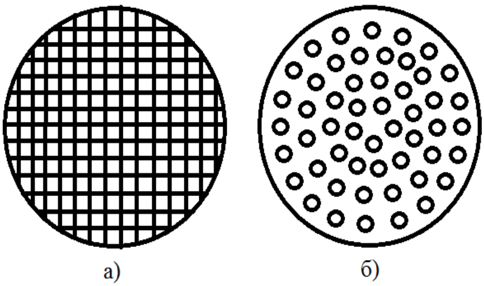


Рисунок 2. Геометрия опорных решеток: а – ситчатая решетка, б – решетка с отверстиями

В процессе исследования будем менять параметры подаваемого воздуха, для анализа изменения расчетных параметров, эксперимент проводился при различных скоростях воздуха в колонне: 0,5 - 1,8 м/с. Рассчитывались такие параметры как: эффективность по воде и по газу, коэффициент массоотдачи, коэффициент гидравлического сопротивления. Плотность орошения устанавливали 8,8 $м^2/м^3 \cdot ч$ и 15,9 $м^2/м^3 \cdot ч$. Полученные экспериментальные данные и расчетные параметры представлены в таблице 1 и таблице 2.

Таблица 1. Расчетные параметры при использовании ситчатой решетки

Плотность орошения 8,8 м^2/м^3·ч								
	Скорость воздуха в колонне, м/с							
	0,5	0,8	1	1,1	1,3	1,4	1,6	1,8
Эффективность по воде	0,160	0,231	0,262	0,304	0,326	0,362	0,390	0,423
Эффективность по газу	0,566	0,538	0,515	0,486	0,469	0,451	0,435	0,414
Коэффициент массоотдачи, кг/(м^3·с)	0,631	0,951	1,086	1,269	1,362	1,518	1,649	1,793
Коэффициент гидравлического сопротивления	0,023	0,099	0,225	0,337	0,506	0,629	1,301	3,499
Плотность орошения 15,9 м^2/м^3·ч								
	Скорость воздуха в колонне, м/с							
	0,5	0,8	1	1,1	1,3	1,4	1,6	1,8
Эффективность по воде	0,098	0,146	0,218	0,233	0,255	0,266	0,270	0,292
Эффективность по газу	0,606	0,596	0,541	0,534	0,506	0,501	0,494	0,481
Коэффициент массоотдачи, кг/(м^3·с)	0,662	1,206	1,596	1,673	1,877	1,921	1,908	2,047
Коэффициент гидравлического сопротивления	0,060	0,195	0,353	0,505	0,759	1,028	1,671	4,847

Таблица 2. Расчетные параметры при использовании решетки с отверстиями

Плотность орошения 8,8 м^2/м^3·ч								
	Скорость воздуха в колонне, м/с							
	0,5	0,8	1	1,1	1,3	1,4	1,6	1,8
Эффективность по воде	0,142	0,213	0,244	0,278	0,290	0,301	0,340	0,373
Эффективность по газу	0,565	0,532	0,524	0,507	0,467	0,435	0,433	0,334
Коэффициент массоотдачи, кг/(м^3·с)	0,573	0,890	1,030	1,189	1,203	1,253	1,423	1,464
Коэффициент гидравлического сопротивления	0,017	0,144	0,342	0,660	1,573	4,845	6,519	8,702
Плотность орошения 15,9 м^2/м^3·ч								
	Скорость воздуха в колонне, м/с							
	0,5	0,8	1	1,1	1,3	1,4	1,6	1,8
Эффективность по воде	0,100	0,142	0,168	0,187	0,199	0,234	0,259	0,280
Эффективность по газу	0,598	0,549	0,525	0,503	0,516	0,454	0,429	0,421
Коэффициент массоотдачи, кг/(м^3·с)	0,693	0,990	1,175	1,314	1,469	1,608	1,766	1,922
Коэффициент гидравлического сопротивления	0,055	1,503	2,557	3,295	4,647	5,369	7,574	9,898

Были получены графики зависимости показателей, которые представлены на рисунках 3-4.

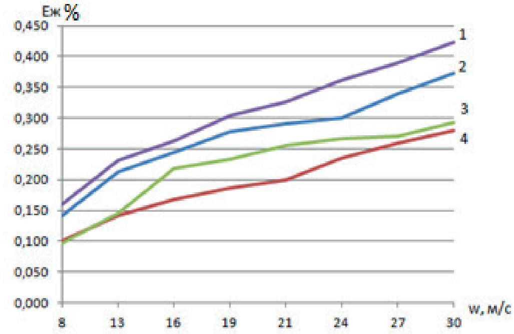


Рисунок 3. График зависимости эффективности воды от скорости воздуха в колонне (1 - плотность орошения $q_ж$ = 8,8 м^2/м^3·ч решетка ситчатая, 2 - плотность орошения $q_ж$ = 8,8 м^2/м^3·ч, решетка с отверстиями, 3 - плотность орошения $q_ж$ = 15,9 м^2/м^3·ч решетка ситчатая, 4 - плотность орошения $q_ж$ = 15,9 м^2/м^3·чрешетка с отверстиями).

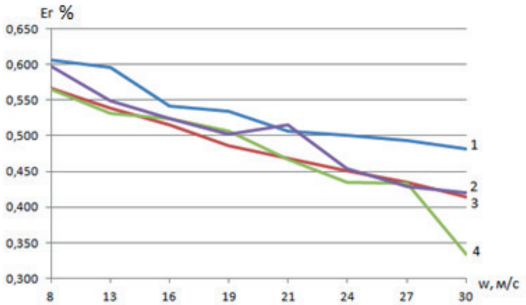


Рисунок 4. График зависимости эффективности газа от скорости воздуха в колонне (1 - плотность орошения $q_ж$ = 15,9 м^2/м^3·ч решетка ситчатая, 2 - плотность орошения $q_ж$ = 15,9 м^2/м^3·ч, решетка с отверстиями, 3 - плотность орошения $q_ж$ = 8,8 м^2/м^3·ч решетка ситчатая, 4 - плотность орошения $q_ж$ = 8,8 м^2/м^3·ч решетка с отверстиями).

Проанализировав полученные графики, можно сделать вывод, что использование регулярной гофрированной насадки приводит к интенсификации массоотдачи, увеличению площади контакта фаз, что способствует более эффективному процессу охлаждения. Использование опорной решетки с отверстиями значительно изменяет процент по эффективности воды и газа, это происходит из-за возникновения процесса барботажа, поэтому наиболее оптимальной конструкцией для мини-градирни будет использование ситчатой опорной решетки, так как при ее использовании показатели эффективности по воде и газу составляют наибольшее значение.

Исследование выполнено в рамках научного проекта РНФ 18-79-101-36

Литература

1. Филимонова В. А., Лазарева Е. А. Современные башенные вентиляторные градирни // Вологдинские чтения. 2009. №76.

2. Бондарь К. Е. и др. Повышение эффективности тепломассообменных процессов в малогабаритных аппаратах охлаждения оборотной воды //Фундаментальные исследования. – 2017. – №. 9-1. – С. 25-29.

3. Лаптева Е.А. Исследование гидравлических и массообменных характеристик системы газ-жидкость регулярной насадки с поверхностными интенсификаторами //современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации. – 2022. – С.98-102.

ПЕРЕМЕННЫЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ВИДАХ ТОПЛИВА

Г.Е. Марьин[1,2], старший машинист энергоблоков цеха парогазовых установок, старший преподаватель кафедры энергетического машиностроения, e-mail: george64199@mail.ru

Б.М. Осипов[2], кандидат технических наук, профессор, профессор кафедры энергетического машиностроения, e-mail: obm0099@ya.ru

А.С.Шубина[3], старший преподаватель кафедры машиноведения и инженерной графики, e-mail: alm.72@mail.ru

[1]АО ТАТЭНЕРГО, Казань, Россия
[2]Казанский государственный энергетический университет, Казань, Россия
[3]Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань, Россия

Аннотация. Газотурбинные установки работают на природном газе, но стремление к энергетической безопасности и снижению выбросов. Практическое тестирование турбины при работе на различных видах топлива проблематично это связано с разной теплотворной способностью и разной динамикой горения. Необходимость прогнозирования энергетических и экологических характеристик становится важной задачей при проектировании и эксплуатации газовой турбины. В данном исследовании рассматривается работа турбины GE 6FA на различных видах топлива (природный газ, водород,

синтез-газ). Для исследований создана математическая модель турбины в АС ГРЭТ.

Ключевые слова: Газовая турбина, газотурбинная установка, энергетическая безопасность, альтернативные топлива.

Введение. Современные газотурбинные установки работают с низкими выбросами, это достигается применением технологий предварительного смешения. Технология предварительного смешения требует выполнения требований по обратной вспышке (устойчивость к обратному возгоранию), нестабильность горения, требований по выбросам NOx, CO. Переход на альтернативные топлива требует более строгого выполнения, в связи с изменчивостью топлива. К альтернативным топливам можно отнести водород, синтез-газ после химических производств, синтез-газ полученный из угля, сжиженный природный газ [1].

Процесс обработки термодинамических данных. Работа характеризуется высокими температурами рабочего тела, необходимо учитывать явления диссоциации и рекомбинации при процессах сжатия, расширения и химических реакций компонентов рабочего тела [2,3]. При расчетах были использована методика, разработанная коллективом авторов под руководством В.Е. Алемасова [4]. В качестве рабочего тела в проточной части газовой турбины могут использоваться как индивидуальные вещества, так и смеси нескольких веществ. Состав компонентов задается условной формулой *Aa Bb Cc...* с молекулярной массой μk = 100. *b*ik = 100*g*i/μi. Так, для керосина, заданного массовыми долями углерода $g_C = 0.85$ и водорода $g_H = 0.15$, условная формула записывается в виде *C*7,0768*H*14,881. В таблице 1 представлены условные формулы топлива.

Таблица 1

Условные формулы топлива

№	Тип топлива	C	H	N	O	S	i, кДж/кг
1.	Природный газ 1	6,129	24,094	0,12194	0,0564	-	-4559,38
3.	Керосин	7,0768	14,6788	-	-	0,0135	-2825,13
4.	Водород	-	99,21619	-	-	-	-3965,1

В качестве объекта исследований выбрана газотурбинная установка GE 6FA. Исходными данными для исследований выбраны: температура окружающего воздуха 288 К, давление 101,3 кПа, влажность 60%, мощность 77 МВт, температура уходящих газов 873 К, обороты 5235 об/мин. максимальную температуру необходимо ограничить в диапазоне 15730 К, так как работа проходит на оптовом рынке электроэнергии и в составе парогазового энергоблока [5]. На рис.1. представлена функциональная схема газовой турбины, где ВХУ - входное устройство, К- компрессор, КС- камера сгорания, Т - турбина, ВыХУ- выходное устройство.

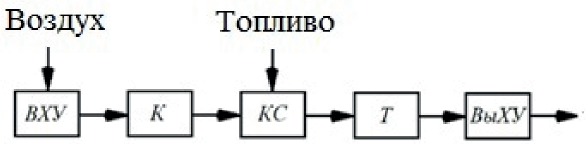


Рис.1. Функциональная схема моделируемой газовой турбины

В программном комплексе АС ГРЭТ разработана математическая модель двигателя. АС ГРЭТ позволяет создавать всережимную модель газовой турбины. При создании математической модели проведена идентификация ГТУ, максимальное отклонение составило 1,1% от реально работающей ГТУ тепловой станции. На рис. 2. представлено изменение расхода топлива. Согласно полученным результатам наибольший расход достиагется при работе на керосине, самы наименьший при работе на водородном топливе.

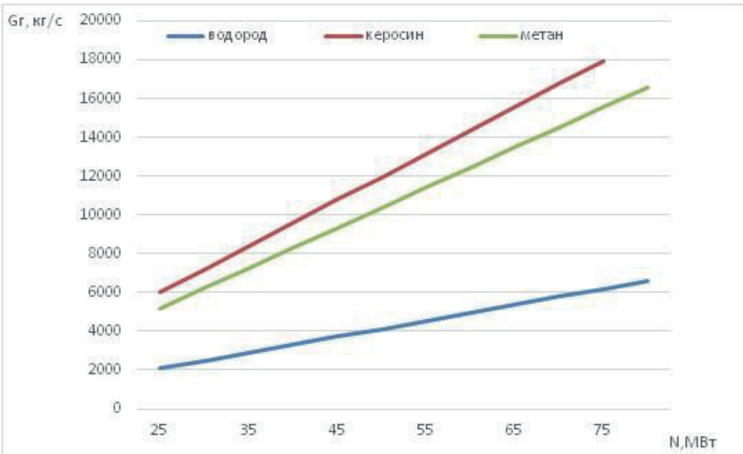


Рис. 2. Изменение расхода топлива

На рис. 3. представлено изменение расхода воздуха. При работе на газообразном топливе расход воздуха практически не изменятся, при использовании керосина происходит увеличение расхода воздуха на 11%.

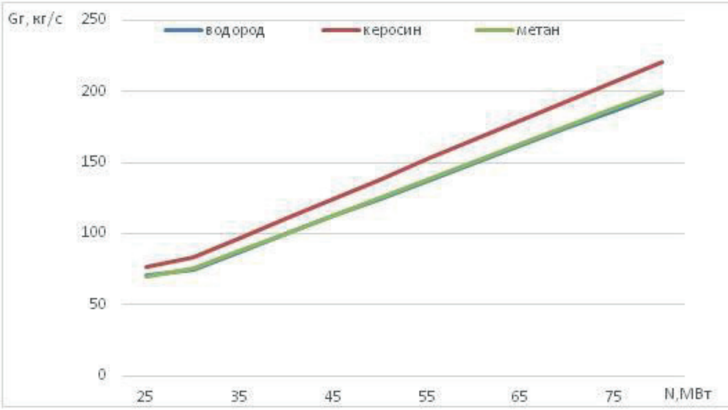


Рис. 3. Изменение расхода воздуха

Заключение. Важно отметить, что применение альтернативных топлив оказывает влияние на систему топливоподготовки. Увеличение расхода топлива требует замены дожимного компрессора и топливопровдов, а при работе на водородном топливе необходимо уменьшать диаметры топливопроводов. По мере увеличения интереса к альтернативным топливам рассмативается потребность во взаимозаменяемости этих видов топлива. В газовых турбинах малой мощности это будет наиболее актуально, так как расход газов меньше. В перспективе переход на альтернативные топлива потребуют перехода к высокоскоростным системам управления топливной системы, для мгновенного изменения подачи топлив в режиме реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марьин. Г. Е. Критерии выбора составов топлив при их сжигании в газотурбинных установках с незначительными переделками топливной системы / Марьин. Г. Е., Осипов Б. М. – Текст : непосредственный // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24. – № 2(151). – С. 356-365. – DOI 10.21285/1814-3520-2020-2-356-365. – EDN VLKCOB. Электронный ресурс – статья из журнала

2. Дрегалин А.Ф. Комплекс программ расчета радиационно-конвективного теплообмена в химически реагирующих газовых смесях / Дрегалин А.Ф., Приданцев А.С., Шигапов А.Б. – Текст : непосредственный // РК СТ и ТТЗЭУ. Тез.докл. – Киев, 1987. – С.61-62.Статья из сборника

3. Термодинамические свойства газов при высоких температурах и давлениях / В.И. Недоступ, Е.П. Галькевич, Е.С. Каминский – Киев : Наука, 1990. – 196 с. – Текст : непосредственный. Книга трех авторов

4. Теория ракетных двигателей: учебник для вузов / В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалин, А. П. Тишин; под ред. В.П. Глушко. – Москва : Машиностроение,1980. – 533 с. – Текст : непосредственный. Книга трех авторов

5. Менделеев Д. И. Особенности работы блока ПГУ-220 Казанской ТЭЦ-2 по заданному графику / Галицкий Ю. Я., Марьин Г. Е., Федотов А. Ю. – Текст : непосредственный // Электроэнергетика глазами молодежи - 2018 : материалы IX Междунар. молодежной научно-техн. конф. – Казань, 2018. – С. 307-310. Статья из сборника

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ ОСНОВНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ГИБРИДНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

Мингалеева Гузель Рашидовна, Набиуллина Мадина Фаридовна
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»,
mingaleeva-gr@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрены схемы гибридных мини-ТЭС, работающих на основе использования солнечной энергии и природного газа. Обоснованы перспективы их применения для автономного энергоснабжения. Отмечено, что данные схемы комплектуются, в основном, типовым серийно выпускаемым оборудованием. На рынке энергетического оборудования отсутствуют пока солнечные воздушные нагреватели, эффективность работы которых определяет возможности существенной экономии топлива для газотурбинных установок. Газотурбинные установки также должны быть модернизированы и адаптированы к низким расходам топлива и подаче воздуха при высокой температуре.

Ключевые слова: солнечная энергия, газотурбинные установки, гибридные электростанции, солнечный воздушный нагреватель

Abstract. The work considers the schemes of hybrid mini-HPS operating on the basis of the use of solar energy and natural gas. The prospects for their use for autonomous power supply are justified. It is noted that these schemes are mainly equipped with typical mass-produced equipment. So far, there are no solar air heaters in the energy equipment market, the efficiency of which determines the possibility of significant fuel savings for gas turbine plants. Gas turbine units must also be upgraded and adapted to low fuel consumption and high temperature air supply.

Многие современные технологии использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) достаточно тщательно проработаны, обладают высокой надежностью, по стоимости конкурируют с традиционными способами сжигания и энерготехнологической переработки топлива. Стоимость данных технологий имеет устойчивую тенденцию к снижению и, она значительно усилится по мере роста спроса на оборудование и расширение производства. Существует несколько основных типов ВИЭ, которые успешно используются в настоящее время – это солнечная и ветровая энергия, биомасса, мини-гидро и приливная энергия [1].

Однако использование возобновляемых источников энергии связано с определенными трудностями. Например, солнечная энергия всегда имеет суточный цикл и определяется погодными условиями. Ресурсы ветровой энергии сильно различаются в зависимости от глобального положения и источников возникновения ветра. Наличие гидроэнергетических ресурсов определяется расположением водных объектов и условиями для строительства плотин. Сезонная зависимость гидроэнергетических ресурсов, основана на таких факторах, как осадки или таяние снега, которые влияют на мощность ресурса, но ежедневная его доступность является вполне предсказуемой. Кратковременная изменчивость геотермальных ресурсов низка, хотя существуют значительные суточные колебания. Недостатком геотермальных ресурсов является ограниченная доступность земельных участков с геотермальными источниками. Для использования энергии биомассы существует огромное количество видов сырья – отходов сельскохозяйственного производства и деревопереработки, для которых требуется предварительная сушка и измельчение.

Влияние данных неблагоприятных факторов может быть существенно снижено, а эффект от применения ВИЭ значительно усилен при использовании гибридных технологий. Гибридные системы возобновляемой энергии (HRES) представляют собой интеграцию одного или нескольких возобновляемых и невозобновляемых источников энергии и предназначены для автономной работы или включения в общую сеть.

Гибридные системы обладают гораздо большей гибкостью в использовании топлива, эффективности, надежности, выбросов в окружающую среду и стоимости производства энергии по сравнению с отдельно взятыми составляющими [2].

Существуют различные схемы, сочетающие использование, преимущественно, сжигание традиционных органических топлив – угля, газа, жидкого нефтяного топлива и солнечной и ветровой энергии и энергии биомассы. Данные технологии хорошо комбинируются и в полученных применяют преимущественно типовое серийно выпускаемое оборудование.

Исследование, представленное в работе [3] основано на данных 240 установок CSP (Concentrating Solar Power), которые дают представление о технико-экономических характеристиках этих систем. Представленный анализ показывает, что наибольшей эффективностью обладают установки с солнечным воздушным нагревателем, расположенном на башне – технологии SPT (Solar Power Tower).

Целью данной работы является выявление перспектив создания гибридных мини-ТЭС на основе разработки отечественного оборудования. Рассмотрены принципиальные схемы гибридных мини-ТЭС (см. рисунок), работающих на основе газотурбинной установки (а), в которой сжигается природный газ, а воздух, поступающий из компрессора, нагревается в солнечном воздушном нагревателе. Воздух после прохождения через компрессор разделяется на два потока, один поток попадает в воздушный нагреватель, расположенный на башне. Здесь он получает тепло от солнечного излучения, затем нагретый воздух смешивается со оставшимся потоком воздуха. Газовая смесь подается в камеру сгорания для сжигания топлива и получения газов заданной температуры. Продукты сгорания направляются в газовую турбину для выработки электроэнергии. На рисунке (б) показана схема с парогазовой установкой.

Солнечный воздушный нагреватель, расположенный на башне и представляющий собой теплообменник с пористой вставкой (абсорбером), внутренняя поверхность которого нагревается за счет концентрированного солнечного излучения от гелиостатов, расположенных в непосредственной близости от станции. Типовые решения нагревателя пока не представлены на рынке энергетического оборудования и необходимы дальнейшие исследования для разработки методик расчета и конструкций именно для использования на гибридных электростанциях.

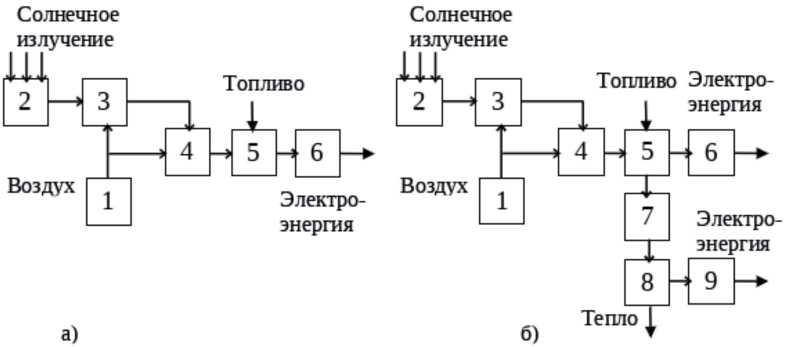


Рисунок. Принципиальная схема гибридной мини-ТЭС с использованием технологии SPT: а) с ГТУ; б) с ПГУ: 1 – компрессор; 2 – гелиостаты; 3 – солнечный воздушный нагреватель; 4 – смеситель; 5 – газотурбинная установка; 6, 9 – электрогенератор; 7 – котел-утилизатор; 8 – паровая турбина

Солнечный нагреватель (в некоторых работах – ресивер) для получения высокотемпературного воздуха (600-900 °C) привлекает большое внимание ученых. Были разработаны различные типы ресиверов, которые представляют собой объемные теплообменные аппараты, в которых поглощается солнечное излучение. Развитие технологий концентрации солнечного излучения позволило обеспечить значение теплового потока на поверхности нагревателя до 1 МВт/м^2 при уменьшении веса и размера приемников, сокращении времени запуска и перехода и повышенной эффективности [4,5], исследовались параметры пористой вставки и газодинамические факторы [6-9]. В результате было выявлено, что параметры пористой среды являются определяющими для солнечного нагревателя. Общая тепловая мощность солнечного приемника определяется в зависимости от параметров концентратора солнечной энергии. После концентрации интенсивность излучения увеличивается.

В более ранних работах автора были рассчитаны мини-ТЭС мощностью 4,6 и 11,86 МВт ГТУ, для которых имеются данные по эксплуатации, позволяющие проверить адекватность модели. В качестве примера расчета представлено изменение расходных характеристик при изменении интенсивности солнечного излучения от 0 до 745,98 кВт/м^2 расход топлива для мини-ТЭС мощностью 4,6 МВт снижается на 57,2%, а для мини-ТЭС мощностью 11,86 МВт – на 55,5%. Расчеты, выполненные для годового цикла работы, показывают снижение расхода топлива для климатических условий данной провинции на 7,1 и 5,3% соответственно [10]. Далее проведен расчет технологической схемы гибридной мини-ТЭС мощностью 5,5 МВт с ПГУ на основе использования отечественного энергетического оборудования малой мощности. Моделирование конструкции проводилось только для воздушного солнечного нагревателя.

Таким образом, можно заключить, что гибридные мини-ТЭС, обладающие несомненными преимуществами в эффективности и экологичности, вполне могут применяться на территории России, с учетом того, что будут разработаны типовые конструкции солнечных воздушных нагревателей для запуска в серийное производство. Газовые турбины малой мощности, которые могут использоваться в данных схемах, также должны быть адаптированы к изменению расхода топлива в широких пределах и подаче горячего воздуха из воздушного нагревателя.

Источники

1. Suntio, T.; Messo, T. Power Electronics for Renewable Energy Sources. // Energies. 2019,12. P. 1852-1857.

2. Opportunities for Research and Development of Hybrid Power Plants. Technical Report NREL/TP-5000-75026 May 2020. [Электронный ресурс]: https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/75026.pdf (дата обращения 24.09.2020).

3. Nathan G. J., Jafarian M., Dally B. B., SawW. L., Ashman P. J., Hu E., & Steinfeld A. Solar thermal hybrids for combustion power plant: A growing opportunity // Progress in Energy and Combustion Science. 2018. 64. P.4–28.

4. Romero M, Marcos MJ, Tellez FM, et al. Distributed power from solar tower systems: AMIUS approach // Solar Energy. 2000.Vol. 67. P. 249-264.

5. Hoffschmidt Bernhard, Tellez Felix, Valverde Antonio, et al. Performance evaluation of the 200-kWth HiTRec-II open volumetric air receiver // J Solar Energy Eng. 2003. Vol 125.No. 1. P. 87-94.

6. Buck R, Biehler T, Heller P. Advanced volumetric receive rereactor for solar methane reforming // In: Proceedings of the sixth IEA e symposium on solar thermal concentrating technologies. 1993. Vol. 1. P. 395-405.

7. Fend Th, Hoffschmidt B, Pitz-Paal R, et al. Porous materials as open volumetric solar receivers: experimental determination of thermophysical and heat transfer properties // Energy 2004. Vol 29. No 5. – P.823-833.

8. Becker M, Fend Th, Hoffschmidt B, et al. Theoretical and numerical investigation of flow stability in porous materials applied as volumetric solar receivers // Solar Energy 2006. Vol.80.No.10. – P-1241-1248.

9. Pitz-Paal R, Hoffschmidt B, Bohmer M, Becker M. Experimental and numerical evaluation of the performance and flow stability of different types of open volumetric absorbers under non-homogeneous irradiation // Solar Energy 1997. Vol. 60.No.5-6. P.135-150.

10. Mingaleeva G.R. The integration of hybrid mini thermal power plants into the energy complex of the Republic of Vietnam / G.R. Mingaleeva, O.V. Afanaseva, D.T. Nguen, D.N. Pham and Pietro Zunino // Energies. 2020. V.13. P.5848.

РАСЧЕТ ТЕПЛООБМЕНА ОТ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ К ВОДЕ

Моисеева К.С. студент
Казанский государственный энергетический университет

На сегодняшний день проблема передачи тепловой энергии от парогазовой смеси высоких температур к холодному теплоносителю (воде) является актуальной. С данной проблемой столкнулось предприятие - «ПАЛП Инвест», расположенное на производственной площадке индустриального парка Технополис «ХИМГРАД» в г. Казань. Решение данной проблемы позволит осуществить экономию финансовых средств на предприятиях подобного типа, так как парогазовые смеси обладают достаточным количеством тепловой энергии, чтобы нагреть воду до нужных температур, что существенно снизит затраты на производстве. Для решения данной проблемы авторами данной статьи была разработана модель рекуперативного теплообменного аппарата с ребристой поверхностью, который бы решал данную проблему. В работе представлено расчетная методика. Результаты показали, что внедрение теплообменного аппарата позволит нагревать холодную воду свыше 70 °С.

To date, the problem of heat transfer from a high-temperature steam-gas mixture to a cold coolant (water) is relevant. The PULP Invest company, located at the production site of the Technopolis "HIMGRAD" industrial Park in Kazan, faced this problem. The solution to this problem will allow saving financial resources at enterprises of this type, since combined-cycle gas mixtures have enough thermal energy to heat water to the desired temperatures, which will significantly reduce production costs. To solve this problem, the authors of this article have developed a model of a regenerative heat exchanger with a ribbed surface that would solve this problem. The paper presents a calculation method. The results showed that the introduction of a heat exchanger will allow heating cold water over 70 °C.

Ключевые слова: теплообменный аппарат, теплоноситель, парогазовая смесь, теплообмен.

Key words: heat exchanger, heat carrier, steam-gas mixture, heat exchange.

На многих предприятиях ставится задача отвода тепловой энергии от отходящих газовых потоков, например, от парогазовых выбросов, что позволит снизить экономические затраты на нагрев воды, используемой для хозяйственных нужд. Передача тепловой энергии от горячего теплоносителя к холодному теплоносителю осуществляется путем применения, например, рекуперативных теплообменных аппаратов, представляющих собой устройства поверхностного типа, в которых теплообмен происходит непрерывно между теплоносителями через разделяющую их стенку [1, 2].

Целью данной работы являлось экспериментальное исследование блока рекуперативного теплообменного аппарата, представляющего собой ребристую трубу.

На рисунке 1 представлен экспериментальный блок, который интегрировался в линию движения парогазовой смеси на предприятии. Теплообменник представляет собой U - образную трубу с ребрами, прямоугольную пластину для его крепления к воздуховоду и соединительную гофру. Оребрение трубы происходило методом навивки. Внутренняя поверхность трубы гладкая. Выполненное поперечное оребрение трубы позволяет максимально развить теплообменную поверхность в единице объема и существенно повысить показатели компактности и удельной металлоемкости (рис. 1).

Основные размеры рекуперативного теплообменного аппарата с ребристой поверхностью представлены на рисунке 2. Толщина U - образной трубы составляет 2 мм, при этом толщина ребер составляем 1 мм. С каждой стороны методом навивки нанесено 140 ребер. Высота каждого ребра равна 9 мм. Шаг между ребрами примерно составляет 3,5 мм. Площадь теплообменной поверхности рекуперативного теплообменного аппарата с ребристой поверхностью была определена в программе Autodesk Inventor при построении ее трехмерной геометрии и составила 0,838 м2. Экспериментальная установка была выполнена из стали СТ 20. При этом коэффициент теплопроводности стали λ составлял 48,5 Вт/(м·К).

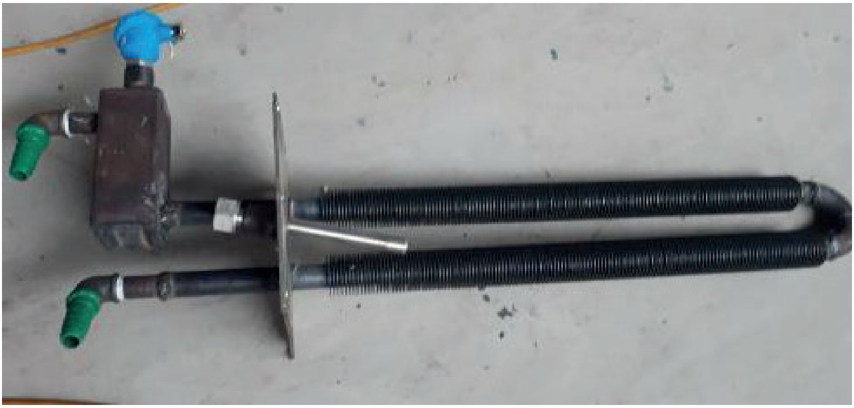


Рисунок 1 – Экспериментальный блок рекуперативного теплообменного аппарата

Результаты экспериментальной работы показали, что время выхода на стационарный режим составляет 265 с. Значение теплового потока и коэффициента теплопередачи в среднем при объемном расходе холодного теплоносителя от 60 до 120 л/час на стационарном режиме составило 4,3 кВт и 26 Вт/(м2·К) соответственно. Полученные результаты позволили установить, что коэффициент теплопередачи обратно пропорционален термическому сопротивлению парогазовой фазы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-2710.2021.4

Список литературы

1. Зинуров, В. Э. Экспериментальное исследование теплообмена от парогазовой смеси при передаче тепла через ребристую поверхность / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, И. И. Шарипов, А. Р. Галимова // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2021. Том 7. № 2 (26). С. 60-74.

2. Зинуров, В. Э. Снижение энергетических затрат при отводе низкопотенциального тепла от оборотной воды путем использования блока оросителя с гофрированными перфорированными пластинами / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, Р. Р. Гайнатуллин, Д. Н. Латыпов, А. И. Хафизова // Вестник технологического университета. - 2019. – Т. 22. – № 10. – С. 57-61.

РАЗДЕЛЕНИЕ ВОДОНЕФТЯНОЙ ЭМУЛЬСИИ В СЕПАРАТОРЕ

Моисеева К.С., студент
Казанский государственный энергетический университет

Повышение эффективности и скорости разделения водонефтяной эмульсии является важной задачей для промышленных предприятий и при экологических катастрофах. В работе рассмотрены методы, позволяющие произвести разделения водонефтяной эмульсии. Отмечено, что главным недостатком всех методов является медленное разделение водонефтяной эмульсии. Авторами работы представлена конструкция сепаратора для разделения водонефтяной эмульсии. Показан принцип действия данного устройства. Представлены результаты экспериментального исследования. Исследования показали, что минимальная эффективность разделения водонефтяной эмульсии составляла 96,4 % при температуре исходной смеси 30 ºС. При росте температуре от 30 до 50 ºС эффективность повышается. применение блока с П – образными сепарационными элементами является рентабельным мероприятием при разливе нефтепродуктов в водные экосистемы, ввиду высокой эффективности, компактности устройства, простоты действия и отсутствия движущихся механизмов.

Abstract. Increasing the efficiency and speed of separation of oil-water emulsion is an important task for industrial enterprises and in case of environmental disasters. The paper considers methods that allow the separation of oil-water emulsion. It is noted that the main disadvantage of all methods is the slow separation of the oil-water emulsion. The authors of the work presented the design of a separator for the separation of oil-water emulsion. The principle of operation of this device is shown. The results of an experimental study are presented. Studies have shown that the minimum separation efficiency of the oil-water emulsion was 96.4% at the initial mixture temperature of 30 ° C. With an increase in temperature from 30 to 50 ° C, the efficiency increases. the use of a block with U-shaped separation elements is a cost-effective measure when oil products are spilled into aquatic ecosystems, due to the high efficiency, compactness of the device, simplicity of operation and the absence of moving mechanisms.

Ключевые слова: сепаратор, водонефтяная эмульсия, водонефтяные глобулы, деэмульсация.

Key words: separator, water-oil emulsion, water-oil globules, demulsification.

Эффективное и быстрое разделение водонефтяной эмульсии является важной задачей для промышленности и при экологических катастрофах, так как нарушается ход естественных процессов, приводящих к изменению условий обитания живых организмов, зачастую к их смерти [1-3]. На данный момент известно большое количество методов разделения водонефтяной эмульсии: термический, механический, физико-химический и биологический [4-7]. Как правило, недостатком всех методов является скорости разделения водонефтяной эмульсии. Поэтому важной задачей является разработка новых или модернизация старых устройств, которые позволят повысить скорость и эффективность разделения водонефтяной эмульсии.

Авторами данной работы предлагается сепарационное устройство с *П*-образными элементами, изображенное на рисунке 1. Основными компонентами сепарационного устройства являются: входной *1* и выходной *5* патрубки, предназначенные для подачи и отвода водонефтяной эмульсии и очищенной воды соответственно, *П*-образные элементы *2*, за счет которых создается необходимая структура потока и отверстия для отвода нефтяных компонентов *3*. Стоит отметить, что ряды *П*-образных элементов располагаются в шахматном порядке. При этом для компактности четные ряды *П*-образных элементов могут быть обрезаны на 50 %, что не повлияет на создаваемую структуру потока.

В ходе проведения исследований определялись плотности исходной эмульсии, легкой и тяжелой фаз при помощи ареометра AM MDS – 300, предназначенного для измерения плотности нефтепродуктов в диапазоне значений от 800 до 1010 кг/м^3. Соотношение массовых расходов тяжелой и легкой фаз составляло в среднем 1:10. Скорость движения водонефтяной эмульсии в узких сечения блока с П-образными сепарационными элементами составляла от 1,39 до 2,15 м/с. Начальная температура водонефтяной эмульсии составляла 30 ºС.

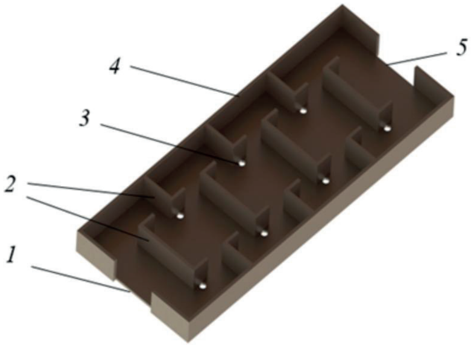


Рисунок 1 – Упрощенная трехмерная модель сепарационного устройства с *П*-образными элементами (вид в разрезе): *1* - входной патрубок; *2* - *П*-образные сепарационные элементы; *3* - отверстия для отвода нефтяных продуктов; *4* - корпус устройства; *5* - выходной патрубок

Применяемая в исследованиях сырая нефть имела высокую температура замерзания, около 28 – 35 ºС, содержание твердых парафинов в сырой нефти составляло 27 %, температура плавления твердого парафина находилась в диапазоне от 50 до 65 ºС. Содержание смолы, асфальтена в сырой нефти составляло от 10 до 15 %.

В ходе проведенных исследований было установлено, что применение блока с *П* – образными сепарационными элементами является рентабельным мероприятием при разливе нефтепродуктов в водные экосистемы, ввиду высокой эффективности, компактности устройства, простоты действия и отсутствия движущихся механизмов. Одним из перспективных методов интенсификации разделения водонефтяной эмульсии является повышение температуры. Однако, как показали исследования, повышение эффективности в диапазоне ±2,5 % свидетельствует о том, что его применимость может быть обусловлена наличием и доступностью нагревательных устройств. При увеличении концентрации сырой нефти в исходной смеси необходимо увеличение количества рядов П-образных элементов или движения водонефтяной эмульсии по установке несколько раз.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-616.2020.8.

Список литературы

1. Dmitrieva, O. S. Separation of water-oil emulsions in device with enlarged throughflow capacity / O. S. Dmitrieva, I. I. Sharipov, V. E. Zinurov // Advances in raw material industries for sustainable development goals: Proceedings of the xii russian-german raw materials conference (Saint-Petersburg, RUSSIA, 27-29 November 2019). – CRC Press, 2020. – pp. 296-302

2. Zinurov, V. E. The experimental study of increasing the efficiency of emulsion separation / V. E. Zinurov, I. I. Sharipov, O. S. Dmitrieva, I. N. Madyshev // E3S Web of Conferences. - EDP Sciences. – 2020. – V. 157. – P. 06001. DOI: 10.1051/e3sconf/202015706001 (Key Trends in Transportation Innovation (KTTI-2019))

3. Галимова, А. Р. Сепарационное устройство с соосно расположенными трубами для разделения водонефтяных эмульсий / А. Р. Галимова, В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, В. В. Харьков // Вестник технологического университета. - 2021. – Т. 24. - № 3. – С. 50-54.

4. Мадышев, И.Н. Исследование влияния диаметра выходных отверстий на эффективность разделения эмульсии в прямоугольных сепараторах / И. Н. Мадышев, В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, С. В. Данг, Г. Р. Бадретдинова // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020. – Т. 24. – № 6 (155). – С. 1232-1242.

5. Зинуров, В. Э. Исследование процесса деэмульсации водонефтяной эмульсии в отстойнике с гофрированными пластинами / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, О. С. Дмитриева, В. В. Харьков, А. Р. Галимова // Вестник технологического университета. - 2020. – Т. 23. - № 7. – С. 61-64.

6. Зинуров, В. Э. Интенсификация очистки сточных вод ТЭС от нефтепродуктов в отстойниках / В. Э. Зинуров, А. В. Дмитриев, И. И. Шарипов, С. В. Данг, В. В. Харьков // Вестник технологического университета. - 2020. – Т. 23. - № 6. – С. 64-67.

7. Дмитриев, А. В. Моделирование процесса разделения водонефтяной эмульсии в прямоугольном сепараторе / А. В. Дмитриев В. Э. Зинуров, О. С. Дмитриева, С. В Данг // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2018. – № 3 (39). – С. 65-71.

ПРИЧИНЫ КОРРОЗИОННОГО ПОВРЕЖДЕНИЯ УЧАСТКОВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ СТАЛЕЙ 1.4301 и S32100

Муратаев Фарид Исхакович
Самсонова Татьяна Игоревна

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ

Аннотация: В образцах сварных соединений импортных аустенитных сталей выявлены недопустимые дефекты металлургической и производственной наследственности. Они послужили веской причиной инцидента – коррозионного разрушения металла при эксплуатации оборудования. Определена степень соответствия химического состава металла сопроводительной документации. Выявлены признаки нескольких видов электрохимической коррозии металла сварных соединений. Установлены причины деградации металла соединений аустенитных сталей, имеющие металлургическую, технологическую и эксплуатационную наследственность

Abstract: In the samples of welded joints of imported austenitic steels, unacceptable defects of metallurgical and industrial heredity were revealed. They served as a good reason for the incident - corrosion destruction of metal during operation of the equipment under typical conditions. The degree of conformity of the chemical composition of the metal to the accompanying documentation has been determined. The signs of several types of electrochemical corrosion of the metal of welded joints are revealed. The reasons for the degradation of the metal of the joints of austenitic steels, which have metallurgical, technological and operational heredity, have been established.

Ключевые слова: дефекты сварки нержавеющих сталей, коррозия.

При сварке аустенитных сталей оплавлением металла могут возникать пять видов проблем, осложняющих технологию изготовления и эффективное использование технических устройств. Первая – образование горячих трещин [1-6], которые обусловлены транскристаллизацией структуры шва и существенной разницей температуры формирования основы - аустенита (γ) и вторичных фаз: δ - феррита, карбидов Cr_7C_3, $Cr_{23}C_6$ и σ - фазы. Вторая – значительное снижение эксплуатационных температур сварных соединений аустенитных сталей (ССАС), вызванное наличием ферритной фазы [1-5]. Проблема, связанная с уменьшением стойкости ССАС к межкристаллитной коррозии [1-3, 6-9], возникающая в интервале длительного действия температур 470-840^{O}C, из-за сплошной оторочки зерен аустенита карбидами $Cr_{23}C_6$.

Проблема, значительного снижения ударной вязкости ССАС (до 3-х раз), вызванная наличием σ – фазы [1-3]. Наконец - пятая, вызванная образованием при сварке оплавлением очень высоких технологических (сварочных) напряжений, обусловленных низкой теплопроводностью металла и высоким коэффициентом объемного температурного расширения аустенитных сталей.

Анализом трех образцов ССАС, выполненных ручной аргонодуговой сваркой выявлены: непровары в сварном шве (СШ) образца № 1 - элемента ПС трубопровода установки (рис.1, а).

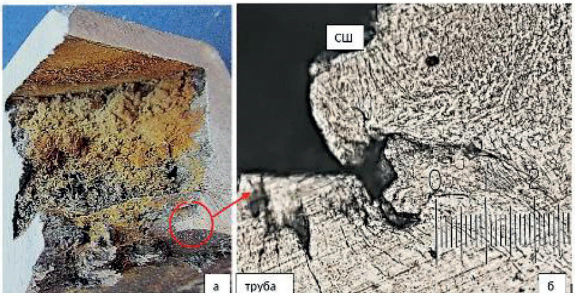


Рис.1 Развитие язвенной ножевой-подповерхностной коррозии в ССАС (а) в зоне непровара трубы (б)

Они послужили причиной язвенного коррозионного повреждения В металле ЗТВ трубы (рис.1, б) ножевая коррозия преобразуется в подповерхностную. Заглушка и основной металл незначительно подвергнуты равномерной электрохимической коррозии (ЭХК). Образец ССАС №3 - элемент перегородки бака-хранилища, с непроваром в поверхности сплавления (ПС) имеет развитое коррозионное повреждение: избирательного ножевого и язвенного характера (рис.2), которое развивается со стороны корня сварного шва (СШ). Выявлены иные варианты избирательной, точечной и подповерхностной неравномерной электрохимической коррозии, развитые от не проваров ССАС (рис3). Непровары в поверхности сплавления шва трубы и крышки в образце ССАС № 1 провоцируют развитие подповерхностной, поверхностной и ножевой коррозии (рис.3 а-г). Стресс-коррозия СШ спровоцирована неметаллическими включениями (рис.3, е).

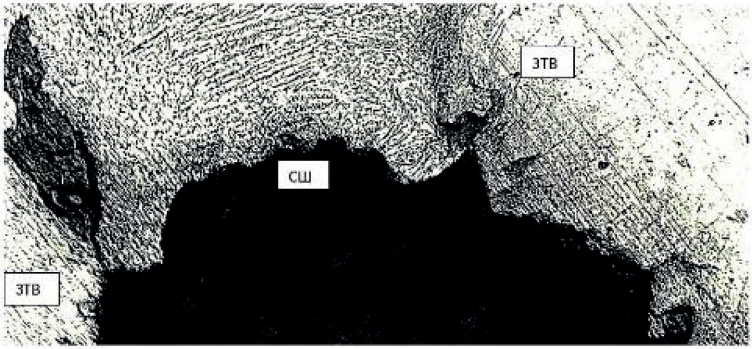


Рис.2 Структура ССАС с развитыми участками коррозии в ПС и СШ

Металл по загрязненности и по качеству СС имеет недопустимые дефекты. Нераскатные сульфиды (С) и оксисиликаты (СН) >4 балла шкалы СН ГОСТ 1778.

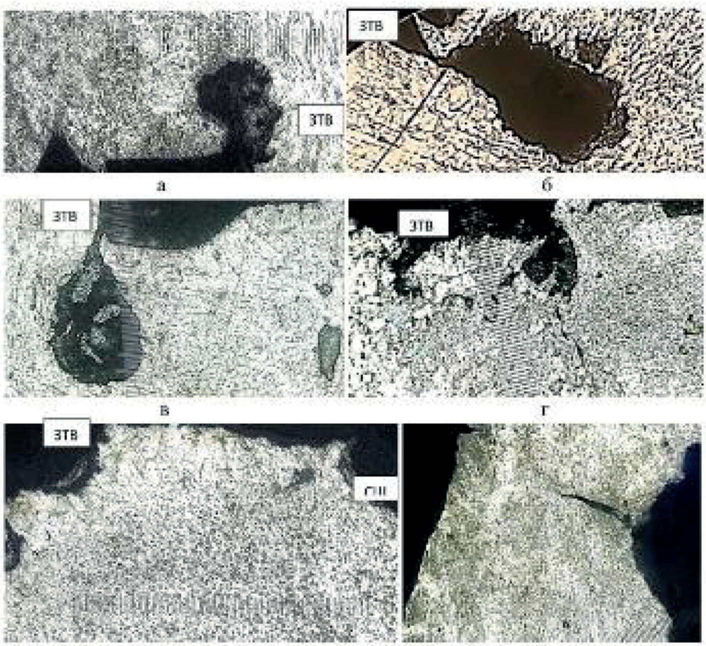


Рис.3 Структура ССАС с развитыми участками коррозии от непровара в зоне поверхности сплавления шва: а-в – подповерхностная, развитая из ножевой (щелевой) коррозии; г, е – ножевая и стресс-коррозия; д – поверхностная неравномерная и подповерхностная коррозия.

Обращает на себя внимание сложный структурный состав СШ, состоящий из аустенита, феррита, σ-фазы нитридов титана (рис.4). Последние привлекают к себе фронт относительно равномерной поверхностной коррозии.

Рис 4 Микроструктура образца СШ № 3

Выводы

1. Выявлены недопустимые металлургические дефекты (загрязненность металла включениями) и непровары в образцах ССАС №№ 1, 3.
2. Преимущественно процесс коррозии развивается в металле поверхности сплавления и сварного шва сталей 1.4301, S32100.
3. Повреждения металла сварного шва происходит часто по вариантам: язвенной, избирательной, пятнами, точечной и подповерхностной коррозии.
4. Непровары металла в поверхности сплавления провоцируют его деградацию, по вариантам: язвенной, ножевой и подповерхностной коррозии.

Использованные литературные источники

1. *Ф.И. Муратаев, А.В. Евлампьев, Т.А. Муратаев* Анализ причин стресс-коррозии аустенитных сталей и сварных соединений // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2021. №1. С. 76–81.
2. Муратаев Ф.И., Мухамадеев И.М. Металлография коррозионного растрескивания сталей // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2020. Т. 76. №3. С. 49-55.
3. *Муратаев Ф.И., Загидуллин А.Д.* Обеспечение стойкости сварных соединений аустенитных сталей к межкристаллитной коррозии // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, 2019. №2. С. 45-50.
4. *Ф.И. Муратаев, А.В. Евлампьев, А.Ф. Муратаев* Определение закономерностей повреждения сплава GX45NiCrSiNbTi35-25 центробежно-литых труб радиантных змеевиков // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2022. № 2. С. 96-102.
5. *Ф.И. Муратаев* Типовые и деградационные признаки микроструктуры сварных соединений конструкционных и специальных сталей // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2013. № 2. Выпуск. 3. С. 84-89.

6. *Шабалин Е.А., Муратаев Т.А., Муратаев Ф.И.* Влияние количества интерметаллида $CuAl_2$ на микротвердость сварного соединения // Materials. Technologies. Design. № 2(4). С. 37–42.

7. Ф.И. Муратаев, А.В. Евлампьев, А.Ф. Муратаев Закономерности электрохимической коррозии сварных соединений аустенитных сталей // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2022. №1. С. 69-76.

8. Муратаев Ф.И., Фролова А.Б. ИССЛЕДОВАНИЕ СОСТАВА И СВОЙСТВ КОНТАКТНОГО СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ В РАСТРУБ МЕДНЫХ И АЛЮМИНИЕВЫХ ТРУБОК // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2021. №3. С. 62-66

9. *Муратаев Ф.И., Махмутянов А.Н., Муратаев Т.А.* Превращения титановых сплавов в лазерном пятне при ударном упрочнении // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2020. № 2. С. 57–62.

10. *Муратаев Ф.И., Муратаев А.Ф.* Адаптация состава, структуры, свойств металла и сварных соединений теплообменников к сопротивлению высокотемпературной газовой коррозии // Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. 2015. № 3. С. 119–125.

11. *Муратаев Ф.И., Клабуков М.А., Муратаев А.Ф.* Деградация состава и структуры сталей и сварных соединений змеевиков парообразования в условиях химической и электрохимической коррозии // ISSN 2078-6255. Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева 2016, №4. С. 44-49.

ОСОБЕННОСТИ ТОПЛИВОПОДГОТОВКИ МЕТАНО-ВОДОРОДНОЙ СМЕСИ ДЛЯ ГТУ

Борис Михайлович Осипов [1], Ишалин Александр Вениаминович [2]

[1,2]ФГБОУ ВО «КГЭУ», г. Казань,

[1] obm0099@yandex.ru, [2]Aiv1999@yandex.ru

Аннотация: В статье рассмотрены особенности топливоподготовки метано-водородной смеси для камеры сгорания ГТУ. Выявлено воздействие на отборы и ГТУ

Ключевые слова: ГТУ, топливо, КПД, метан, водород, эффективность, турбина, мощность, природный газ, температура.

Подготовка топливного газа, ответственное мероприятие [1]. Для стабильного зажигания, горения и температурного поля, необходимо приводить параметры как давление и температура к определенным значениям. Обычно, подводимый топливный газ, подводимый к камере сгорания, имеет повышенное давление, поэтому его понижают. С температурой аналогичная ситуация, разность заключается в том что температуру обычно повышают. На температуру топлива значительно влияет температура окружающей среды, чем она ниже, тем больше необходимо затрачивать энергии для доведения газа до приемлемых параметров. Повышение температуры идет за счет сжатого воздуха из компрессора. Воздух из компрессора поступает в теплообменник, где отдает часть своей энергии топливу.

Для метано-водородной смеси технология аналогична, главное изменение это увеличение удельной теплоемкости газа, это напрямую влияет на количество подводимого воздуха. При добавлении водорода в топливо увеличивается его теплота сгорания при сжигании 1 кг [2].

Увеличенная удельная теплоемкость газа влечет за собой увеличение расхода воздуха. Увеличение теплоемкости достигает 26,7%, расход воздуха в теплообменник увеличивается аналогично [3].

Замена топливного газа помимо изменения энергетических характеристик влечет за собой изменение на его подготовку. В случае метано-водородного топлива затраты на топливо подготовку увеличиваются вследствие увеличения удельной теплоемкости газа.

Источники

1. Марьин, Г. Е. К вопросу качества топливного газа газотурбинной установки / Г. Е. Марьин, Д. И. Менделеев // Энергия-2021 : ШЕСТНАДЦАТАЯ ВСЕРОССИЙСКАЯ (ВОСЬМАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ) НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ И МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ. В 6 т., Иваново, 06–08 апреля 2021 года. – Иваново: Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина, 2021. – С. 53. – EDN VELGWC.

2. Марьин, Г. Е. Использование водорода в качестве топливного газа для энергетических ГТУ / Г. Е. Марьин // XXV Туполевские чтения (школа молодых ученых) : Международная молодёжная научная конференция, посвященная 60-летию со дня осуществления Первого полета человека в космическое пространство и 90-летию Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ. Материалы конференции. Сборник докладов. В 6-ти томах, Казань, 10–11 ноября 2021 года. – Казань: Индивидуальный предприниматель Сагиева А.Р., 2021. – С. 274-277. – EDN QGKLOT.

3. Матвейчук, А. С. Комплексное исследование физико-химических и теплотехнических свойств соломы и шелухи для разработки требований к энергетическому топливу из отходов биомассы / А. С. Матвейчук, Е. В. Рудавина, Н. В. Чернявский // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2011. – № 3(8). – С. 103-106. – EDN WFQWFJ.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ПРИМЕСЕЙ АНТИОКИСЛИТЕЛЬНОЙ ПРИСАДКИ В ИЗОЛЯЦИОННЫХ МАСЛАХ ТРАНСФОРМАТОРНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Павлов Андрей Владимирович, Танеева Алина Вячеславовна, Новиков Вячеслав Фёдорович

Казанский Государственный Энергетический Университет, г. Казань
xeopro@yandex.ru, alinataneeva@mail.ru, npo_aist@mail.ru

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы определения примесей антиокислительной присадки «Ионол» в изоляционных маслах трансформаторного электрооборудования хроматографическими методами, которые используются в испытательных лабораториях энергопредприятий для диагностики маслонаполненного электрооборудования. Методом газо-жидкостной хроматографии определены времена удерживания органических экстрагентов, используемых для извлечения антиокислительной присадки и найдены зависимости, связывающие логарифм времени удерживания сорбатов с их температурами кипения.

Annotation. The paper considers the issues of determining the impurities of the antioxidant additive "Ionol" in the insulating oils of transformer electrical equipment by chromatographic methods, which are used in testing laboratories of power enterprises for diagnosing oil-filled electrical equipment. The retention times of organic extractants used to extract the antioxidant additive were determined by gas-liquid chromatography and dependencies were found that relate the logarithm of the retention time of sorbates to their boiling points.

Ключевые слова: Примеси, диагностика, изоляционное масло, электрооборудование.

В трансформаторном электрооборудовании широко применяется изоляционное масло, которое является диэлектрическим материалом и служит охлаждающей средой. В процессе эксплуатации трансформаторного электрооборудования изоляционное масло под влиянием негативных факторов подвергается деструкции, которая способствует ухудшению его диэлектрических и эксплуатационных характеристик. С целью продления времени эксплуатации энергетического масла в него помещают антиокислительную присадку, которая тормозит радикально-цепной механизм деструкции органических соединений. Этот процесс протекает в результате улавливания активированными молекулами антиокислительной присадки свободных перекисных радикалов, которые образуются в результате термического и гидролитического окисления изоляционного масла [1-2]. Обычно антиокислительная присадка дозируется в изоляционное масло во время его получения на нефтеперерабатывающем заводе в количестве от 0,1 до 0,4% массы. В случае нарушения границы этих концентраций процесс деструкции изоляционного масла может ускориться, что приведет к ускоренному износу трансформаторного электрооборудования и создает риск возникновения аварийных ситуаций. Помимо этого, антиокислительная присадка с течением времени вырабатывается, что приводит к тому, что её содержание в изоляционном масле необходимо регулярно контролировать [3].

Одной из основных антиокислительных присадок, добавляемых в изоляторное масло, является 2,6-ди-трет-бутил-4-метилфенол под торговым названием «Ионол». Эта антиокислительная присадка относится к липофильным органическим веществам, представителям класса фенолов [4]. Она переводит растворимые в изоляционном масле металлы в комплексы, в которых атом металла не обладает каталитической активностью и электрической проводимостью, что приводит к уменьшению диэлектрических потерь [5]. Ионол обладает донорными свойствами атома водорода в результате чего подавляет автокаталитические процессы радикального окисления органических веществ. В этом случае пероксидные радикалы превращаются в гидропероксиды, а каждая молекула ионола деактивирует два пероксидных радикала. При этом протекает процесс биодеградации ионола [6].

Для определения антиокислительной присадки «Ионол» в свежем изоляционном масле мы использовали метод газо-жидкостной хроматографии, которая позволяет разделять и определять примеси органических соединений с достаточно высокой точностью [7-8]. Экспериментальную часть работы выполняли на газо-жидкостном хроматографе «Хромос ГХ-1000» с пламенно-ионизационным детектором, капиллярной хроматографической колонкой, заполненной полярной неподвижной жидкой фазой. Дозировка пробы в инжектор хроматографа осуществлялась в автоматическом режиме с использованием автосамплера.

Кварцевая капиллярная колонка длиной 30 метров, внутренним диаметром 0,32 мм. была заполнена неподвижной фазой Vako BoHa VB WAX P/n CF с толщиной пленки 0,5 мкм. В качестве газа-носителя применяли аргон высокой степени очистки, скорость которого через капиллярную колонку составляла 0,85 мл/мин.

Проводили статистическую обработку экспериментальных результатов, при этом оценку относительных, абсолютных и среднеквадратичных погрешностей измерений проводили с учетом представительности выборки, при пяти параллельных определениях хроматографических величин с учетом доверительной вероятности 0,95.

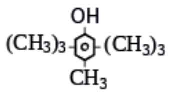
Прямой газо-хроматографический анализ ионола в трансформаторном масле не привел к желаемому результату. Поэтому для извлечения ионола из трансформаторного масла использовали жидкостную экстракцию органическими растворителями в качестве которых применяли алифатические спирты, физико-химические и хроматографические свойства которых приведены в таблице.

Как видно из таблицы времена удерживания органических экстрагентов существенно отличаются от времени удерживания ионола, что связывается с его высокой температурой кипения. В этом случае для анализа ионола необходимо повышать температуру хроматографической колонки. Но в этом случае будет ухудшаться селективность разделения органических экстрагентов.

Таблица 1

Физико-химические и хроматографические свойства органических экстрагентов и ионола

$T_{кип}{}^0с$ – температура кипения, μ_{20} – дипольный момент при температуре $20^0с$, $n_Д^{20}$ – показатель преломления, E_{20} – диэлектрическая проницаемость, $t_{уд}$ – время удержания при $100^0с$, d_n^{20} – плотность.

№/пп	Экстрагент	Формула	$T_{кип}{}^0с$	μ_{20}	$n_Д^{20}$	E_{20}	d_n^{20}	$t_{уд}100^0$ с
1	Метанол	CH_3OH	64,7	1,65	1,32	3,30	0,792	2,45
2	н. Гексан	C_6H_{14}	68,0	0	1,42	1,90	0,660	2.07
3	Тетрахлорметан	CCl_4	76,7	0	1,46	2,20	1,594	2,39
4	Этилацетат	$C_4H_8O_2$	77,1	2,48	1,37	6,00	0,900	2,38
5	Этанол	C_2H_5OH	78,4	1,68	1,36	25,0	0,789	2,53
6	Метилэтилкетон	C_4H_8O	79,6	2,85	1,38	19,0	0,805	2,46
7	Бензол	C_6H_6	80,1	0	1,50	2,30	0,879	2,58
8	изо. Пропанол	C_3H_7OH	82,6	1,78	1,38	18,0	0,785	2,43
9	Дихлорэтан	$C_2H_4CL_2$	83,6	1,75	1,44	11,0	1,256	3,04
10	изо. Бутанол	$(CH_3)_2CHCH_2OH$	108,0	1,79	1,39		0,803	3,29
11	Толуол	C_7H_8	110,6	0,06	1,50	2,3	0,866	3,12
12	н.-Бутанол	C_4H_9OH	117,4	1,62	1,39	17,7	0,810	3,89
13	Бутилацетат	$C_5H_{12}0_2$	126,0	1,85	1,49	5,10	0,881	3,28
14	изо.-Аминол	$(CH_3)_2CHCH_2CH_2OH$	132,0	1,82	1,41	14,7	0,813	4,74
15	Диметилсульфоксид	C_2H_6OS	189,0	3,90	1,48	45,0		-
16	Ионол		265,0	-	1,05	-		110,5

На рис.1 приведена зависимость логарифма времени удерживания экстрагентов и ионола от температуры анализа. Эта зависимость показывает, что после температуры $t20^0с$ времена удерживания этанола и изо-Аминола практически не зависят от температуры и их хроматографические пики сливаются. Очевидно, что в этом случае оптимальной температурой хроматографического разделения ионола и экстрагентов будет $200\text{-}220^0C$, когда наблюдается достаточно хорошая селективность разделения.

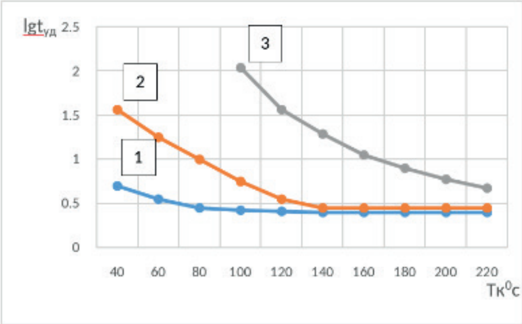


Рис. 1. Зависимость логарифма времени удерживания экстрагентов и ионола от температуры анализа. 1. Этанол 2. изо-Аминол 3. Ионол

Литература

1. Yang Liua., LijunVang, Ende Hu., Jiajia Huang. Effects of antioxidants and acids on copper sulfide generation and migration induced by dibenzyl disulfide in oil-immersed transformers. // IEEI transformers on electrical and electronic engineering. – 2015, - V.10, №4, - P.357-363.

2. Рачинский В.А. Фенольные антиоксиданты. Реакционная способность и эффективность. – М.:Наука, - 1988, - 247с.

3. Lopatin V., Noskov M.D., Badent R., Kist K.,Schwab A.J. Positive discharge development in insulation oil: Options observation and simulation.//IEEI transformer on dielectric and electrical insulation. 1998, - V.5, - №2, - P.250-258.

4. Dommen T.V., Claiborn C.C., Biodegradable insulating fluid high oleic vegetable oils. // Proc. of 37th CIGRE session. Paris. 1998. - Paper 15, - P.302.

5. Georgiev A., Karutanchery I., Topalova F. Evaluation of the antioxidation activity of ionol and piperidine towards transformers oil using FT-JR spectroscopy. // Journal of molecular structure. – 2006, - V.797, - №1-3, - P.25-53.

6. Phung B.T., Muhammad N.A., Blackburn T.R. Practical discharge and dissolved gas analysis of common fault types in bio-degradable oil transformers. // Proc. of 43rd CIGRE: Session.Paris. – 2010. – Paper D1-208 [Электронный ресурс].

7. Хынг Нгуен Зун, Новиков В.Ф. Проблемы определения антиокислительной присадки в трансформаторном масле хроматографичскими методами. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020, т. 22, - №5, - С.107-115.

8. Хынг Нгуен Зун, Снигирева Ю.В., Танеева А.В., Новиков В.Ф. Влияние природы органических растворителей на процесс разделения антиокислительной присадки в трансформаторном масле газо-хроматографическим методом. // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2020, - т.22, - №6, - С.211-220.

АНАЛИЗ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ГТЭ45У С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АС ГРЭТ И КОМПАС-3D

Савина Мария Валерьевна, доцент кафедры ЭМС
pmv_83@mail.ru
Хасанов Айрат Ахметович, студент-бакалавр
Викторов Евгений Николаевич, студент-магистрант
Микусов Егор Олегович, студент-магистрант

ФГБОУ ВО Казанский государственный энергетический университет,

Аннотация. В работе рассматривается вопрос создания эскизного проекта отдельных элементов ГТУ в Компас-3D по расчетным данным, полученным в АС ГРЭТ на примере ГТЭ45У.

Abstract. The paper considers the issue of creating a preliminary design of individual elements of the gas turbine in Compass-3D according to the calculated data obtained in AS GRET on the example of GTE45U.

Ключевые слова. Газотурбинная установка, АС ГРЭТ, осевая турбина, проектирование, Компас-3D

В современных авиационных ГТД используются охлаждаемые осевые многоступенчатые турбины со ступенями давления, где реализуется реактивный процесс расширения газа, поступающего в турбину из камеры сгорания двигателя.

На первом этапе газодинамического расчета проводится выбор параметров турбины (диаметр, число оборотов, число ступеней, выходная скорость и др.). В процессе предварительного расчета намечается меридиональный контур проточной части турбины, оцениваются размеры и прочность лопатки первой и последней ступеней турбины, а также выбирается число ступеней и намечается распределение теплового перепада по ступеням турбины. КПД турбины выбирается аналогичным, как и в тепловом расчете.

На втором этапе в результате детального расчета турбины на среднем диаметре определяются и уточняются геометрические размеры проточной части, параметры потока в характерных сечениях, КПД и мощность турбины.

На третьем этапе в результате расчета пространственного потока в ступенях турбины получают исходные данные для профилирования сопловых и рабочих лопаток по высоте ступени (закрутки лопаток), а также само профилирование лопаток в различных сечениях по высоте [1].

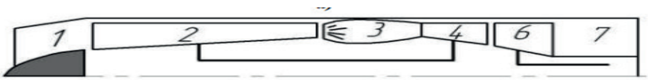


Рис. 1 Принципиальная схема наземной ГТУ:
1 – входное устройство; 2 – компрессор; 3 – камера сгорания; 4 – турбина;
5 – сопло; 6 – приводная (свободная турбина); 7 – выходное устройство

В работе проведен анализ результатов расчета элементов конструкции ГТУ ГТЭ45-У (принципиальная схема представлена на рис. 1) в составе различных ПГУ (табл. 1).

Таблица 1.

Исходные данные для теплового расчета ПГУ

Параметры	1 схема	2 схема
Температура воздуха на входе в компрессор T_1, К	288	288
Расход воздуха $G_в$, кг/с	125	125
Температура газов перед газовой турбиной T_3, К	1500	1500
Степень сжатия в компрессоре $\pi_к$	13,5	13,5
Паровая часть	Т-25-3,4	Т-35/50-7,2
Расход пара D, кг/с	44,44	42,22
Давление пара P, МПа	3,4	7,15
Температура пара t, °C	435	500
Давление в отборе на верхний сетевой подогреватель $P_{вс}$, МПа	1,46	0,2
Давление в отборе на нижний сетевой подогреватель $P_{нс}$, МПа	0,48	0,25
Тепловая нагрузка $Q_Т$, кВт	30 000	52 335
Полученная мощность ПГУ, МВт	100,552	111,878

*Т1- для работы ГТУ на номинальном режиме; P0=0,1013 МПа; показатель изоэнтропы сжатия воздуха k=1,41; потери давления во входном устройстве приняты равными 3 % и 5 % из-за того, что после ГТУ установлен котел утилизатор, в камере сгорания - 5%. ηк=0,85÷0,89; ηт =0,87÷0,95.

После расчета осевого компрессора и камеры сгорания в АС ГРЭТ [2] определяем исходные данные для построения меридионального контура проточной части турбины (табл. 2) .

Таблица 2.

Исходные данные осевой турбины

Параметры	1 схема	2 схема
Коэффициент возврата теплоты в турбине $\alpha_т$	1,127	1,205
Работа, совершаемая в турбине $H_т$, кДж/кг	725,23,	719,88
средний теплоперепад (работу) в ступенях турбины $h_{ст}$, кДж/кг	350	200
число ступеней турбины z	2*	3*
угол выхода скорости потока из СА 1-ой ступени α_1, º	19	19
степень реактивности в корневом сечении РК 1-ой ступени $\theta_{к1}$	0,1	0,1
окружная скорость РК турбины на среднем диаметре постоянная для всех ступеней $U_{ср,}$ м/	400	340
коэффициент затенения ометаемой площади k_g	0,97	0,97
Площадь сечения потока на входе в СА 1-ой ступени $F_{са1}$, м^2	1,665	1,705
Средний диаметр $D_{ср}$ в СА, м	2,546	2,483
Длина лопаток СА во входном сечении 1-ой ступени $l_{с1}$, м	0,2081	0,2187
Площадь сечения потока газов на выходе из РК последней ступени $F_{pкz}$, м^2	2,835	2,848
Длина рабочих лопаток РК на выходе потока газов из последней ступени $l_{pкz}$, м	0,3544	0,3651
По результатам расчета ГТУ количество ступеней: – в компрессоре (постоянной величиной был наружный диаметр) – в газовой турбине($D_{ср}$=const)	15 2	15 3
Наружный (периферийный) диаметр СА 1-ой ступени Dнса1=Dср+lса1, м	2,75	2,70
Втулочный диаметр соплового аппарата 1-ой ступени Dвтса1=Dср-lса1, м	2,34	2,2643
Наружный (периферийный) РК последней ступени Dнрkz=Dср+lckz, м	2,90	2,85
Втулочный диаметр РК последней ступени Dвтрkz=Dср-lрkz, м	2,19	2,12

* полученное значение числа ступеней турбины $z = H_т / h_{ст}$ округляем до ближайшего целого. Осевая скорость на выходе из СА 1-ой ступени $C_{3ст1} = C_3 \sin(\alpha_1)$.

Естественно втулочного диаметра сопловых аппаратов не существует, втулочный диаметр в этом случае соответствует размеру газодинамического канала СА.

По результатам расчетов строим эскиз проточной части газовой турбины (рис. 3 – для 2 схемы).

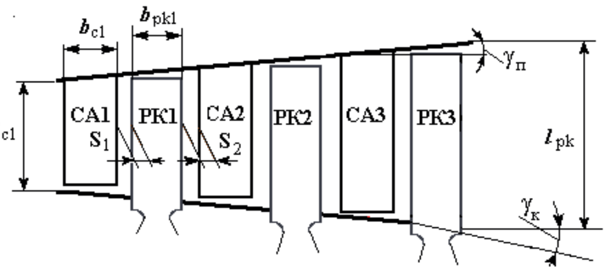


Рис. 3 Эскиз проточной части осевой турбины

На этапе предварительного проектирования ширину лопаток $b_с$ и $b_{рк}$ оценивают приближенно по аналогии с прототипом. Например, одинаковыми принимают относительную ширину в корневом сечении $\overline{B}_к = B_к / l$ в области переходной части лопатки к гантели хвостовика. В первом приближении для лопаток РК можно принять $\overline{B}_{рк}$=0,2…0,4. Меньшие значения соответствуют последним ступеням турбин (малые значения $D_{ср}/l$; большие – к первым.

Выводы. На практике разработки ГТД применяется достаточно большое разнообразие конструктивных схем проточной части, что отражается в соответствующих расчетных схемах, на базе которых разрабатываются математические модели объектов проектирования, а затем программы и пакеты прикладных программ для ЭВМ [3].

В таблице 4 показаны некоторые параметры (произвольные значения), которые используются при построении профиля лопатки турбины в Компас-3D:

Таблица 4

Параметры лопатки турбины

№ п/п	Параметр	Значение
1	Ширина решетки S	60
2	Горло межлопаточного канала (минимальное расстояние между двумя соседними лопатками *a*	20,66
3	Радиус входной кромки профиля r_1	1,82
4	Радиус выходной кромки профиля r_2	1,21
5	Шаг решетки *t*	33,18

Таким образом, можно получить приблизительный профиль лопатки турбины с помощью прикладной программы CAD-системы с использованием метода очерчивания параболами (сплайна по точкам).

Литература

1. Проектный термогазодинамический расчет газовых турбин энергетических машин и установок: учебно-методическое пособие / А. С. Лиманский, В. В. Такмовцев, А. В. Ильинков, И. И. Хабибуллин. — Казань : КНИТУ-КАИ, 2021. — 176 с. — ISBN 978-5-7579-2509-7. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: https://e.lanbook.com/book/248921 (дата обращения: 10.11.2022). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

2. Титов А.В., Осипов Б.М. Инструментальная среда для исследования газотурбинных установок на математических моделях // Вестник КГЭУ. 2017. №4 (36). URL:https://cyberleninka.ru/article/n/instrumentalnaya-sreda-dlya-issledovaniya-gazoturbinnyh-ustanovok-na-matematicheskih-modelyah (дата обращения: 11.11.2022).

3. Виноградов Л.В., Костюков А.В. Автоматизированное проектирование лопаток турбин с параболическими обводами // Известия МГТУ «МАМИ», №1 (15), 2013, т.1, С. 41-47.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ДОСТИЖЕНИЯ В ОБЕСПЕЧЕНИИ НАДЕЖНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ ЦИФРОВОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ

Самигуллин Алмаз Динаисович(1)
Рахимов Радик Рафисович(1)
Жалилов Рашид Бабакулович(2)

Набережночелнинский институт (филиал) ФГАОУ ВО КФУ(1)
Бухарский инженерно-технологический институт (2)

Аннотация. Статья посвящена исследованию внедрения современных ICT технологий в энергетические системы, с целью повышения их надёжности. В ней проанализированы новейшие технические разработки в области интеллектуализации энергосистем при их цифровой трансформации, такие как информационные технологии, технологии цифровизации энергосистем, Smart grid и т.д.

Annotation. The article is devoted to the study of the introduction of modern ICT technologies in energy systems in order to improve their reliability. It analyzes the latest technical developments in the field of intellectualization of power systems during their digital transformation, such as information technology, digitalization technologies for power systems, Smart grid, etc.

Ключевые слова: надежность, информационные технологии, ICT технологии, цифровизация, цифровая трансформация, интеллектуализация ЭЭС, ИЭС, Smart grid.

Введение

Доминирующий в настоящее время подход: «цифровая трансформация – это внедрение современных цифровых технологий в бизнес-процессы социально-экономических систем всех уровней» подразумевает не только установку современного оборудования или программного обеспечения, но и фундаментальные изменения в подходах к управлению, корпоративной культуре, внешних коммуникациях. На настоящем этапе развития цифровой экономики основными подходами к цифровой трансформации социально-экономических систем, по мнению автора [6], могут быть определены: 1.Процессный подход; 2. Отраслевой подход; 3.Технологический подход к цифровой трансформации социально-экономических систем, который предполагает выбор динамического пула технологий, способствующих ускоренной цифровизации и цифровой трансформации конкретной социально-экономической системы.

Расчет показателей надежности системы электроснабжения в случае применения у потребителя, разработанного автором КАТП с SE [16, 17, 18, 21]. Определим вероятность безотказной работы системы электроснабжения потребителей этой системы (рис. 1).

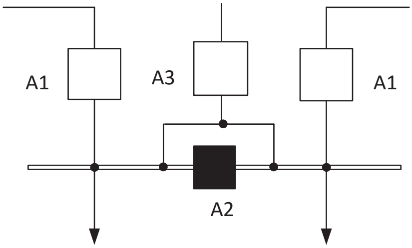


Рис. 1. Питания потребителей по схеме с АВР на СВ и реализацией автоматического обратного перехода на основные ввода.

При отсутствии отказов выключателей двух основных вводов отказ системы происходит при совпадении отказа одного из источников в аварийным простоем другого, т.е.

$Q(S|A_1A_2) = 3 \cdot (1 - 0{,}85)(1 - 0{,}99) = 0{,}0045.$

Условная вероятность отказа 3-го независимого источника (SE)

$Q(S|A_1A_2\overline{A_3}) - = 2 \cdot (0{,}5 \cdot 0{,}9) \cdot 0{,}01 - 3 \cdot 0{,}01 = 0{,}039.$

По формуле полной вероятности [21] получим:

$Q_c = 0{,}0045 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}99 + 0{,}5 \cdot 0{,}1 \cdot 0{,}99 + 0{,}5 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}01 + 0{,}5 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}01 = 0{,}0037\,8\,7 + 0{,}0495 + 0{,}0045 + 0{,}0045 - 0{,}009 = 0{,}062\,29 - 0{,}039 = 0{,}023\,29.$

Вероятность, которую требуется определить

$P_c = 1 - 0{,}023\,29 = 0{,}976\,71.$

Сравнительные результаты

Результаты расчетов и сравнение их представлено таблицей.

Таблица 1. Сравнение показателей надежности вариантов схем электроснабжения

Расчетные показатели	Существующие варианты схем		Разработанная с АВР на СВ и реализацией СЭС с автоматическим обратным переходом
	с АВР на одном из вводов	с АВР на СВ	
$Q(A_1)$	0,05	0,1	0,15
$P(A_1)$	0,95	0,9	0,85
$Q(A_2)$	0,01	0,01	0,01
$P(A_2)$	0,99	0,99	0,99
$Q(S\|\overline{A_1}A_2)$	1	0,5	0,5
$Q(S\|\overline{A_1}\,\overline{A_2})$	1	0,5	0,5

$Q(S\|A_1\overline{A_2})$	1	0,5	0,5
$Q(S\|A_1A_2)$	0,001	0,002	0,003
$Q(S\|A_1A_2A_3)$	-	-	0,039
Q_c	0,060 44	0,056 28	0,023 29
P_c	0,939 56	0,943 72	0,976 71

Применение схемы АВР на СВ и реализацией 3-го независимого источника SE с автоматическим обратным переходом на питание от основных вводов является наиболее маневроспособной и ещё больше повышает надежность электроснабжения потребителей. Вероятность безотказной работы системы электроснабжения в течении времени между плановыми остановками с учетом возможности использования резервного источника высокая и вероятность его отказа за время восстановления рабочего источника не высокая.

Заключение

1. Перспективные информационные технологии, в значительной степени определяющие облик систем управления нового поколения, занимают важное место в обеспечении надежности систем энергетики в условиях их цифровой трансформации.

1. Предложенная схема автоматизации КАТП (SCADA), с целью повышения экономической эффективности энергопотребления, разработана на основе принципов построения ИЭС, сопровождается внедрением множества новых технологий и нарастанием соответствующих информационно-коммуникационных связей, позволяет более обоснованно выбирать варианты электроснабжения промышленных комплексов при их проектировании и реконструкции. Наглядно отражает переход от традиционной ЭЭС к ИЭС по мере повышения функциональных возможностей, надежности и качества ЭЭС.

Литература

1.Zhalilov R. B., Latipov S.T. Key directions of development of measures to improve the reliability of electrical power systems. Scopus, Conference Paper. (2019) E3S Web of Conferences, 139, article № 01001.

2. Aslonov Q. Z., Zhalilov R. B. Efficient and Convenient Application to Determine the Functions and Analysis of the Reliability of the Device// Scopus, International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE) ISSN: 2278-3075, Volume-9 Issue-2, December 2019, p.p. 1804-1809.

3.Technology roadmap - Smart Grid / International Energy Agency, 2011.–52c.

4. Zhalilov R. B. The intellectual automated substation // Science, Technology and Higher Education. Materials of the XIV international research and practice conference. Westwood, Canada, June 29th – 30th, 2017. P.103-107.

5. Zhalilov R. B., Saidmurod Latipov, Aslanova Gulnoz. Using Alternative Energy Sources - Way to Intellectualization and Greater Energy Efficiency in Modern Industrial Enterprises// International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD) Volume 5 Issue 2, January-February 2021 Available Online: www.ijtsrd.com. ISSN: 2456 – 6470, p.908-911.

6. Rashid Jalilov, Saidmurod Latipov. To the question of the development of servers of real-time management systems of electrical engineering complexes on the basis of modern automation systems.// Scopus, Conference Paper.(2021)CEURWorkshop Proceedings, 2843, «ITIDMS2021. https://www.scopus.com/inward/ record.uri?eid=2-s2.0-85103911616 &par-tnerID =40&md5.

7. Жалилов Р.Б., Сытдыков Р.А. Расчет показателей надежности систем электроснабжения потребителей. Материалы международного научного семинара им. Ю.Н.Руденко. Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Выпуск 70. Методические и практические проблемы надежности систем энергетики. Иркутск. – 2019. Книга 1– С. 363-370.

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ТРИГЕНЕРАЦИИ

Самигуллин Алмаз Динаисович(1)
Пузырева Олеся Габдрашидовна (1)
Жалилов Рашид Бабакулович(2)

Набережночелнинский институт (филиал) ФГАОУ ВО КФУ(1)
Бухарский инженерно-технологический институт (2)

Аннотация. В данной статье изучены и проанализированы внедрение новейших комбинированных систем, рассчитанных на целый ряд предлагаемых энергетических услуг для потребителей, на основе используемых систем тригенерации, (одновременная выработка электроэнергии, тепловой энергии и холода) в условиях цифровой трансформации. В статье анализируются различные технологии использования тригенерации (+ производство холода), значительно превосходящие по своим параметрам лучшие современные технологии комбинированного производства электроэнергии, тепловой энергии и т.д.

Ключевые слова: надежность комбинированных систем, использование энергоинформационных систем, тригенерация (комбинированная выработка электроэнергии, тепловой энергии и холода), цифровая трансформация.

Annotation. The article is devoted to the study of the implementation of combined systems designed for a wide range of offered energy services to the consumer, the use of trigeneration systems (combined generation of electricity, heat and cold) in the context of digital transformation. It analyzes various technologies for the use of trigeneration (+ cold production), which are significantly superior in their performance to the best world technologies for combined generation of electricity, heat, etc.

Введение

В современном развитии мировой энергетической системы просматриваются тенденции изменения направления производства энергии в сторону альтернативной, малой энергетики. Одновременное производство электрической энергии, тепла и холода (тригенерация) представляет больший интерес для промышленных производств и социальных объектов по сравнению с традиционной генерацией тепла и электричества (когенерация).

Основным преимуществом тригенерации является эффективное использование бросового тепла при генерации холода посредством использования бромисто-литиевых абсорбционных холодильных установок. Использование тепла в осенне-зимний период является актуальным и пользуется повышенным спросом у потребителей, тогда как в летний период более актуальным является спрос на холод.

Анализ различных технологических схем тригенерации

Современные технологические разработки проникают в том числе и в быт, создавая комфортные условия проживания. Одним из которых являются установки кондиционирования воздуха. Современные кондиционеры могут использоваться как для охлаждения воздуха в помещениях, так и для обогрева помещений в осенне-зимний период.

Заметим, что удельные капитальные затраты на получение 1 кВт электрической энергии в 10-15 раз превосходят затраты на выработку 1кВт тепловой энергии. Возникает огромный интерес к созданию технологических устройств для получения холода из тепловой энергии. Эти разработки получили применение в абсорбционных бромисто-литиевых холодильных машинах. (АБХМ) [2]. При уменьшении потребления тепловой энергии для бытовых нужд, возрастает потребность в холоде для кондиционирования помещений.

Решение данного вопроса лежит на поверхности. Оптимальным решением является установка с ***тригенерацией,*** которая решает одновременно несколько задач, а именно выработка электрической и тепловой энергии, для нужд отопления и горячего водоснабжения в соответствии с графиком отопительного сезона. И холода, когда возникает необходимость в кондиционировании воздуха в помещениях, обратному графику отопительной нагрузки.

Основные преимущества предлагаемой технологии:

В настоящее время тригенерация имеет свои особенные преимущества и решает несколько вопросов одновременно:

1.Обеспечивает бесперебойное электроснабжение потребителей вне зависимости от внешних поставщиков электроэнергии.

2. Уменьшает затраты на капитальные вложения, т.к. нет необходимость в строительстве и эксплуатации котельной и холодильно-компрессорной установок

3. Исключает строительство дорогостоящих высоковольтных линий электропередач (ЛЭП) и понижающих подстанций (КТП) и подключения их к региональным сетям.

4. Оперативно вносит изменения в график нагрузок, в зависимости от суточных и сезонных колебаний нагрузок, что приводит к значительной экономии топлива и увеличения ресурса оборудования.

Принципиальная тепловая схема парогазовой установки (ПГУ) разработанной ОИВТ РАН, модифицированной для работы в системе тригенерации, для комбинированной выработки электроэнергии, теплоты и холода приведена ниже на рис.1.

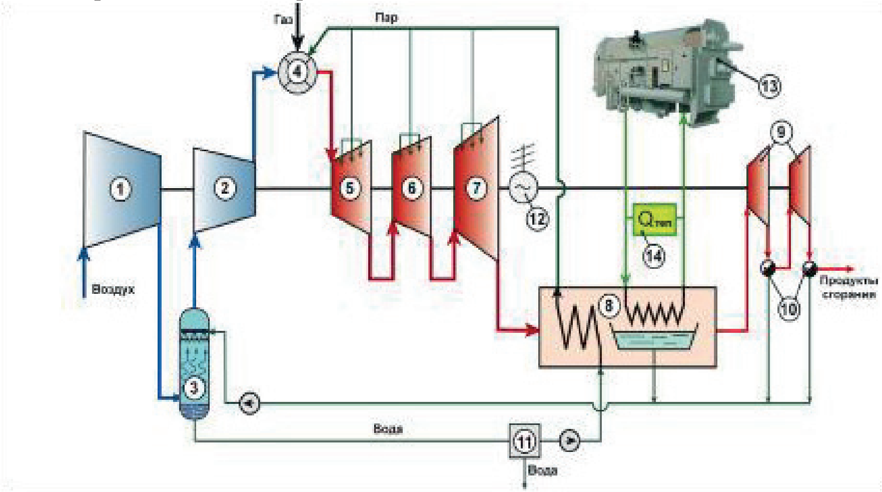


Рис. 1. Принципиальная тепловая схема ПГУ для совместного производства электроэнергии, тепла и холода: 1*–компрессор низкого давления; 2–компрессор высокого давления;3–воздухоохладитель смешивающего типа; 4–камера сгорания; 5–приводная турбина высокого давления;6–приводная турбина низкого давления;7–силовая турбина;8–регенеративный подогреватель (котел-утилизатор) с подогревателем сетевой воды; 9–паровоздушный турбодетандер;10–уловитель капельной влаги;11–система очистки конденсата и подготовки цикловой воды;12–электрический генератор;13–агрегат АБХМ; 14–типовой потребитель тепла (система централизованного теплоснабжения).*

Основные преимущества предлагаемой технологии:

- Возможность использования авиационного двигателя АЛ-31, установленной мощностью 20 МВт, для парогазовой энергетической установки с инжекцией пара, электрической мощностью 80-100 МВт, посредством увеличения степени сжатия ГТУ и за счет инжекции пара в газовый тракт.
- В газотурбинной установке конденсатор пара работает под избыточным давлением 0,35-0,45 Мпа, это дает возможность сконденсировать весь инжектируемый пар из парогазовой смеси и направить ее в замкнутую систему теплообмена для получения горячей сетевой воды, с температурой порядка 100% для теплоснабжения или выработки холода.
- В турбодетандере происходит расширение осушенной парогазовой смеси одновременно охлаждаясь до температуры около 40^0С, где происходит конденсация водяного пара который, образуется при сжигании топлива, что существенно повышает КПД выработки электроэнергии на используемом тепле по низшей теплотворной способности, где КИТТ значительно превышает 100%.
- Выработка тепла увеличивается на 70% по сравнению с традиционными парогазовыми установками бинарного цикла в режиме ТЭЦ при выработке электроэнергии. Это дает более широкие возможности при работе в системе «коджденерейшн», без использования дополнительных пиковых котлов.
- По сравнению с традиционными энергетическими установками здесь уровень низко потенциального тепла, получаемого при отводе из конденсатора парогазовой смеси при любых тепловых нагрузках равна 90-100%. Это наилучшим способом дает возможность обеспечивать системы АБХМ горячим теплоносителем, без лишних затрат, получить и холод, т.е. может работать при номинальных нагрузках круглый год.
- При инжекционной подаче пара в камеру сгорания ГТУ, кроме увеличения установленной мощности газотурбины так же приводит к снижению содержания оксидов азота в дымовых газах до уровня нескольких ppm (экспериментально подтверждено), что делает установку экологически выгодной.
- Наряду с электроэнергией, теплотой и холодом происходит конденсация воды из продуктов сгорания метана, что позволяет использовать ее в технологических нуждах производства и в быту.

Результаты сравнительного технико-экономического анализа.

Ниже приведены три сравнительных варианта для энергообеспечения некоторого замкнутого района:

Для покрытия требуемых потребностей, использовалось дробное число установок. В таблице 1. приведены основные сравниваемые данные альтернативных вариантов:

Таблица 1. Сравнительный анализ альтернативных вариантов

Рассматриваемые варианты	ПГУ + котельная + кондиционеры	ПГУ ТЭЦ + котельная + АБХМ	ПГУ ИВТ РАН + котельная + АБХМ
Электрическая мощность, МВт			
- на общие нужды	220,0	220,0	220,0
- на производство холода	40,8		
- всего	260,8	220,0	220,0
Тепловая мощность, МДж/с:			
- в зимний максимум на нужды теплоснабжения и ГВС	400,0	400,0	400,0
- в летний максимум, всего	96,0	273,0	273,0
в т.ч. на нужды ГВС	96,0	96,0	96,0
в т.ч. на производство холода		177,0	177,0
Расчет количества установок:			
Основная энергетическая установка, МВт			
- установленная мощность	230	230	70
- полезная мощность в номинальном режиме	221,0	212,5	70,1
- полезная мощность в летний период	206,9	200,8	61,8
Условное расчетное число энергетических установок	**1,261**	**1,096**	**3,560**
Котельные установки			
Тепловая мощность основной энергетической установки, МДж/с			
- одной установки	0	160,5	87,5
- суммарная, по всем энергетическим установкам	0	175,8	311,5
Мощность котельной установки, МДж/с	400,0	224,2	88,5
Условное расчетное число водогрейных котлов	**3,439**	**1,927**	**0,761**

Общие капитальные затраты в млн. долл. США	405,4	364,8	305,7
в том числе			
- в основные энергетические установки	329,9	296,1	253,6
- в котельные	49,1	27,5	10,9
-в установки производства холода	26,4	41,3	41,3

В сравнительном анализе четко просматривается высокая эффективность, где годовая экономия энергетических ресурсов составляет порядка 24% по сравнению с ПГУ–ТЭЦ на базе зарубежных ГТУ и порядка 38% по сравнению с вариантом раздельного производства электроэнергии на базе перспективных ПГУ бинарного цикла, теплоты с использованием водогрейных котлов с КПД = 92% и генерации холода с помощью современных электрических кондиционеров. Предлагаемая в сравнительном анализе для реализации ПГУ ОИВТ РАН является экологически более чистой, где выбросы диоксида углерода на 1кВт·ч выработанной электроэнергии снижаются значительно, более чем на 20–30% [2].

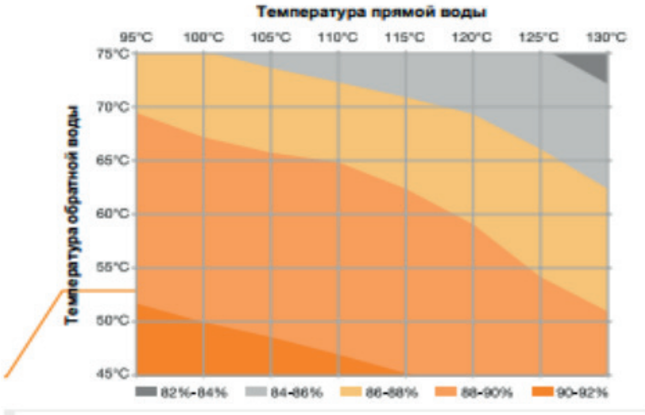


Рис.2. Типичные вариационные кривые для станции тригенерации с двумя двигателями, вырабатывающей электричество, тепло и охлажденную воду.

Заключение

1. Приведенный в статье анализ показывает преимущество перспективных технологий, определяющие в ближайшей перспективе облик систем управления нового поколения в условиях цифровой трансформации.

2. В ближайшей перспективе влияние ТЭЦ, особенно небольших, для жилых домов и малого бизнеса, будет возрастать, если цены на природный газ

будут продолжать расти. Хотя тепло электростанций, использующих в качестве источника энергии биомассу, солнечную энергию, уголь, дизельное топливо, другие тяжёлые нефтепродукты и атомную энергию, может быть использовано для когенерации, такие источники энергии являются малопригодными, более трудны для транспортирования, более дороги для домашнего использования.

3. Применение тригенерационных систем являются эффективными в летний период, когда существует избыток тепла, вырабатываемого мини-ТЭЦ. На практике избыточное тепло обычно выбрасывается в атмосферу с помощью системы принудительного охлаждения.

4. При использовании системы совместного производства холода и электроснабжения, расходы первичного топлива сокращаются на 2/3. Если сравнивать с традиционными централизованными электростанциями или с устанавливаемыми на крышах холодильными компрессорными станциями с электроприводом, то это позволяет обеспечить экономию затрат на первичное топливо более, чем на 60%.

Литература

1.Фортов Е.Е. Энергетика будущего на базе прорывных технологий как основе новой энергетической цивилизации. // Электронный ресурс]. URL:http://www. Energy-strategy. ru/ projects/ energy_ 21.htm.

2. Масленников В.М. Комбинированное производство электроэнергии, тепла и холода – актуальное направление в современной энергетике. // Электронный ресурс]. URL:http://www. Energy-strategy. ru/ projects/ energy_ 21.htm.

3. Кому и зачем нужна комбинированная выработка энергии. // Электронный ресурс .URL:https://www.eprussia.ru/teploenergetika/ 10/142.htm.

4. Комбинированные микро-источники тепловой и электрической энергии. Электронный ресурс. URL:https://global.kawasaki.com/ ru/energy /solutions/distributed_power/index.html.

5. Кудрин Б.И. В.С. Кожиченков. Новые тенденции в тригенерационных технологиях // Портал по теплоснабжению РосТепло.ру. Электронный ресурс. URL:http://www.energosovet.ru.

6. Когенерационные установки на основе двигателей внутреннего сгорания http://www.energosovet.ru/entech.php?idd=97.

7. Когенерационные установки на основе парогазовых систем. http://www.energosovet.ru/entech.php?idd=96.

8.Тригенерация http://www.energosovet.ru/entech.php?idd=98.

9. Централизованное холодоснабжение при когенерации http://www.energosovet.ru/entech.php?idd=99.

10. Rashid Jalilov,Saidmurod Latipov, Alisher Choriyev. On the issue of drawing up the energy balance of a fat-and-oil enterprise.// RSES 2020. E3S Web of Conferences 216, 01140 (2020). https://doi.org/10.1051/-e3sconf/202021601140.

11. Wärtsilä leads the transition towards a 100% renewable energy future.
hhtt//www.wartsila.com/energy.

12. S.T. Latipov, G.N. Aslanova. Calculation of reliability indicators of power supply systems of consumers. Scopus, Conference Paper. (2019) E3S Web of Conferences, 139, article № 01037.

13. Jalilov R., Latipov S., Choriyev A. Development of energy characteristics of electric drives of technological equipment and normalization of electric consumption of fat-and-oil enterprise. Scopus, Conference Paper. (RSES 2020) E3S Web of Conferences, 216, article № 01141.

14. Rashid Jalilov, Saidmurod Latipov, Qodir Aslonov, Alisher Choriyev and Charieva Maxbuba. To the question of the development of servers of real-time management systems of electrical engineering complexes on the basis of modern automation systems. // Scopus, Conference Paper. (2021) CEUR Workshop Proceedings, 2843, "ITIDMS" 2021.

ОПТИМИЗАЦИЯ СТАРТ-СТОП ЦИКЛОВ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Симонов Иван Владимирович[1], Кудинов Даниил Владимирович[2],
Шевченко Денис Иванович[2], Климов Алексей Викторович[2].

Университет ИТМО, г.Санкт-Петербург, 197101, Россия[1].
Набережночелнинский институт КФУ, г. Набережные Челны, 423812, Россия[2].
Ivan.Simonov.fez@yandex.ru[1], dan79361@gmail.com[2]
xuz@rambler.ru[2], Feliks116@yandex.ru[2].

Аннотация. В данной статье описаны подходы для осуществления оптимального старт-стоп цикла энергетической установки на водородных топливных элементах. Выявлен оптимальный метод старт-стоп цикла энергетической установки, который способен продлить жизненный цикл установки на топливных элементах.

Ключевые слова: ПОМТЭ, старт-стоп циклы, запуск ПОМТЭ.

Abstract. This article describes approaches for implementing the optimal start-stop cycle of a fuel cell power plant. The optimal method of the start-stop cycle of a power plant has been identified, which is able to extend the life cycle of a fuel cell plant.

Keywords: PEMFC, start-stop cycles, start of PEMFC.

Введение

Для распространения энергетических установок (ЭУ) на водородных топливных элементах (ТЭ) необходимо повысить жизненный цикл ТЭ. В следствии того, что методы по запуску и остановке всей энергетической установки оказывают существенное влияние на деградацию ТЭ, необходимо выявить оптимальные методы по старт-стоп циклам. Стоит отметить, что при применении ТЭ в транспортных целях необходимо оптимизировать ТЭ под частые старт-стоп циклы. [1],[2] В следствии того, что деградация ТЭ на 33%

зависит от старт-стоп циклов и на 56.5% от работы под изменяемой нагрузкой. [1] Следует проводить испытания по старт-стоп циклам ЭУ, для упрощения анализа в данной работе будем рассматривать работу батареи топливных элементов (БТЭ).

Старт-стоп циклы

При старт-стоп циклах водород и кислород может присутствовать в анодном пространстве БТЭ, что вызывает повышение потенциала и как следствие приводит к коррозии углеродного носителя катализатора и уменьшении электрохимической поверхности.[3] Так же при каждом цикле активная каталитическая поверхность уменьшается из-за растворения, агломерации и отрыва катализатора. В следствии того, что малые частицы катализатора (платины) стремятся уменьшить поверхностную энергию.

Для предотвращения пагубного воздействия стартов и остановок БТЭ были предложены следующие стратегии [2], [4], [5], [6]:

- Старт-стоп без продувки БТЭ;
- Старт-стоп с воздушной продувкой БТЭ;
- Старт-стоп с управлением потребления H_2;
- Старт-стоп с управлением потребления O_2;
- Старт-стоп с продувкой H_2.

Для определения эффекта на БТЭ от данных стратегии, необходимо провести серию старт-стоп циклов для определения уменьшения напряжения. И таким образом определить влияние на жизненный цикл БТЭ.

В начале серий старт-стоп циклов, все объемы БТЭ заполнены воздухом (78.1% N_2, 20.9% O_2, 0.03% CO_2, 0.07% Ar). Затем, каждый старт-стоп цикл имеет одинаковые последовательности работы: в начале в анодное пространство подается водород, затем БТЭ запускается на 10 секунд при разомкнутой цепи. После чего, в течении 40 секунд БТЭ выходит на рабочую плотность тока (0.952 А/см^2). Затем, БТЭ останавливается согласно одной из пяти стратегий, представленных ниже. На этом один цикл старт-стоп завершен.

Разберем подробнее каждую из пяти стратегий:

1. Старт-стоп без продувки БТЭ. После 40 с. работы БТЭ, прекращается подача реагентов и выходные патрубки с БТЭ оставляются открытыми. Через 820 с. начинается запуск БТЭ. При данной стратегии активная электрохимическая поверхность уменьшилась на 80% через 230 циклов, что связано с коррозией катодного электрода. Уменьшение электрохимической поверхности составило 0.158 м^2/(г$_{Pt}$*цикл). Потеря напряжения на цикл составила 229 мкВ/цикл.

2. Старт-стоп с воздушной продувкой БТЭ. После 40 с. работы, подача водорода прекращается, и анодная камера продувается сухим воздухом в объеме 500 мл/мин. Катодная камера продувается воздухом в прежнем объеме. Уменьшение электрохимической поверхности составило 0.0216 м^2/(г$_{Pt}$*цикл). Потеря напряжения на цикл составила 183 мкВ/цикл.

3. Старт-стоп с управлением потребления H_2. После 40 с. работы, подача водорода прекращается, электромагнитный клапан на входе анода БТЭ

закрывается. Далее водородным насосом нагнетает остаточный водород из рециркуляционных патрубков обратно в БТЭ. Вместе с этим к БТЭ прикладывается нагрузка по следующему алгоритму: снимается 0.02, 0.015, 0.01, 0.005, 0.001 А/см^2 соответственно, с задержкой на каждой токовой точке по 35 с. Малое значение снимаемого тока позволяет предотвратить топливное голодание. Катодная камера продувается воздухом в неизменном номинальном объеме. Уменьшение электрохимической поверхности составило 0.0242 м2/(гPt*цикл). Потеря напряжения на цикл составила 229 мкВ/цикл.

4. Старт-стоп с управлением потребления O_2. После 40 с работы, подача воздуха прекращается, электромагнитные клапана на входе и выходе катода БТЭ закрываются. С БТЭ снимается фиксированное значение тока (которое выбирается, так чтобы напряжение единичных ТЭ не превышало 0.7 В), пока напряжение, снимаемое с ед. ТЭ не достигнет 0 В. После подача водорода прекращается, и анодная камера продувается сухим воздухом в объеме 500 мл/мин, пока анодная камера не заполниться воздухом. Данная стратегия наиболее применима, т.к. она позволяет защитить катод от перенапряжений при старт-стоп цикле. Уменьшение электрохимической поверхности составило 0.0131м^2/(г$_{Pt}$*цикл). Потеря напряжения на цикл составила 23 мкВ/цикл.

5. Старт-стоп с продувкой H_2. После 40 с работы, БТЭ переводят в режим холостого хода. Затем подача воздуха прекращается, электромагнитный клапан воздушного патрубка на входе БТЭ закрывается и катодное пространство продувается водородом в объеме 500 мл/мин. Затем подача H_2 на анод прекращается, электромагнитный клапан на входе анода БТЭ закрывается. Далее анод и катод продуваются воздухом в течении 3 с. продувка, затем электромагнитные клапана на входе и выходе анода и катода закрываются. Уменьшение электрохимической поверхности составило 0.0074 м2/(гPt*цикл). Потеря напряжения на цикл составила 49 мкВ/цикл.

Основываясь на малом уменьшении электрохимической поверхности и потери напряжении на каждом старт-стоп цикле, определим две подходящие стратегии для дальнейшего использования: старт-стоп с управлением потребления O_2 и Старт-стоп с продувкой H_2. Практически оправдана стратегия 4, из-за наименьшего снижения напряжения с каждым циклом.

Вывод:

В данной работе рассмотрены методы по запуску и остановки БТЭ, на основе сравнения пяти стратегий был выявлен наилучший вариант с управлением потребления O_2. В описанной стратегии предотвращается резкое повышение напряжения. Для достижения продолжительного жизненного цикла (более 5000 ч.) необходимо проводить контроль режимов запуска и остановки БТЭ.[7] Данная работа дает необходимое описание для дальнейшего исследования стратегий с управлением потребления O_2 при холодных запусках и остановках БТЭ.

Список литературы:

[1] T. Zhang, P. Wang, H. Chen, и P. Pei, «A review of automotive proton exchange membrane fuel cell degradation under start-stop operating condition», *Applied Energy*, т. 223, сс. 249–262, авг. 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.049.

[2] A. Oyarce Barnett *и др.*, «Comparing shut-down strategies for proton exchange membrane fuel cells», *Journal of Power Sources*, т. 254, сс. 232–240, май 2014, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.12.058.

[3] J. H. Kim *и др.*, «Development of a Durable PEMFC Startup Process by Applying a Dummy Load: I. Electrochemical Study», *J. Electrochem. Soc.*, т. 156, вып. 8, с. B955, июн. 2009, doi: 10.1149/1.3148222.

[4] H.-J. Kim *и др.*, «Development of shut-down process for a proton exchange membrane fuel cell», *Journal of Power Sources*, т. 180, вып. 2, сс. 814–820, июн. 2008, doi: 10.1016/j.jpowsour.2007.12.112.

[5] J. H. Kim *и др.*, «Development of a Durable PEMFC Start-Up Process by Applying a Dummy Load: II. Diagnostic Study», *J. Electrochem. Soc.*, т. 157, вып. 1, с. B118, ноя. 2009, doi: 10.1149/1.3246003.

[6] Y. Yu, G. Wang, Z. Tu, Z. Zhan, и M. Pan, «Effect of gas shutoff sequences on the degradation of proton exchange membrane fuel cells with dummy load during startup and shutdown cycles», *Electrochimica Acta*, т. 71, сс. 181–193, июн. 2012, doi: 10.1016/j.electacta.2012.03.141.

[7] «U.S. Department of Energy (DOE), Annual Progress Report, Fuel Cells, Catalyst, 2012. http://www.hydrogen.energy.gov/annual_progress.html».

РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОМТЭ

Симонов Иван Владимирович[1], Кудинов Даниил Владимирович[2], Шевченко Денис Иванович[2], Климов Алексей Викторович[2].

Университет ИТМО, г.Санкт-Петербург, 197101, Россия[1].
Набережночелнинский институт КФУ, г. Набережные Челны, 423812, Россия[2].
Ivan.Simonov.fez@yandex.ru[1], dan79361@gmail.com[2]
xuz@rambler.ru[2], Feliks116@yandex.ru[2].

Аннотация. В данной статье описан теоретически возможный КПД топливных элементов. Показано влияние агрегатного состояния образовываемой воды на КПД ПОМТЭ.

Ключевые слова: ПОМТЭ, КПД топливных элементов, энергия Гиббса.

Abstract. This article describes the theoretically possible efficiency of fuel cells. The influence of the state of aggregation of the formed water on the efficiency factor of POMFC is shown.

Keywords: PEMFC, Efficiency of fuel cell, Gibbs energy.

Введение

На данный момент в мировой автомобильной промышленности преобладает транспорт с двигателем внутреннего сгорания (ДВС). Однако, исходя из цикла Карно, можно заметить, что ДВС имеет существенный недостаток, низкий коэффициент полезного действия (КПД). На данный момент КПД ДВС не превышает 40%, это ограничение вызвано не полным превращением тепловой энергии сгорания топлива в механическую работу. [1]

Переход от ДВС к энергоустановке на топливных элементах, позволит значительно повысить КПД преобразования топлива в полезный вид энергии. Поэтому необходимо произвести математическое описание топливных элементов с протонообменной мембранной (ПОМТЭ), чтобы правильно моделировать их работу. Данная работа определяет максимальный теоретический КПД ПОМТЭ. Вычисление максимального КПД ПОМТЭ, позволит найти способы для дальнейшей оптимизации внутренних процессов происходящих в топливных элементах. [2]

Расчет электрохимических процессов

Для определения максимального теоретического КПД работающего ПОМТЭ, необходимо определить какую часть энергии реагентов возможно преобразовать в энергию доступную для дальнейшего использования. Для этого необходимо определить энергию, образующуюся при протекании электрохимических реакций в ПОМТЭ. Запишем уравнения образования воды в ходе электрохимической реакции в ПОМТЭ:

$$\mathrm{H_2} + \frac{1}{2} * \mathrm{O_2} \rightarrow \mathrm{H_2O}_{\text{ жид}} + 286\,\frac{\text{кДж}}{\text{моль}} \tag{1}$$

Так если вода образуется в жидком состоянии (1), то при реакции выделится энергия в размере 286 $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$. Тогда энтальпия, реакции будет равна $-286\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$.

$$H_2 + \frac{1}{2} * O_2 \rightarrow H_2O_{\text{ пар}} + 242\,\frac{\text{кДж}}{\text{моль}} \tag{2}$$

Если вода образуется в паровом состоянии (2), то при реакции выделится энергия в размере 242 $\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$. Тогда энтальпия, реакции будет равна $-242\frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$.

Стоит отметить, что необходимо отобрать большее количества тепла, чем при образовании пара (который имеет большую температуру), чтобы молекулы воды перешли в жидкое состояние. В таблице 1, представлены значения энтальпии и энтропии для образовывающихся веществ. Значения, приведенные в данной таблице, являются табличными, чтобы вычислить полную энтальпию и энтропию электрохимической реакции, необходимо воспользоваться формулами (4), (5). [3]

Таблица 1. Идеализированное сравнение энтальпии и энтропии в зависимости от образовываемого вещества, при температуре 298 К.

	H, кДж/моль	S, кДж/моль
H_2	0	0.13066
O_2	0	0.20517
H_2O жидкость	-286.02	0.06996
H_2O пар	-241.98	0.18884

$$\Delta H = H_{H2O} - H_{H2} - \frac{1}{2} * H_{O2} \tag{3}$$

$$\Delta S = S_{H2O} - S_{H2} - \frac{1}{2} * S_{O2} \tag{4}$$

Зная изменение энтальпии и энтропии, определим изменение энергии Гиббса при температуре 298 К. При образовании жидкой воды при температуре 25 С (298 К), энергия Гиббса примет следующие значение:

$$\Delta\mathrm{G} = \Delta H - T\Delta\mathrm{S} = \Delta H - T\Delta(\mathrm{S}_{ж} - \mathrm{S}_{O2} - \mathrm{S}_{H2}) = -286.02 - 298 * \left(0.06996 - \frac{0.20517}{2} - 0.13066\right) = -237.36\ \frac{\text{кДж}}{\text{моль}} \tag{5}$$

Аналогично рассчитывают энергию Гиббса при образовании воды в парообразной форме. Зная энергию доступную для совершения полезной работы (энергия Гиббса), определим электродвижущую силу (ЭДС) создаваемую источником тока.

$$\mathrm{E} = -\frac{\Delta\mathrm{G}}{\mathrm{n}*\mathrm{F}} \tag{6}$$

$$E^0 = -\frac{\Delta G^0}{n*F} = -\frac{-237.36}{2*96.485} = 1.23\ B \tag{7}$$

Стоит учесть, что при изменении температуры реакции значения энтальпии и энтропии изменяются. Несмотря на их изменение, существенное изменение ЭДС ПОМТЭ наблюдается только при сильном изменений температуры (298К>373К). Сводная характеристика изменения термодинамических параметров реакции в ТЭ представлена в таблице 2.

Таблица 2. Термодинамические параметры реакций в ТЭ.

T, K	ΔH, кДж/моль	ΔS, кДж/моль	ΔG, кДж/моль	E, В
298	-286	-0.163	-237	1.23
333	-284	-0.159	-231	1.2
353	-284	-0.158	-228	1.184
373	-283	-0.156	-225	1.167

Из таблицы 2 можно сделать вывод, что оптимальная рабочая температура должна быть как можно меньше, однако в реальных ТЭ предпочтительнее работать на высоких температурах. Из-за различных сторонних эффектов, таких как сопротивление переносу протонов, повышение сопротивления ТЭ и кинетики реакций.

КПД ПОМТЭ вычисляется с помощью уравнения (8).

$$\varepsilon^0 = \frac{\Delta G}{\Delta \mathrm{H}} \tag{8}$$

Идеальный теоретический КПД при образовании водяного пара будет равен:

$$\varepsilon^0 = \frac{\Delta G}{\Delta \mathrm{H}} = \frac{(\Delta H - T\Delta S)}{\Delta H} = \frac{-241.98 - 298 * \left(0.18884 - \frac{0.20517}{2} - 0.13066\right)}{-241.98} = \frac{-227.8}{-241.98} \approx 0.94.5\% \tag{9}$$

Идеальный теоретический КПД при образовании воды будет равен:

$$\varepsilon^0 = \frac{\Delta G}{\Delta \mathrm{H}} = \frac{(\Delta H - T\Delta S)}{\Delta H} = \frac{-286.02 - 298 * \left(0.06996 - \frac{0.20517}{2} - 0.13066\right)}{-286.02} = \frac{-237.54}{-286.02} \approx 0.83\% \tag{10}$$

Следовательно, эффективность топливного элемента при образовании водяного пара выше, чем при образовании воды. Исходя из вычисления максимального теоретического КПД видно, что в зависимости от состояния образования воды, КПД ПОМТЭ варьируется от 83% до 94.5%. Однако, в реальности КПД топливных элементов ниже из-за активационных, омических и транспортных потерь.

Вывод:

В данной работе была рассмотрена математическая модель максимального теоретического КПД ПОМТЭ. Расчет КПД ПОМТЭ исходя из изменения энергии Гиббса и энтальпии, позволяет увидеть до какого значения можно увеличивать КПД топливных элементов. На данный момент основными препятствиями перед достижением высокого КПД являются параметры используемых материалов. [4] Согласно таблице 2, необходимо повысить перенос протонов, кинетику реакций при низких температурах, для повышения ЭДС ПОМТЭ. В дальнейших работах необходимо рассмотреть пути улучшения материалов для уменьшения активационных, омических и транспортных потерь. Для дальнейших вычислений рекомендуется принимать максимальный теоретический КПД ПОМТЭ равным 83%.

Список литературы:

[1] A. Albatayneh, M. N. Assaf, D. Alterman, и M. Jaradat, «Comparison of the Overall Energy Efficiency for Internal Combustion Engine Vehicles and Electric Vehicles», *Environmental and Climate Technologies*, т. 24, вып. 1, сс. 669–680, янв. 2020, doi: 10.2478/rtuect-2020-0041.

[2] I. P. Sahu, «Performance Study of PEM Fuel Cell under Different Loading Conditions», *Energy Procedia*, с. 11, 2014.

[3] Abdzex_Kuban, *P. W. Atkins & J. De Paula 2014 Physical Chemistry*. Просмотрено: 1 ноябрь 2022 г. [Онлайн]. Доступно на: http://archive.org/details/p.w.atkinsj.depaula2014physicalchemistry

[4] A. P. Soleymani, L. R. Parent, и J. Jankovic, «Challenges and Opportunities in Understanding Proton Exchange Membrane Fuel Cell Materials Degradation Using In-Situ Electrochemical Liquid Cell Transmission Electron Microscopy», *Advanced Functional Materials*, т. 32, вып. 5, с. 2105188, 2022, doi: 10.1002/adfm.202105188.

ЛИНЕЙНЫЕ МОДЕЛИ СИСТЕМ В ПРОСТРАНСТВЕ СОСТОЯНИЙ

Филина Ольга Алексеевна, Филиппова Марина Дмитриевна, Макаров Сергей Валерьевич

Казанский Государственный Энергетический Университет, г. Казань

Аннотация: Эта статья посвящена проблеме технической диагностике на электрооборудовании. Для решения задачи необходим перевод качественного определения ТС на некоторую количественную основу. Формализация качественных определений является необходимым условием построения формальных (вычислимых) алгоритмов диагностики.

Annotation: This article is devoted to the problem of technical diagnostics on electrical equipment. To solve the problem, it is necessary to transfer the qualitative definition of the vehicle to some quantitative basis. The formalization of qualitative definitions is a necessary condition for the construction of formal (computable) diagnostic algorithms.

Ключевые слова: повышение надёжности, с*татистический* метод, компонент, процесс преобразования, методика, наработка, неисправность, возможные состояния.

Определитель любой фундаментальной матрицы называется определителем Вронского, который не обращается в нуль ни в одной точке интервала J. Таким образом, столбцы матрицы X(t) в нулевой момент времени линейно независимы, и эта линейная независимость сохраняется на всем интервале J.

В общем случае $x(t_0)$, $X(t_0)c$, тогда $cX^{-1}(t_0)x(t_0)$, поскольку определитель X(t) не обращается в нуль на интервале J.

Поэтому решение начальной задачи $x(t_0)x_0$ имеет вид

$$x(t) = X(t)c = X(t)X^{-1}(t_0)x_0 = \Phi(t,t_0)x_0\,. \qquad (1)$$

Определение. Матрица

$$\Phi(t,t_0) = X(t)X^{-1}(t_0) \qquad (2)$$

называется **переходной матрицей состояния** (переходной матрицей, матрицей перехода), или **матрицей Коши**, которая позволяет перейти от состояния $x(t_0)$ к состоянию $x(t)$ в уравнении (1) для всех $t\in[t_0,t_1]$.

Непосредственно из определения вытекают следующие свойства переходной матрицы состояния [1]:

1) $\Phi(t_0,t_0) = I$;

◀ $\Phi(t_0,t_0) = X(t_0)X^{-1}(t_0) = I$; ▶

2) $\Phi(t,t_0) \neq 0 \quad \forall t\in[t_0,t_1];\ t_1 > t_0$;

3) $\Phi^{-1}(t,t_0) = \Phi(t_0,t)$;

◀ $\Phi^{-1}(t,t_0) = \left[X(t)X^{-1}(t_0)\right]^{-1} =$

$$= \left[X^{-1}(t_0)\right]^{-1}\left[X(t)\right]^{-1} = X(t_0)X^{-1}(t) = \Phi(t_0,t)\,; \blacktriangleright \qquad (3)$$

4) $\Phi(t,t_0) = \Phi(t,t_1)\Phi(t_1,t_0)$ - правило композиции для переходной матрицы состояния;

$$\blacktriangleleft\ \Phi(t,t_0) = X(t)X^{-1}(t_0) = X(t)X^{-1}(t_1)X(t_1)X^{-1}(t_0) =$$
$$= \Phi(t,t_1)\Phi(t_1,t_0)\,. \blacktriangleright \qquad (4)$$

Правило композиции свидетельствует о том, что из состояния x_0 можно перейти в состояние x либо с помощью линейного преобразования (t, t_0), либо последовательно применяя два линейных преобразования: сначала (t_1, t_0), переводящее x_0 в некоторое промежуточное состояние x1, а далее преобразование (t, t_1), переводящее x_1 в требуемое состояние *x*.

Следует отметить, что переходная матрица состояния — это такая фундаментальная матрица, которая удовлетворяет начальному условию $I(t_0)$. Поэтому переходную матрицу состояния можно определить как решение матричного дифференциального уравнения с единичными начальными условиями:

$$\dot{\Phi}(t,t_0) = A(t)\Phi(t,t_0),\ \Phi(t_0,t_0) = I\,. \qquad (5)$$

Рассмотрим нестационарную систему

$$\dot{x}(t) = A(t)x(t)\,,\ \ A(t) = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{t} & 0 \\ -\dfrac{2}{t^2} & \dfrac{2}{t} \end{bmatrix}. \qquad (6)$$

Одна из фундаментальных матриц этой системы имеет вид

$$X(t) = \begin{bmatrix} t & 0 \\ 1 & t^2 \end{bmatrix},$$

а ее производная
$$\dot{X}(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2t \end{bmatrix}.$$

Проверим, что X(t) удовлетворяет исходному уравнению:

$$A(t)X(t) = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{t} & 0 \\ -\dfrac{2}{t^2} & \dfrac{2}{t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t & 0 \\ 1 & t^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\dfrac{2}{t} + \dfrac{2}{t} & 2t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 2t \end{bmatrix} = \dot{X}(t)\,.$$

Вычислим переходную матрицу состояния:

$$X^{-1}(t_0) = \begin{bmatrix} t_0 & 0 \\ 1 & t_0^2 \end{bmatrix}^{-1} = \frac{1}{t_0^3} \begin{bmatrix} t_0^2 & 0 \\ -1 & t_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{1}{t_0} & 0 \\ -\dfrac{1}{t_0^3} & \dfrac{1}{t_0^2} \end{bmatrix},$$

$$\Phi(t, t_0) = X(t)X^{-1}(t_0) = \begin{bmatrix} t & 0 \\ 1 & t^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dfrac{1}{t_0} & 0 \\ -\dfrac{1}{t_0^3} & \dfrac{1}{t_0^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{t}{t_0} & 0 \\ \dfrac{1}{t_0} - \dfrac{t^2}{t_0^3} & \dfrac{t^2}{t_0^2} \end{bmatrix}.$$

Итак, решение исходного уравнения через переходную матрицу состояния x(t)(t, t_0)x_0 имеет вид

$$\begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dfrac{t}{t_0} & 0 \\ \dfrac{1}{t_0} - \dfrac{t^2}{t_0^3} & \dfrac{t^2}{t_0^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(t_0) \\ x_2(t_0) \end{bmatrix}.$$

Рассмотрим линейную неоднородную систему (2):

$$\dot{x} = A(t)x + f(t),\ \ x, f \in \mathbb{R}^n,\ \ A(t) \in \mathbb{R}^{n\times n},\ \ \dot{x} = \frac{d}{dt}x$$

Здесь полезно провести аналогию с решением линейных алгебраических уравнений *Ax*=*b*. Общее решение такого уравнения состоит из частного решения этого уравнения и элемента *x*, принадлежащего ядру матрицы *A*: *x*∈Ker

A, т.е. x удовлетворяет однородному уравнению Ax=0. Решение $Ax=b$ является суммой частного решения x_1 и решения x однородного уравнения. Аналогия видна, если переписать (3) в виде

$$\big(pI - A(t)\big)x(t) = f(t),\ \ p = \frac{d}{dt}.$$

Общее решение неоднородного линейного дифференциального уравнения (4) задается формулой

x(*t*)□*X*(*t*)*c*□□*x**(*t*)□,

где *X(t)* — фундаментальная матрица соответствующей однородной системы

x(*t*)□*A*(*t*)*x*(*t*);

x(t)* — произвольное частное решение системы (4);

$c \in \mathsf{R}^n$ — произвольный постоянный вектор.

Проверим, что сумма общего решения однородного уравнения и частного решения неоднородного уравнения является решением исходного неоднородного уравнения. Для любого $c \in \mathsf{R}^n$

$$\dot{x}(t) = \dot{X}(t)c + \dot{x}^*(t) = \underbrace{A(t)X(t)}_{\dot{X}(t)}c + \underbrace{A(t)x^*(t) + f(t)}_{\dot{x}^*(t)} =$$

$$= A(t)\Big[\underbrace{X(t)c + x^*(t)}_{x(t)}\Big] + f(t) = A(t)x(t) + f(t).$$

Таким образом, убедились, что предложенное общее решение неоднородного уравнения действительно ему удовлетворяет.

Если *X(t)* — фундаментальная матрица однородной системы x(t)□A(t)x(t)□, то вектор-функция

$$x^*(t) = \int_{t_0}^{t} \Phi(t,\tau)f(\tau)d\tau = X(t)\int_{t_0}^{t} X^{-1}(\tau)f(\tau)d\tau,\ \ (t,t_0) \in J$$

является частным решением неоднородной системы *x*□*A(t)x*□□*f(t)* с начальным условием *x(t*$_0$)□0□.

Вначале проверим, что $x^*(t)$ удовлетворяет неоднородному уравнению

$$\dot{x}^*(t) = \dot{X}(t)\int_{t_0}^{t} X^{-1}(\tau)f(\tau)d\tau + \underbrace{X(t)X^{-1}(t)}_{I}f(t) =$$

$$= A(t)\underbrace{X(t)\int_{t_0}^{t} X^{-1}(\tau)f(\tau)d\tau}_{x^*(t)} + f(t) = A(t)x^*(t) + f(t).$$

Будем искать решение системы (5) в том же виде, что и *общее решение* однородной системы (6), только считая c функцией t:

$$c = c(t),\ \ x(t) = X(t)c(t),\ \ c \in C^1(\mathbb{R}^n, J).$$

Такой подход называется *методом вариации произвольных постоянных*. Тогда при подстановке $x(t)=X(t)c(t)$ в (7) получим

$$\dot{x}(t)=\frac{d}{dt}\left[X(t)c(t)\right]=\dot{X}(t)c(t)+X(t)\dot{c}(t)=\overbrace{\underbrace{A(t)X(t)}_{\dot{X}(t)}c(t)}^{A(t)x(t)}+X(t)\dot{c}(t)\equiv$$

$$\equiv\overbrace{A(t)\underbrace{X(t)c(t)}_{x(t)}}^{A(t)x(t)}+f(t).$$

Литература

1. Filina O., Vakhitov K., Starodubets A., Salnikova O. Vibration diagnostics of the brush-collector assembly, as means of assessing // В сборнике: Proceedings of the 2022 4th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering, REEPE 2022. 4. 2022.
2. Филина О.А., Ахметов Р.Р., Сахапов Д.В. Анализ однородности исходного статистического материала // В сборнике: Инновационный дискурс развития современной науки. Сборник статей XI Международной научно-практической конференции. г. Петрозаводск, 2022. С. 138-142.
3. Филина О.А., Гатиятуллин Т.А., Головин К.А., Оморов М.Б., Росляков А.В. Классификация систем технической диагностики и неразрушающего контроля на АЭС // В сборнике: Современные научные исследования: теория, методология, практика. Сборник научных статей по материалам VII Международной научно-практической конференции. Уфа, 2022. С. 25-29.
4. Ахметов Р.Р., Валиуллов Э.Ф., Сахапов Д.В., Зинатуллин А.Р., Филина О.А. Оценка параметров теоретических распределений // В сборнике: Актуальные вопросы современной науки: теория, методология, практика, инноватика. Сборник научных статей по материалам VIII Международной научно-практической конференции. Уфа, 2022. С. 41-46.

ТЕПЛООБМЕН В ПОРИСТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКАХ В УСЛОВИЯХ РАЗЛИЧНОЙ ВЯЗКОСТИ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Хайбуллина А.И., доцент
Хайруллин А.Р., аспирант

ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»

Аннотация. В работе проведено численное моделирование теплообмена и гидродинамики в пористой среде. Численное исследование проводилось в программном продукте Ansys Fluent. Показана зависимость теплообмена пены в зависимости от числа Прандтля при различных числах Рейнольдса.

Abstract. In this work, we performed a numerical simulation of heat transfer and hydrodynamics in a porous medium. The numerical study was performed in the

Ansys Fluent software. The dependence of foam heat transfer as a function of the Prandtl number at various Reynolds numbers is shown.

Ключевые слова: пористая среда, теплообмен, численное моделирование.

Key words: porous medium, heat transfer, numerical simulation.

Высокопористые металлические структуры с открытыми порами обладают высокой теплопроводностью и высокой удельной поверхностью. Сложная трехмерная структура усиливает конвективный теплообмен за счет перемешивания потока [1]. Применение высокопористых структур, позволяет повысить эффективность теплообменных процессов за счет интенсификации теплообмена [2,3]. Несмотря на то что имеется большее количество теоретических и экспериментальных исследований посвященных данной теме. Количество работ в этой области пополняется каждый год [4–6].

Применение численного моделирование при исследовании теплообмена позволяет заменить, трудоемкие экспериментальные исследования и получить дополнительную информацию о характеристиках теплообмена и гидродинамики течения. При численном моделировании конвективного теплообмена, в пористых средах на уровне пор, необходимо воспроизвести сложную трехмерную структуру. Для этих целей применяются различные методы. Построение пористых структур производится с помощью рентгеновского сканирования поверхности [7], что требует применение дорогостоящего оборудования. При построении однородной структуры применяются ячейки Кельвина [8,9], bcc [10] и т.д. Последние время в научной литературе встречается метод основанной на методе диаграммы Вороного. Данный метод в отличие от других методов позволяет воспроизвести неоднородную структуру пор пены.

В данной работе проведено численное исследование конвективного теплообмена в пене сгенерированной с помощью метода диаграммы Вороного. Число Рейнольдса находилось в диапазоне от 10 до 100, число Прандтля от 0,7 до 5,1. Количество пор на дюйм по длине пены было 80, порозность пены составляла 0,743.

Число Рейнольдса Re основывалось на диаметре фибр для скорости в пористой среде. На баковых стенках задавалась граничное условие симметрия, на стенках пористой среды тепловой поток 5 Вт/м^2. Численное моделирование проводилось в Ansys Fluent. Количество элементов расчетной сетки составляло 1,1 млн. В данной работе использовалась та же математическая модель, что и в работе [11], при других режимных параметрах.

На рис. 1 показана интенсивность теплообмена в зависимости от числа Прандтля. С увеличением числа Прандтля наблюдается рост конвективного теплообмена при всех исследованных числах Рейнольдса. При числе Рейнольдсе 100 число Нуссельта увеличилось в 2 раза. При минимальном числе Рейнольдсе 10 число Нуссельта для воды было больше числа Нуссельта воздуха в 1,39 раза. Теплообмен в пористой среде увеличивался с увеличением числа

Рейнольдса. Максимальное число Нуссельта Nu = 12, наблюдалась при числе Рейнольдса 100 и числе Прандтля 5,1.

На рис. 2,3 показано температурное и скоростное поле для воздуха при числе Рейнольдса 10. На рис. 4,5 показано температурное и скоростное поле для воды. Течение в пористой структуре имеет неоднородную структуру с застойными зонами позади фибр.

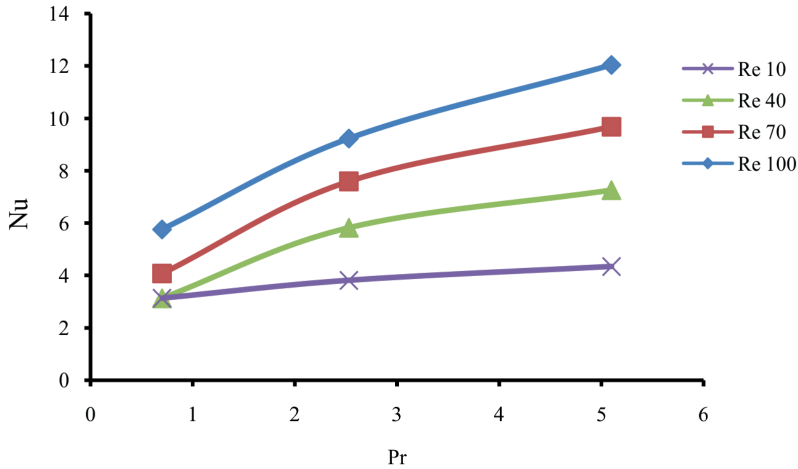


Рис. 1. Число Нуссельта в зависимости от числа Прандтля при различном числе Рейнольдса.

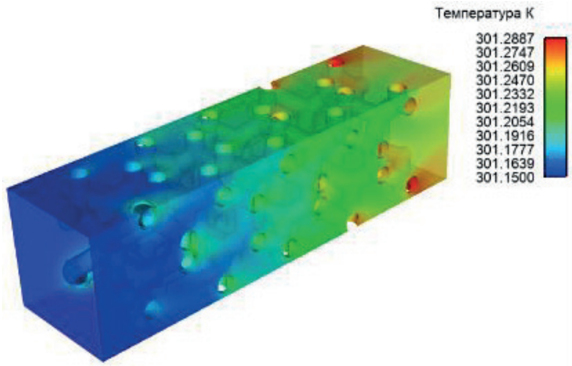


Рис. 2. Температурное поле пористой среды, при числе Рейнольдса 10 и числе Прандтля 0,7 (воздух).

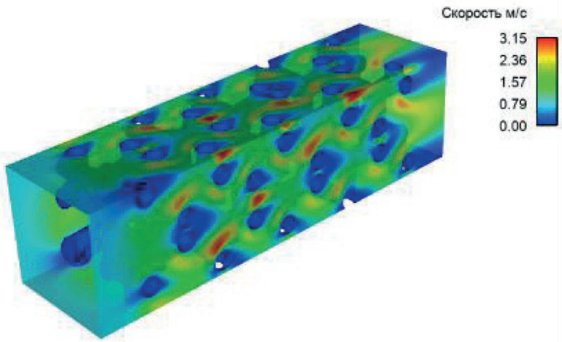


Рис. 3. Поле скоростей пористой среды, при числе Рейнольдса 10 и числе Прандтля 0,7 (воздух).

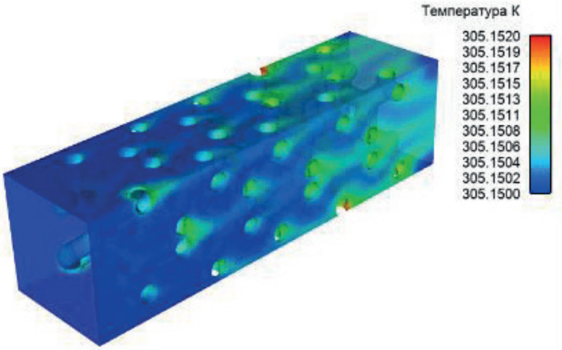


Рис. 4. Температурное поле пористой среды, при числе Рейнольдса 10 и числе Прандтля 5,1 (вода).

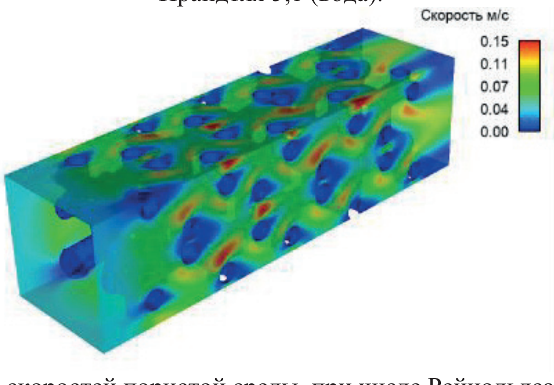


Рис. 5. Поле скоростей пористой среды, при числе Рейнольдса 10 и числе Прандтля 5,1 (вода).

Благодарности. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-79-10406, https://rscf.ru/project/21-79-10406/.

Список литературы:

1. Wang H., Guo L., Chen K. Theoretical and experimental advances on heat transfer and flow characteristics of metal foams // Sci. China Technol. Sci. 2020. Vol. 63, № 5. P. 705–718.

2. Rambabu S., Parthasarathy P., Ratna kishore V. A numerical study of forced convection in ideal and randomized reticulated porous structures and a proposal for a new correlation // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Vol. 184. P. 122292.

3. Sun M. Forced convection heat transfer: A comparison between open-cell metal foams and additive manufactured kelvin cells // International Communications in Heat and Mass Transfer. 2022. P. 9.

4. Chen K. et al. Numerical simulation study on heat transfer enhancement of a heat exchanger wrapped with metal foam // Energy Reports. 2022. Vol. 8. P. 103–110.

5. G T. et al. Numerical assessment of thermal characteristics of metal foams of orderly varied pore density and porosity under different convection regimes // International Journal of Thermal Sciences. 2022. Vol. 172. P. 107288.

6. Durmus F.Ç., Maiorano L.P., Molina J.M. Open-cell aluminum foams with bimodal pore size distributions for emerging thermal management applications // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. Vol. 191. P. 122852.

7. Liu J. Numerical simulation on convective heat transfer characteristics in porous media based on the digital rock technology // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022. P. 12.

8. Sun M. et al. Thermal and hydraulic behaviours of Kelvin cells from metallic three-dimensional printing // Applied Thermal Engineering. 2023. Vol. 219. P. 119433.

9. Solovev S.A. et al. Numerical Simulation of Heat and Mass Transfer in an Open-Cell Foam Catalyst on Example of the Acetylene Hydrogenation Reaction: 1 // ChemEngineering. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2022. Vol. 6, № 1. P. 11.

10. Suleiman A.S., Dukhan N. Long-domain simulation of flow in open-cell mesoporous metal foam and direct comparison to experiment // Microporous and Mesoporous Materials. 2014. Vol. 196. P. 104–114.

11. Хайбуллина А.И., Хайруллин А.Р., Ильин В.К., Синявин А.А. // Теплообмен и гидравлическое сопротивление пористых сред сгенерированных методом диаграммы вороного. Научно-технический вестник Поволжья. 2022. № 5. С. 61-64.

МАЛОРАЗМЕРНЫЙ ГАЗОТУРБИННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ПЕТЛЕВОЙ КАМЕРОЙ СГОРАНИЯ

Халиулин Руслан Рафаэлевич, КНИТУ-КАИ
Сейид Джафари Сейидали Сейид Мучтеба
Беда Егор Александрович
Василевич Андрей Андреевич
Чечнев Роман Александрович

В настоящее время малоразмерные газотурбинные двигатели (МГТД) широко применяются в составе различных летательных аппаратов. Эффективность МГТД определяется, главным образом, процессами в камере сгорания. В исследуемом МГТД использована петлевая камера сгорания.

Small-sized gas turbine engines (SGTE) are widely used as part of different aircrafts and increasing their efficiency is becoming dramatically relevant. This article presents developing small-sized gas turbine with reverse combustion chamber.

МГТД, горение, петлевая камера сгорания

Авторами представленной работы выполнен проектировочный расчет двигателя на основе изданной методики. Определены параметры по тракту двигателя: P - давление, T - температура и V – скорость потока. Проведено проектирование входного устройства, центробежного компрессора, петлевой камеры сгорания, осевой турбины и сопла.

По результатам одномерных расчетов проведены трехмерные расчеты с применением пакетов прикладных программ Ansys-Fluent и TurboGrid с определением картины течения в компрессоре, турбине и камере сгорания.

На этапе изготовления макета двигателя использованы способы 3D печати. Изготовленный макет представляет собой ТРД с центробежным компрессором, состоящим из центробежного колеса и диффузора с поворотом потока. Кольцевая камера сгорания петлевая с вихревой зоной стабилизации в головной части тороидального типа.

ТРД является основой для разработки различных типов газотурбинных авиационных двигателей и наземных энергоустановок [1-3].

В разрабатываемом малоразмерном ТРД рассчитаны, исследованы и спроектированы основные его узлы: турбокомпрессор и камера сгорания.

1. Разработки проведены по принципу:
2. Аналитический расчет термодинамического процесса;
3. Выбор наиболее эффективных параметров для обеспечения максимального КПД;
4. Проведение детального расчета и проектирования узлов газогенератора;
5. Проектирование основных узлов, начиная от входного устройства и до сопла, с применением современных трехмерных расчетных программ.

Список использованных источников

1. R.R. Khaliulin, “Study of ways to increase the power of the gas turbine engine by ejector application” in Future of aviation and cosmonautics for young Russia (Soloviev RSATU, Rybinsk, 2018), pp. 93–100. (in Russian)
2. Khaliulin, R.R. Improving the efficiency of power gas turbines with the use of ejector systems: dissertation for the degree of Cand. tech. Sciences (PhD): 05.07.05 / KhaliulinRuslanRafaelevich. - Kazan, 2019. – 136 (in Russian)
3. Khaliulin, R.R. Intensification of the ejection coefficient in the gas ejector due to the partially swirled active stream / Khaliulin, R.R., Sychenkov, V.A., Panchenko, V.I., Yousef, W.M., Semichev, S.A. // AIP Conference Proceedings. – 2020, 2211, 060004.

АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЁЖНОСТИ И ПРИЧИН ОТКАЗОВ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Якубова Дильфуза Куанышовна
Ташкентский государственный технический университет,
100095, Ташкент, ул. Университетская, д.2, e-mail:
yakubova.9532@gmail.com

Хуснутдинов Азат Назпович, Лазарев Павел Сергеевич
ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет»,
420061, г.Казань, ул.Красносельская, д.51, e-mail:
khusnutdinov.an.kgeu@mail.ru

Аннотация. Силовой трансформатор является в энергосистеме одним из важнейших элементов, определяющих надежность электроснабжения. Отказ крупного силового трансформатора в работе может привести к аварии в энергосистеме с широкомасштабными последствиями простоя, снижению затрат на ремонты, продлению срока службы оборудования. Как показывает анализ основных причин повреждения трансформаторов, их надежность наиболее сильно снижают дефекты конструкции и изготовления, а также недостатки эксплуатации и ремонта трансформаторов.

Abstract: The power transformer in the power system is one of the most important elements that determine the reliability of power supply. The failure of major power transformer at work can lead to accidents in the power system with wide-ranging consequences of downtime, reduce the cost of repairs, extend equipment life. The analysis shows the main reasons for damage of transformers, their reliability is most strongly reduce defects in design and workmanship, as well as the shortcomings of operation and maintenance of transformers.

Ключевые слова: силовой трансформатор, надежность, контроль состояния, отказ, работоспособность.

Силовой трансформатор является в энергосистеме одним из важнейших элементов, определяющих надежность электроснабжения. Его способность нести надлежащую нагрузку зависит от состояния отдельных узлов и отсутствия дефектов, которые могли бы перейти в повреждение трансформатора. Отказ крупного силового трансформатора в работе может привести к аварии в энергосистеме с широкомасштабными последствиями.

Главная особенность силовых трансформаторов - использование бумажно-масляной изоляции с охлаждением циркулирующим маслом в баке, защищенном от окружающего воздуха. Большие мощности трансформаторов и их классы напряжения определяют высокую степень использования активных материалов, способных выдерживать опасные тепловые воздействия и высокие напряженности электрического и магнитного полей, а также большие механические воздействия при КЗ в сети, от которых трансформатор, в отличие от генератора, не защищен предвключенным реактивным сопротивлением [1,2]. Отсюда при эксплуатации возникает необходимость учета неизбежного старения бумажной изоляции, жесткого контроля, ведущего к быстрому старению и нагреву изоляции, периодической подпрессовке обмоток, тщательного изолирования масла от воздействия окружающего воздуха (защита от увлажнения). И все это - при недоступности активной части трансформатора.

Работа блока зависит от работы блочного трансформатора и выход его из строя приводит к отключению блока, что может быть причиной развала энергосистемы. Так как повреждаемость трансформаторов непосредственно влияет на надежность энергосистемы в целом, понятно особое внимание к поддержанию их работоспособности. Этого требует и статистика повреждений: аварии по вине трансформаторов в электрических сетях вызывают 80-90 % недоотпуска электроэнергии, а на электростанциях - 10-20 %.

Контроль состояния таких трансформаторов выполняется наиболее полно, за рубежом наиболее совершенные системы контроля обслуживают именно повышающие трансформаторы большой мощности на электростанциях [3]. Для таких трансформаторов целесообразно применять даже весьма сложные и дорогие контрольно-диагностические системы, например, автоматическую систему отбора проб масла, анализа содержащихся в них газов и постановки диагноза, стоимость которой составляет до 10 % стоимости всего трансформатора. Трансформаторы меньшей мощности, как правило, легче резервируются, их выход из строя отражается на конкретных потребителях, но не на всей сети [4].

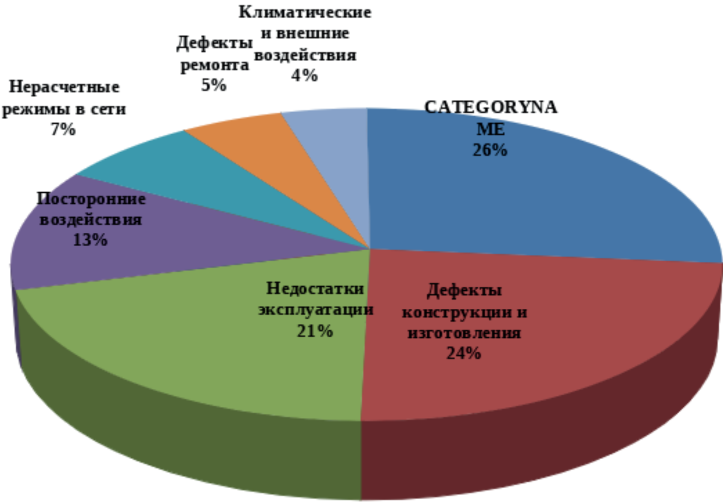


Рис. Причины отказов силовых трансформаторов.

В целом по маслонаполненным трансформаторам низкий уровень их обслуживания и ремонта дает 21% повреждений, т.е. практически столько же, сколько обусловлено естественным старением изоляции. Главное, что потребовало в настоящее время форсированного развития средств и методов контроля состояния трансформаторов, это проблема их эксплуатации за пределами номинальных сроков службы. У большого числа трансформаторов, находящихся в эксплуатации, закончился или подходит к концу номинальный срок службы. Такое положение заставило уделить большее внимание продлению их интегрального срока службы (наработки) за счет эффективного контроля состояния, оптимизации проведения профилактических мероприятий.

Необходимость тщательного диагностирования мощного электротехнического оборудования сегодня является общепринята. Это обусловлено его высокой себестоимостью, значительными затратами на перевозку, монтаж и др., а также финансовыми издержками из-за нарушения технологических процессов при недоотпуске электроэнергии. Силовой трансформатор является ответственным элементом сети, на работу которого влияют как сильные внешние воздействия, так и анормальные режимы работы энергосистемы. Эти воздействия и их последствия, следующие [4-7]:

- грозовые и коммутационные перенапряжения, вызывающие повреждения главной и витковой изоляции при недостаточных запасах их электрической прочности;

- повышения рабочего напряжения из-за некомпенсированной емкости ВЛ, приводящие к перевозбуждению трансформаторов. Длительное повышение напряжения становится в последнее время весьма актуальным. Недостаточный объем средств компенсации реактивной мощности и регулирования напряжения в сетях 330-750 кВ ЕЭС стран СНГ в условиях спада производства электроэнергии в последние годы создает трудности с поддержанием допустимых уровней напряжения, особенно в режимах минимальных нагрузок. Подъем напряжения из-за недостаточной компенсации на ВЛ 500 кВ может достигать 550 кВ. Повышение напряжения ведет к длительному перевозбуждению магнитопровода. Еще один неблагоприятный фактор в нынешних сетях 330-750 кВ - распространенная практика неиспользования устройств РПН (или использования его только для сезонных переключений). В таких случаях к возможному перевозбуждению от некомпенсированных линий может добавиться еще 3-5 % и оно станет еще более опасным. Перевозбуждение магнитной системы вызывает повышенный нагрев как самого сердечника, так и конструкционных стальных деталей, что опасно для контактирующей с ними изоляции;
- токи намагничивания при включении, вызывающие повреждения обмоток из-за электрических и механических переходных процессов. Включение трансформатора в сеть само по себе является причиной броска тока при намагничивании сердечника. Бросок тока включения зависит в первую очередь от остаточной индукции в сердечнике трансформатора, которая в свою очередь зависит от конструкции сердечника;
- воздействия геомагнитных токов на трансформатор. Это относится к протяженным ЛЭП, ориентированным в меридиональном направлении. Геомагнитные токи в первую очередь воздействуют на измерительные трансформаторы тока, что ведет к массовым ложным срабатываниям релейной зашиты. Однако при анализе последствий таких аварий отмечались также и местные перегревы массивных деталей и бака силовых трансформаторов из-за перенасыщения сердечника при протекании больших постоянных токов по обмотке;
- перегрузка трансформатора по току. Большое влияние на срок службы трансформатора из-за старения изоляции оказывает режим нагрузки. Максимально допустимую температуру наиболее нагретых точек определяют два ограничивающих фактора старение целлюлозно-бумажной изоляции под воздействием продолжительного нагрева и возникновение газовых пузырьков на поверхности бумажной изоляции при быстром повышении температуры.

Повреждения или отклонения от нормального режима работы могут быть вызваны различными причинами; недоработкой конструкции, скрытыми дефектами изготовления, нарушениями правил перевозки, технологии монтажа или правил эксплуатации, некачественным ремонтом. В большинстве случаев повреждение происходит не сразу, а после более или менее длительного воздействия неблагоприятного фактора. Своевременное выявление возникающего дефекта позволяет принять меры по предупреждению его развития и сохранению работоспособного состояния трансформатора.

Список литературы

1. Дзюбина Т. В., Ковалѐв Г. Ф., Крупенѐв Д. С. Методы учета надежности поставки первичных энергоресурсов на электростанции при анализе надежности электроэнергетических систем //Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2022. – Т. 26. – №. 2 (163). – С. 245-259.
2. Eiji Ozaki, Shinya Soyama. An Application of FRA to fault Location on transformer // Hamakowaswku operation, Power system, Toshibo Corp. Kawasakum, Japan.
3. Рыбаков Л.М. и др. Комплексная оценка состояния силовых трансформаторов в процессе их эксплуатации //Архивариус. – 2019. – №. 10 (43). – С. 23-27.
4. Баженов Н.Г., Антипанова И.С., Пьянкова А.Д. Математическое описание маломощных трансформаторов // Инновационные машиностроительные технологии, оборудование и материалы-2017 (МНТК" ИМТОМ-2017"). – 2017. – С. 112-116.
5. Щупаков А.С., Матвеев Д.А. Совершенствование методики расчёта импульсных перенапряжений в обмотках силовых трансформаторов путём учёта их частотных характеристик // ЭЛЕКТРО, 2010, №1. с.27-32.
6. Баженов Н.Г., Антипанова И.С. Математическое описание электромагнитных процессов в трансформаторах // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2015. – №. 1-2. – С. 107-114.
7. Ермаков И.И., Антипанова И.С. Результаты экспериментальных исследований маломощных трансформаторов под нагрузкой //Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2014. – №. 1-2. – С. 74-80.

СОДЕРЖАНИЕ

Материалы
XI Международной научно-технической конференции
«Инновационные машиностроительные технологии,
оборудование и материалы – 2022»

Часть 2

Подписано в печать 25.11.2022
Формат 60×84/16
Бумага офсетная
Тираж 70 экз.

Отпечатано ООО «Фолиант»
420111 г. Казань, ул. Профсоюзная, 17в
foliantkazan@mail.ru

АО «Казанский научно-исследовательский институт авиационных технологий»
г. Казань, ул. Дементьева, д. 2в
тел.: (843) 212-09-08
e-mail: oao@kniat.ru
web: www.kniat.ru

9 785604 770122