

УДК 663.13.033

Макки А.Ф., Васильев М.И., Нечипоренко Д.И., Шапорев В.П.

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И МАССООБМЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛИ КАРБОНИЗАТОРА ДЛЯ ОБРАБОТКИ СУСПЕНЗИИ ШЛАМА РАССОЛООЧИСТКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ СОДЫ

Аппараты для проведения тепло-массообменных процессов в системах газ–жидкость–твердое тело, широко распространены в химической, нефтеперерабатывающей, обогатительной, биохимической, пищевой и смежных отраслях промышленности.

Важное место аппараты занимают при решении экологических проблем, например, в процессе очистки отработанного технологического воздуха или газа, выводимого из технологических аппаратов в атмосферу [1]. Поэтому работы по совершенствованию конструктивного оформления и режимов работы вышеуказанных аппаратов были и остаются актуальными [2,3]. В целях интенсификации массообмена и повышения производительности аппаратов для проведения процессов в трехфазных системах в данной работе выбрана концепция, которая заключается в создании условий, обеспечивающих при локальном вводе энергии в технологическую схему ее дискретное распределение по пространству, и импульсное воздействие по времени [4,5]. В смысле дискретности этот метод состоит в распределении сжимаемой фазы по счетному числу точек технологического объема, в смысле импульсности – в реализации условий, при которых в окрестности этих точек возникают существенные градиенты и даже разрывы значений технологических параметров (давления, скорости, температуры, концентрации и т.п.).

Для проведения исследований по интенсификации массообмена была создана установка с крупномасштабной моделью аппарата, обеспечивающий расход суспензии до 2 м³/ч, расход газа до 30 м³/ч. На этой установке нами был проведен комплекс гидродинамических и массообменных исследований по отработке и совершенствованию конструкции аппарата и режима его работы. В качестве базового аппарата была принята конструктивная схема массообменного аппарата с тороидальными контактными элементами, в которые подается газо-жидкостной поток, предварительно закрученный тангенциальным лопаточным завихрителем, предназначенного для проведения процесса карбонизации суспензии шлама рассолоочистки в производстве кальцинированной соды с целью выделения солей магния. Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из стойки с баллонами углекислоты (1), диафрагмы для дозирования углекислоты и воздуха (2), смесителя газов (3), карбонатора (4), нутч-фильтра (5).

Перечень параметров, которые контролировали и измеряли в процессе исследований приведены в табл. 1.

Среднее газосодержание по зонам контактного элемента рассчитываем по формуле:

$$\Phi_0 = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\Phi_i - \Phi_{i-1}}{2} \Delta l_i}{\sum_{i=1}^n \Delta l_i}, \quad (1)$$

где ϕ_0 – среднее газосодержание, %; ϕ_i – газосодержание в i -ом сечении контактного элемента, %; Δl_i - расстояние между точками измерения газосодержания, М.

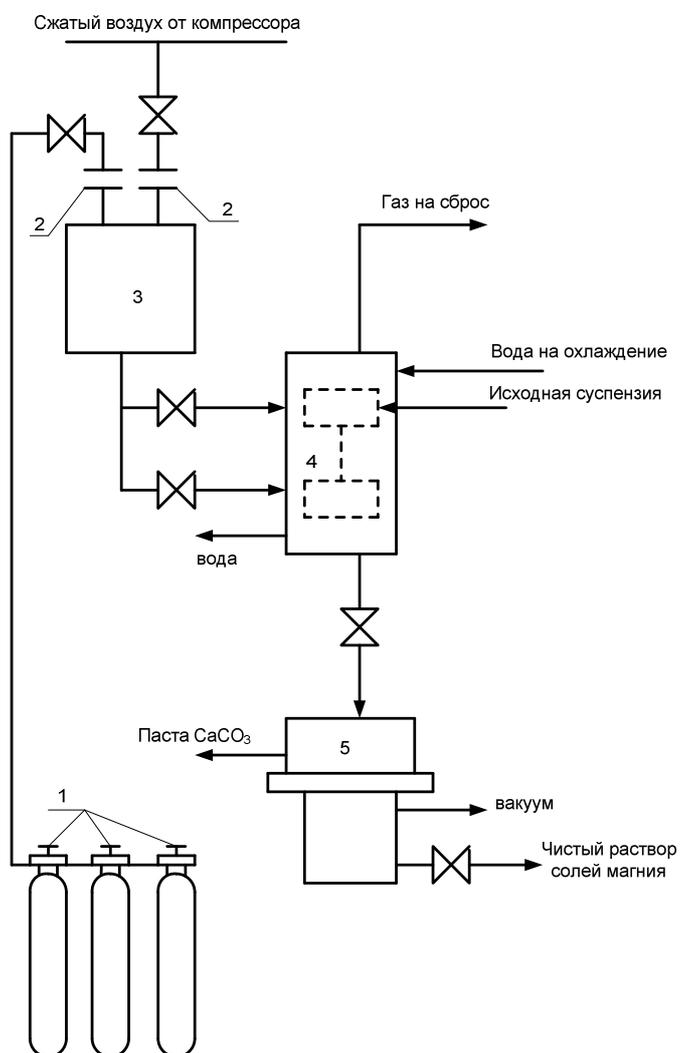


Рисунок 1 – Схема опытной установки по карбонизации суспензии шлама рассолоочистки
1 – стойка с баллонами; 2 – диафрагмы; 3 – смеситель газов; 4 – карбонатор; 5 – нутч-фильтр

Таблица 1 – Контролируемые и измеряемые параметры

Наименование параметра	Обозначение	Диапазон измеряемых величин
1	2	3
Температура, К	T	
суспензия на входе		291...300
газ на входе		300...315
суспензия на выходе		300
газ на выходе		302
Объемный расход, м ³ /ч, (м/с)	V _c	
суспензии на входе		0,5...1,0 (0,00013...0,00027)
газа на входе		40...80 (0,011...0,022)

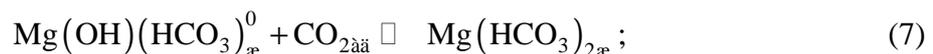
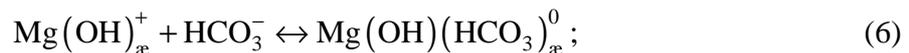
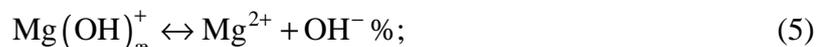
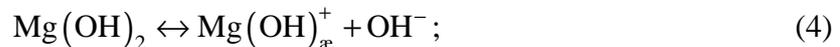
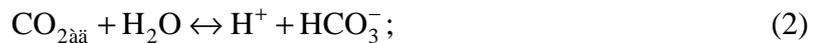
Продолжение таблицы 1

1	2	3
Скорость газожидкостного потока, м/с после завихрителя в контактном элементе	U_g	0,4...16,0
Гидравлическое сопротивление аппарата, Па	ξ	1690...5000
Концентрация компонентов	C	
CO ₂ в газе на входе, %	C_r	40...65
шлама в жидкой фазе, г/л	$C_{ш}$	154...210
Mg(OH) ₂ в шламе, %	$C_{ак}$	14,3...15,0
Скорость карбонизации (скорость поглощения CO ₂), дм ³ /с	M	(0,4...6,0)*10 ⁻³
Степень извлечения ионов Mg из шлама, %	η	0...100

Скорость газожидкостной смеси определяли на выходе из контактного элемента при помощи гидродинамической вертушки.

В основу методики положены следующие основные реакции по стадиям:

Первая стадия



Вторая стадия



Ранее нами показано [6], что на первом этапе лимитирующей стадией является сорбция CO₂ по реакциям (2,3), константы диссоциации отвечают значениям $K_{a1} \approx 10^{-4}$, $K_{a2} \approx 4,8 \cdot 10^{-11}$, следовательно какое бы ни было узкое место процесса абсорбции, кинетика процесса зависит от концентрации ионов OH⁻ в растворе и потенциальной концентрации ионов H⁺, поскольку это основные движущие силы процесса. Что касается концентрации ионов магния в растворе (реакции 4–7), то существует корреляция между величиной pH и концентрацией ионов Mg в растворе, которая практически не зависит от давления карбонизации и для данных концентраций гидроокиси магния в исходной

суспензии и температуры, при определенных гидродинамических условиях, описывается уравнением прямой типа [7]:

$$pH = a - b \cdot C, \quad (10)$$

где C – концентрация ионов Mg в пересчете на MgO в растворе; a и b – коэффициенты, зависящие температуры и концентрации $Mg(OH)_2$ в суспензии. Для исследуемых условий коэффициенты колеблются в пределах $(-0,8) \dots (-0,9)$, а концентрация ионов магния сохраняется постоянной в широком диапазоне давлений карбонизации. Основным результатом сорбции CO_2 на первом этапе, это образование соединений по реакциям (6,7).

Таким образом кинетическое уравнение для первого этапа, которое описывает скорость поглощения CO_2 и образования бикарбоната магния в растворе имеет вид:

$$M = 0.5k_{ia} \sqrt{P_a^*} (P - 1.3P_a^*), \quad (11)$$

где k_{ia} – коэффициент массоотдачи от газа к жидкости, c^{-1} ; P_a^* , P – соответственно равновесное давление CO_2 , и рабочее давление в аппарате, КПа.

Кинетику образования $MgCl_2$ по реакциям 8,9 оценивают по уравнению:

$$y = a(1 - e^{-k_1 \tau}), \quad (12)$$

где $a = nM$, $n \rightarrow 0,9$; $I = 1,2$ (соответственно реакции 8,9).

Установлено, что $k_1 \approx k_2$, то есть $k_8 \approx k_9$. Соответственно сути уравнения (12) в этом случае (при $k_1 \approx k_2$) реакции образования $MgCl_2$ протекают практически мгновенно, как только поглощается CO_2 и образуется $Mg(HCO_3)_2$.

Массообменные исследования

Исследование массообменных характеристик проводили на аппарате, конструкция которого представлена на рис. 2. большой диаметр контактного элемента (тора) составлял 2 м, внутренний диаметр контактного элемента (тороидальной камеры) составлял 0,15 м. Результаты массообменных исследований сравнивались с результатами, полученными в прямотрубных реакторах аналогичных размеров (с механическими завихрителями) и в барботажной колонне ($d = 0.15$ м, $H_{раб} = 7,5$ м), работающей под заливом с барботером колпачкового типа.

Во всех случаях замеры проводились на расстоянии 2,5 калибра от завихрителя или барботера, а также на выходе из реактора. На рис. 3 приведена зависимость скорости сорбции углекислоты от приведенной скорости газа для различных карбонаторов (реакторов).

Полученные экспериментальные данные рис. 3 обработанные методом наименьших квадратов позволили получить уравнение:

$$M = V_i W_s^{0.9}, \quad i = 1, 2, 3, \dots, \quad (13)$$

где коэффициент V зависит от типа реактора; соответственно $V_1 = 4,69$; $V_2 = 7,68$; $V_3 = 10,1$.

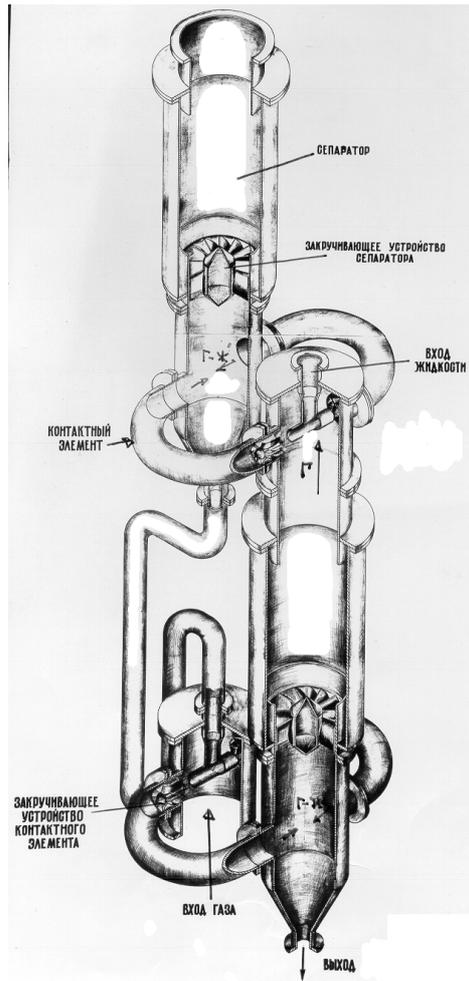


Рисунок 2 – Конструкция сепаратора

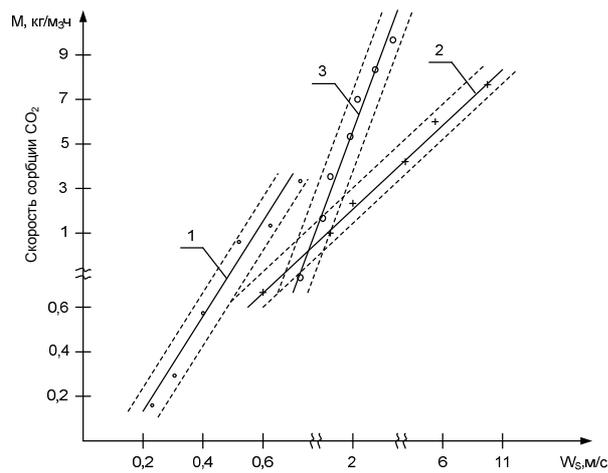


Рисунок 3 – Зависимость скорости сорбции CO_2 от приведенной скорости газового потока W_S (CO_2 – 40%)

- 1 – барботажная колонна; 2 – прямотрубный реактор;
3 – реактор с торообразными контактными элементами

Очевидно коэффициент B_i косвенно характеризует значение k_{la} (используя теорию размерностей B можно представить как $B = (k_{la} \cdot \rho) / W_S$) и показывает, что в исследуемом реакторе его конструкция обеспечивает перераспределение и концентрацию вводимой энергии в пространстве и времени, что способствует многократному обновлению межфазной поверхности (S), увеличению межфазной турбулентности и соответственно возрастанию основных составляющих переноса k_{la} и S . Действительно, лопаточный завихритель приводит газожидкостной поток к нестационарному движению с проявлением инерционности, что приводит к созданию устойчивого режима инверсии фаз. Однако, как известно [8] этот режим на расстоянии 3...5 калибров от завихрителя затухает. Для поддержания этого режима необходима или установка еще одного завихрителя, или других механических устройств для интенсификации и возбуждения потока. Этот метод приводит к резкому возрастанию гидравлического сопротивления аппарата. В предложенной конструкции карбонизатора для достижения эффекта устойчивого режима инверсии фаз после лопаточного завихрителя реакционная камера выполнена в виде криволинейного канала. В этой части контактного элемента многократно происходит перестройка профиля скоростей и характера течения газожидкостной фазы. Все действующие на поток силы многократно меняют знак, при этом возникает эффективная турбулизация потока по всему сечению контактного устройства за счет парных вихрей по типу Тейлора–Гортлера. Это приводит к поддержанию устойчивого режима инверсии фаз. Аналогичные явления экспериментально наблюдались в конструкциях реакторов подобного типа [9,10] и не противоречат теории. В карбонизаторе колонного типа скорости газового потока ограничены интервалом 0,2...0,6 м/с при котором возможен устойчивый барботажный режим. В нижней части под барботером величина M приближается к нулю. Выше барботера при вышеуказанных скоростях создать режим инверсии фаз, когда несущая и дисперсные фазы взаимно и многократно обратимы практически невозможно, поэтому коэффициент B_i ограничивается значением 4,65, что в 2,2 раза меньше чем в исследуемом новом карбонаторе. Преимущества последней конструкции подтверждаются также тем, что, например, при скорости газожидкостного потока 6 м/с для достижения значений M более 7 кг/м³*ч в прямотрубном реакторе необходимо через 5–6 калибров установить еще один лопаточный завихритель. Это приводит к увеличению гидравлического сопротивления реактора до 6500 Па. В то же время гидравлическое сопротивление применяемой конструкции не превышает 2000 Па. Важным показателем процесса, характеризующим интенсивность массообмена, является степень извлечения ионов Mg из шлама, то есть степень превращения $Mg(OH)_2$ в $MgCl_2$ (η) на выходе из карбонизатора. Для колонного карбонизатора при максимально возможной скорости газового потока 0,6 м/с эта величина не превышает $\eta = 0,57$, в прямотрубном реакторе с одним лопаточным завихрителем и скоростью газового потока 6 м/с – $\eta = 0,7$, в реакторе с торообразными контактными элементами при аналогичной скорости $\eta = 0,94$.

Таким образом, значение степени извлечения ионов Mg из шлама коррелируется со значениями коэффициента B_i , то есть степень извлечения в новой конструкции карбонизатора в 1,7 раза выше, чем в колонном карбонаторе, и в 1,35 раза выше, чем в прямотрубном реакторе. Вышеприведенные результаты однозначно свидетельствуют о значительном увеличении скорости сорбции CO_2 в исследованной конструкции карбонизатора.

Гидродинамические исследования

Гидродинамические параметры определялись с целью оценки равномерности распределения газовой и твердой фазы, а также скорости газожидкостного потока по

объему аппарата и выявления застойных зон. Фрагменты распределения газовой фазы по длине исследуемых аппаратов представлены на рис. 4.

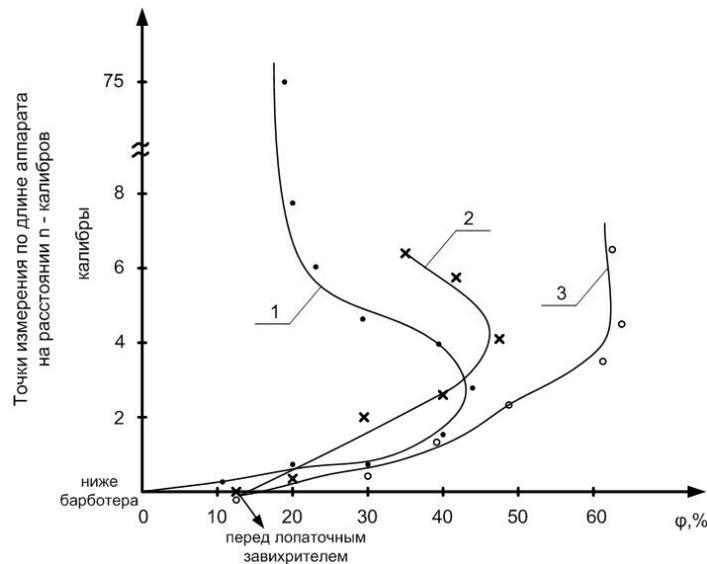


Рисунок 4 – Распределение газосодержания по длине карбонаторов
 1 – колоночный карбонатор, $W_S = 0,6 \text{ м/с}$; 2 – прямотрубный реактор карбонатор, $W_S = 6 \text{ м/с}$;
 3 – карбонатор с торообразными контактными элементами, $W_S = 6 \text{ м/с}$

Анализируя данные, приведенные на рисунках 3, 4 (кривая 1) следует отметить, что для колоночного карбонатора в нижней зоне аппарата под барботером газосодержание равно нулю. Наиболее эффективный барботажный режим с точки зрения массопереноса наблюдается на высоте 3–4 диаметров (калибров) аппарата от барботера, выше идет коалесценция газовых пузырей, уменьшается газосодержание и, очевидно, межфазная поверхность. Характерным для реакторов 2, 3 является то, что введение в контакт газовой и жидкой фаз до лопаточного завихрителя уже обеспечивает газосодержание на входе в завихритель до 15 %. В прямотрубном карбонаторе достигается $\phi \approx 45\%$ и удерживается на этом значении практически до выхода из реактора. В карбонаторе с торообразными контактными элементами сразу же после завихрителя величина $\phi \approx 50\%$, а далее резко возрастает до 62–65 % и это значение постоянно.

Таким образом, комбинируя форму реакционной камеры с закруткой потока и ее ориентацию в пространстве, можно достичь наиболее эффективных условий проведения массообменного процесса. Учитывая известную аналогию между массо и теплопереносом [11] можно утверждать, что метод интенсификации процесса, который заложен в конструктивное оформление исследуемого реактора (карбонатора) обеспечит интенсивное протекание теплообмена.

Литература

1. Соколов В.Н., Доманский Н.В. Газожидкостные реакторы. – Л. Машиностроение, 1976 – 241 с.
2. Иванов Ю.А. Разработка процесса и конструкции карбонизационной колонны, обеспечивающей повышение степени утилизации сырья в производстве кальциниро-

ванной соды / Автореф. диссертации на соискание учен. степени к.т.н. по спец. 05.17.08 – Харьков – НТУ «ХПИ» – 2000 – 19 с.

3. Мохаммед Абдалах Жабер Горизонтальный реактор турбулентного смешения для интенсификации процесса тепломассопереноса в гетерогенных системах / Автореферат диссертации на соискание учен. степени к.т.н. по спец. 05.17.08 – Харьков – НТУ ХПИ – 2007 – 22 с.

4. Накорчевский А.И., Басок Б.И. Гидродинамика и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках – Киев. Наукова думка – 2001 – 347 с.

5. Накорчевский А.И. Метод механики многофазных потоков с крупномасштабными дисперсиями / Некоторые вопросы математического описания процессов гидродинамики, теплообмена в многофазных системах – К: Ин-т кибернетики АН. УССР, 1977 – с 3–17.

6. Ткач Г.А., Шапоров В.П., Титов В.М. Производство соды по малоотходной технологии. Харьков. ХГПУ – 1998 – 430 с.

7. Шойхет Б.А., Сологубенко Л.Е., Ляхов В.Д., Колесова А.Н. Некоторые закономерности получения растворов бикарбоната магния карбонизацией суспензии гидроксида магния // Вопросы технологии получения магниевых продуктов. Сб. статей под ред. С.С. Маркова, Б.А. Шойхета. Ленинград ГИПХ – 1973 – с 64–76.

8. Назмеев Ю.Г. Интенсификация конвективного теплообмена при местной закрутке потока аномально вязкой жидкости аксиальным лопаточным закручивателем // Инженерно – физический журнал – 1986 – т 51 – №2 – с 386–391.

9. Каганский И.М., Андрианов Ю.И., Лозовский А.А. и др. Поглощение диоксида углерода растворами углеаммонийных солей в абсорбере змеевикового типа // Одесский политех. ин-т. Одесса – 1989 – 16 с – Рук. – Деп. в УкрНИИТИ 24.10.89 № 2256 – Ук89.

10. Padmanabhan. N. Entry flow in heated curved pipes // Int. Heat and Mass Transfer – 1989 – 30 – №7, p. 1453–1463.

11. Лыков А.В. Тепломассообмен: Справочник – М: Энергия, 1971 – 560 с.

Bibliography (transliterated)

1. Sokolov V.N., Domanskiy N.V. Gazozhidkostnyie reaktoryi. – L. Mashino-stroenie, 1976 – 241 p.

2. Ivanov Yu.A. Razrabotka protsessa i konstruktsii karbonizatsionnoy kolonny, obespechivayushey povyishenie stepeni utilizatsii syirya v proizvodstve kaltsinirovannoy sodyi Avtoref. dissertatsii na soiskanie uchen. stepeni k.t.n. po spets. 05.17.08 – Harkov – NTU «HPI» – 2000 – 19 p.

3. Mohammed Abdalah Zhaber Gorizontalnyiy reaktor turbulentnogo smesheniya dlya intensivatsii protsessa teplomassoperenosa v geterogennyih sistemah Avtoreferat dissertatsii na soiskanie uchen. stepeni k.t.n. po spets. 05.17.08 – Harkov – NTU HPI – 2007 – 22 p.

4. Nakorchevskiy A.I., Basok B.I. Hidrodinamika i teplomassoperenos v geterogennyih sistemah i pulsiruyuschih potokah – Kiev. Naukova dumka – 2001 – 347 p.

5. Nakorchevskiy A.I. Metod mehaniki mnogofaznyih potokov s krupnomasshtabnyimi dispersiyami Nekotoryie voprosyi matematicheskogo opisaniya protsessov gidrodinamiki, teploobmena v mnogofaznyih sistemah – K: In-t kibernetiki AN. USSR, 1977 – p 3–17.

6. Tkach G.A., Shaporev V.P., Titov V.M. Proizvodstvo sodyi po maloethodnoy tehnologii. Harkov. HGPU – 1998 – 430 p.

7. Shoyhet B.A., Sologubenko L.E., Lyahov V.D., Kolesova A.N. Nekotoryie zakonomernosti polucheniya rastvorov bikarbonata magniya karbonizatsiey suspenzii gidrookisi magniya Voprosy tehnologii polucheniya magnezialnyih produktov. Sb. statey pod red. S.S. Markova, B.A. Shoyheta. Leningrad GIPH – 1973 – p 64–76.

8. Nazmeev Yu.G. Intensifikatsiya konvektivnogo teploobmena pri mestnoy za-krutke potoka anomalno vyazkoy zhidkosti aksialnyim lopatochnym zakruchivatelem Inzhenerno – fizicheskiy zhurnal – 1986 – t 51 – #2 – p 386–391.

9. Kaganskiy I.M., Andrianov Yu.I., Lozovskiy A.A. i dr. Pogloschenie dioksida ugleroda rastvorami ugleammoniynyih soley v absorbere zmeevikovogo tipa Odesskiy politeh. in-t. Odessa – 1989 – 16 p – Ruk. – Dep. v UkrNIINTI 24.10.89 # 2256 – Uk89.

10. Padmanabhan. N. Entry flow in heated curved pipes Int. Heat and Mass Transfer – 1989 – 30 – #7, p. 1453–1463.

11. Lyikov A.V. Teplomassoobmen: Spravochnik – M: Energiya, 1971 – 560 p.

УДК 663.13.033

Маккі А.Ф., Васильєв М.І., Нечипоренко Д.І., Шапорєв В.П.

**ГІДРОДИНАМІЧНІ ТА МАСООБМІННІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОДЕЛІ
КАРБОНІЗАТОРУ ДЛЯ ОБРОБКИ СУСПЕНЗІЇ ШЛАМУ
РАСОЛООЧИЩЕННЯ У ВИРОБНИЦТВІ СОДИ**

На основі методу елементного моделювання створена великомасштабна установка (модель) карбонізатору, на якій проведено комплекс гідродинамічних та масообмінних досліджень на системі газ–рідина–тверде тіло, що дозволяє рекомендувати нову конструкцію апарату для проведення процесу карбонізації суспензії шламу расолоочищення у виробництві кальцинованої соди.

УДК 661.961.1

Зипунников Н.Н.

**ТЕПЛОМАССОБМЕН ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СПЛАВА
НА ОСНОВЕ КРЕМНИЯ С ВОДОЙ**

Опыты по изучению тепломассообмена проведены в металлическом реакторе ($V_p = 1,13 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$). Исследовалась интенсивность теплоотдачи от частиц сплава ФС 90 Ба4 (масс. %: Fe – 3,8, Si – 88,6, Ва – 4,0, Са – 1,5) к циркулирующему потоку.

Одновременно с записью температуры и давления в реакторе фиксируют время их изменения. Измерение температуры в реакторе выполняют с помощью термопары. В качестве вторичного прибора используют потенциометр КСП-4.

Оценку инерционности системы проводят следующим образом: в открытый сосуд с кипящей водой погружают спай термопары и начинают отсчет времени. Прибор отображает повышение температуры до 93 °С за 5 с, через 60–90 с устанавливается температура 99 °С. При погружении спая термопары в сосуд с маслом, нагретом до 180 °С, прибор через 5 с фиксирует 115 °С, через 55 с – 165 °С и через 180 с устанавливается температура 180 °С.

Давление в реакторе не превышает 0,93 МПа. Максимальная скорость выделения водорода при этом составила $W_{\max} = 1,08 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с})$ или $W_{\max} = 0,35 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ (см. опыт №4 в таблице 1).

Данные по взаимодействию сплава ФС 90 Ба4 с водным раствором едкого натра представлены в таблице 1.

Характер изменения температуры среды реагирующего образца сплава ФС 90 Ба4 при исследовании реакции в реакторе представлен на рисунке 1.

Таблица 1– Зависимость скорости выделения водорода от температуры при взаимодействии сплава ФС 90 Ба4 с 13,3 %-ным раствором едкого натра, $m = 5 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$

№№ опыта	Начальная температура среды, $t_n, \text{ }^\circ\text{C}$	Максимальная температура сплава, $t_{\max}, \text{ }^\circ\text{C}$	Время достижения максимальной температуры, $\tau \cdot 10^{-3}, \text{ с}$	Максимальное давление, МПа, P_{\max}	Время достижения максимального давления, $\tau \cdot 10^{-3}, \text{ с}$	Общее время реакции $\tau \cdot 10^{-3}, \text{ с}$	Вес сплава, $m \cdot 10^3, \text{ кг}$	Максимальная скорость выделения водорода, $W_{\max} \cdot 10^3, \text{ м}^3/(\text{кг} \cdot \text{с})$
1	90*	100	0,54	0,44	2,94	2,94	5	0,18
2	120*	128	0,16	0,68	0,72	0,9	5	0,68
3	90	103	0,51	0,48	3	3	5	0,22
4	130	137	0,2	0,84	2,1	2,2	5	1,08
5	120	130	0,18	0,8	2,4	2,6	5	1,04

* – щелочь 10 %-ной конц.

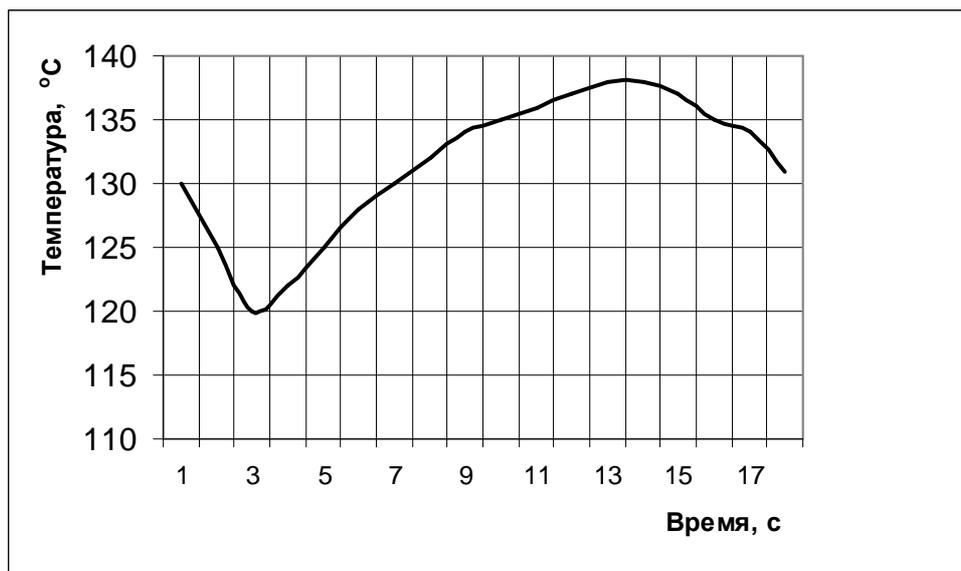


Рисунок 1 – Зависимость температуры от времени реакции сплава ФС 90 Ба4 с водой, $t_{н}=130\text{ }^{\circ}\text{C}$, $m = 5 \cdot 10^{-3}\text{ кг}$

При падении кассеты со сплавом в раствор температура среды в реакторе снижается на 8–10 °С. Индукционный период при этом составляет 3–5 с. Скачкообразное повышение температуры на 15–17 °С вызывает стремительный рост скорости реакции. Время прохождения всплеска температуры составило 10–12 с (см. рис. 1). На начальном этапе температура резко возрастает, затем темп роста замедляется, тем самым сказывается влияние образующегося оксидного слоя.

После прохождения скачка прибор показывает постепенное снижение температуры, что свидетельствует о завершении реакции в связи с полным разрушением частиц сплава.

Так на конечной стадии реакции за 6 с температура поднялась со 132 °С до 137 °С (рис. 1). Ввиду кратковременности существования тонкого реагирующего слоя и инерционности системы реальная величина температуры составляет 266 °С. Фактический скачок составил 134 °С. В пересчете на полупериод реакции (7,5 с) подъем температуры происходит от 100 °С до 194 °С, т.е. всплеск составляет 94 °С. Величина 194 °С является температурой насыщения при критическом давлении, зафиксированном в момент времени $\tau_{0,5}$.

Естественная циркуляция обеспечивает послойное взаимодействие частицы с омывающей ее жидкостью.

Скорость обтекания частицы равна приведенной скорости жидкости $v_{пр}$ в подъемном канале. Для нахождения $v_{пр}$ проводят оценку гидродинамики циркулирующего потока. Предельное значение скорости трехфазного потока равно местной скорости звука [1, 2]. При этом учитывают не только стехиометрические количества продуктов реакции, но и объем воды, испарившейся на реакционной поверхности и сконденсировавшейся в подъемном потоке. Приведенная скорость потока равна 2/3 от величины скорости истечения.

Найденное значение средней скорости позволяет уточнить количество поднимаемой газлифтом жидкости по зависимости [3, 4]

$$(1-\phi) = \frac{0,01\mu_{ж}^{0,3} + 0,14}{d^{0,34} \cdot v_{г.пр}^{0,48}}, \quad (1)$$

где ϕ – газосодержание, $\mu_{ж}$ – вязкость жидкости, МПа·с; d – диаметр подъемного канала, м; $v_{г.пр}$ – приведенная скорость течения газа, м/с.

Предварительно, путем использования данных [3] установлено, что правую часть необходимо умножить на коэффициент k_3 , изменяющийся в пределах 0,292–0,753. Снижение k_3 наблюдается при уменьшении диаметра подъемного канала, который принят равным сумме диаметров частицы и двух пузырьков. Для рассматриваемых нами условий $k_3 = 0,333$.

Значение приведенной скорости жидкости, найденное по разработанной методике, находится в пределах 1,77–2,26 м/с. Числа Рейнольдса изменяются от 110000 до 160000. Поскольку коэффициент лобового сопротивления $k_{лс}$ в указанном интервале возрастает следует ожидать увеличения безразмерного коэффициента теплоотдачи с ростом чисел Рейнольдса [5].

Обработка экспериментальных данных проведена по известным зависимостям [6–9]. Расчеты выполнены на момент равный полупериоду реакции ($\alpha_r = 0,5$). Результаты представлены на рисунках 2–3.

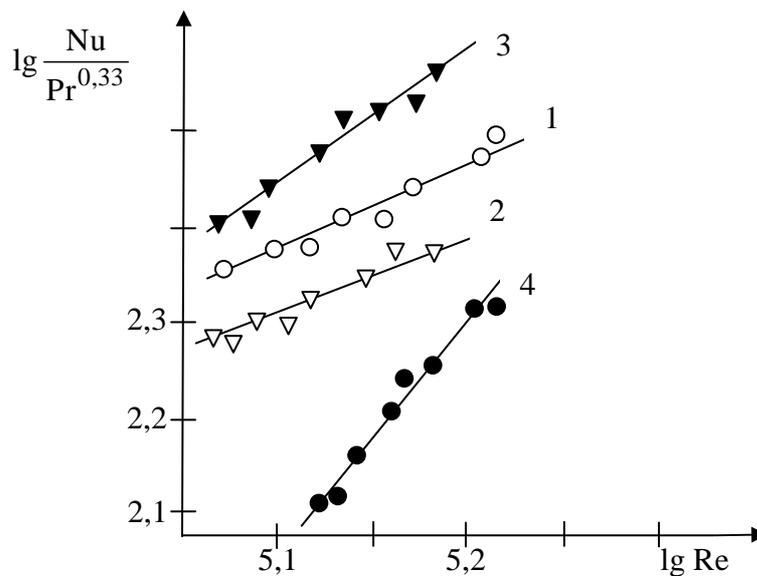


Рисунок 2 – Зависимость коэффициентов теплоотдачи одиночной сферической частицы сплава ФС 90 Ба4 от числа Re подъемного потока для уравнений:

- 1 – $Nu = 2 + 0,51 Re^{0,52} Pr^{0,33}$ [8];
- 2 – $Nu = 2 + 0,6 Re^{0,5} Pr^{0,33}$ [9];
- 3 – $Nu = 1,85 \cdot 10^{-6} Re^{1,6} Pr^{0,33}$ [10];
- 4 – $Nu = 0,9 \cdot 10^{-7} Re^{1,8} Pr^{0,33}$ (автор)

Оказалось, что наименьшее отклонение дает формула Кунии [7], а наибольшие – формула Кацнельсона-Тимофеевой [6]. В упомянутых работах степень влияния чисел Рейнольдса находится в пределах 0,5–0,58. Для активированного алюминия АГ505И5 (масс.%: Al – 85, Ga – 5, Sn – 5, In – 5) степень влияния числа Рейнольдса составила 1,6 [10].

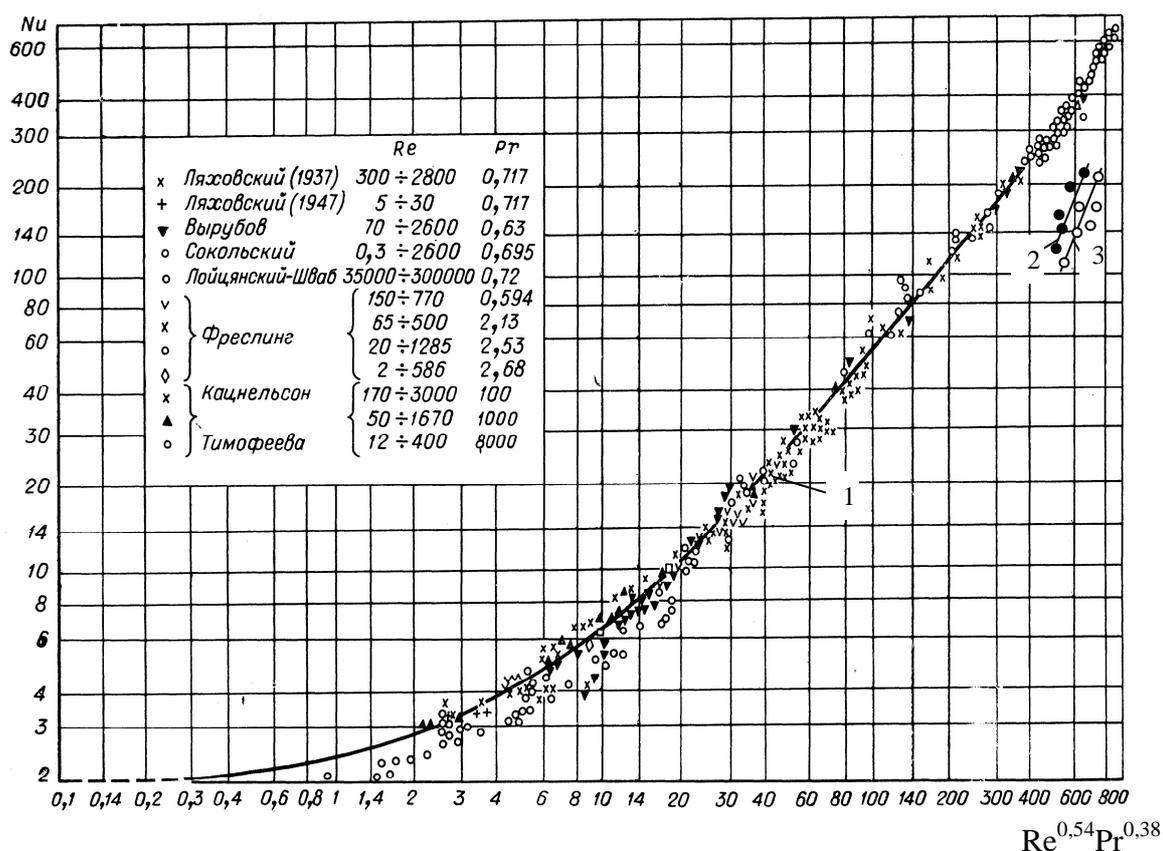


Рисунок 3 – Опытные данные по теплоотдаче одиночной сферической частицы:

$$1 - Nu = 2 + 0,03 Re^{0,54} Pr^{0,33} + 0,35 Re^{0,58} Pr^{0,35} [5];$$

$$2 - Nu = 1,85 \cdot 10^{-6} Re^{1,6} Pr^{0,33} [8];$$

$$3 - Nu = 0,9 \cdot 10^{-7} Re^{1,8} Pr^{0,33} \text{ (автор)}$$

При омывании реагирующей частицы обнаружено более существенное влияние критерия Рейнольдса

$$Nu = 0,9 \cdot 10^{-7} Re^{1,8} Pr^{0,33}. \tag{2}$$

Отклонение расчетных значений критерия Нуссельта от экспериментальных не превышает $\pm 13,5\%$.

С ростом скорости омывания возрастает паро- и газообразование, что сопровождается турбулизацией пограничного слоя.

Близкие условия тепломассообмена наблюдаются при испарении воды в собственные перегретые пары [11].

Таким образом, в условиях гетерогенной системы предельное значение скорости химической реакции определяется интенсивностью теплоотдачи при естественной циркуляции [12].

Процесс протекает в условиях сопряжения основной экзотермической реакции с параллельной эндотермической (вскипание воды) при небольших температурных напорах, т. е. в условиях близких к равновесию. В данном случае обеспечиваются низкие скорости течения 3-х фазного потока и, следовательно, затраты на трение ничтожны. В работе [13] показано, что КПД вскипающей системы не превышает $0,25\%$, т.е. всего четвертая часть процента передаваемого тепла переходит в механическую энергию

движущегося потока. В исследованном нами процессе в энергию циркулирующего потока преобразуются сотые доли процента энергии химической реакции. При учете трения находят предельно возможную скорость течения и тем самым более точно оценивают кинетическую энергию в общем балансе. Последнее обстоятельство дает возможность получить более достоверные коэффициенты теплоотдачи.

Литература

1. Ястржембский А.С. Техническая термодинамика. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1960. – 495 с.
2. Соколов Е.Я., Зингер А.М. Струйные аппараты. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 351 с. 3. Пороло Л.В. Воздушные газовые подъемники жидкости (эргазлифты). – М.: Машиностроение, 1969. – 160 с.
4. Акопян Б.А. Разработка методики расчета режимов работы периодического газлифта: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М.: МИНГ, 1989. – 24 с.
5. Идельчик И.Е. Некоторые интересные эффекты и парадоксы в аэродинамике и гидравлике. – М.: Машиностроение, 1982. – 96 с.
6. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – Новосибирск: Наука, 1970. – 660 с. 7. Кунии Д., Левеншпиль О. Промышленное псевдооживление. – М.: Химия, 1976. – 448 с.
8. Сажин Б.С. Основы техники сушки. – М.: Химия, 1984. – 320 с.
9. Солодов А.П. и др. Практикум по теплопередаче. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 296 с.
10. Трошенькин В.Б. Тепломассообмен при взаимодействии активированного алюминия с водой. Сб. научн. тр.: Вестник Харьк. политехн. ун-та, 1999. – Вып. 49. с. 14–18.
11. Лыков А.В. Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
12. Трошенькин В.Б. Метод расчета реакторов для производства водорода из воды и с помощью сплавов кремния и алюминия // Экология химической техники и биотехнологии. Юбил. сб. тр. каф. ХТПЭ. – Харьков: ХГПУ, 1996. – 1. – С. 107–111.
13. Трошенькин Б.А. Циркуляционные и пленочные испарители и водородные реакторы. – Киев: Наук. думка, 1985. – 174 с.
14. Трошенькин Б.А. Теплообмен при выделении водорода в реакциях алюмокремниевых сплавов с водой // Тепломассообмен – ММФ-92. Тепломассообмен в химически реагирующих системах. – Минск: ИТМО АНБ, 1992. – 3. – С. 89–92.
15. Эйринг Г., Лиин С.Г., Лин С.М. Основы химической кинетики: Пер. с англ. Е.Л. Розенберга под ред. А.М Бродского. – М.: Мир, 1983. – 528 с.

Bibliography (transliterated)

1. Yastrzhembskiy A.S. Tehnicheskaya termodinamika. – M.; L.: Gosenergoizdat, 1960. – 495 p.
2. Sokolov E.Ya., Zinger A.M. Struyniyie apparaty. – M.: Energoatomizdat, 1989. – 351 p. 3. Porolo L.V. Vozdushnyie gazovyye pod'emniki zhidkosti (ergazliftiy). – M.: Mashinostroenie, 1969. – 160 p.
4. Akopyan B.A. Razrabotka metodiki rascheta rezhimov raboty periodicheskogo gazlifta: Avtoref. dis. ... kand. tehn. nauk. – M.: MING, 1989. – 24 p.
5. Idelchik I.E. Nekotoryie interesnyie efektyi i paradoksyi v aerodinamike i gidravlike. – M.: Mashinostroenie, 1982. – 96 p.

6. Kutateladze S.S. Osnovy teorii teploobmena. – Novosibirsk: Nauka, 1970. – 660 p.
7. Kunii D., Levenshpil O. Promyshlennoe psevdoozhizhenie. – M.: Himiya, 1976. – 448 p.
8. Sazhin B.S. Osnovy tehniki sushki. – M.: Himiya, 1984. – 320 p.
9. Solodov A.P. i dr. Praktikum po teploperedache. – M.: Energoatomizdat, 1986. – 296 p.
10. Troshenkin V.B. Teplomassoobmen pri vzaimodeystvii aktivirovannogo alyuminiya s vodoy. Sb. nauchn. tr.: Vestnik Hark. politehn. un-ta, 1999. – Vyip. 49. p. 14–18.
11. Lyikov A.V. Teoriya sushki. – M.: Energiya, 1968. – 472 p.
12. Troshenkin V.B. Metod rascheta reaktorov dlya proizvodstva vodoroda iz vo-dyi i s pomoschyu splavov kremniya i alyuminiya Ekologiya himicheskoy tehniki i bio-tehnologii. Yubil. sb. tr. kaf. HTPe. – Harkov: HGPU, 1996. – 1. – p. 107–111.
13. Troshenkin B.A. Tsirkulyatsionnyie i plenochnyie ispariteli i vodorodnyie reaktoryi. – Kiev: Nauk. dumka, 1985. – 174 p.
14. Troshenkin B.A. Teploobmen pri vyidelenii vodoroda v reaktsiyah alyumokremnievyyih splavov s vodoy Teplomassoobmen – MMF-92. Teplomassoobmen v himicheski reagiruyuschih sistemah. – Minsk: ITMO ANB, 1992. – 3. – p. 89–92.
15. Eyring G., Liin S.G., Lin S.M. Osnovy himicheskoy kinetiki: Per. s angl. E.L. Rozenberga pod red. A.M Brodskogo. – M.: Mir, 1983. – 528 p.

УДК 661.961.1

Зіпунніков М.М.

ТЕПЛОМАСООБМІН ПРИ ВЗАЄМОДІЇ СПЛАВУ НА ОСНОВІ КРЕМНІЮ З ВОДОЮ

У даній роботі досліджено теплообмін між сплавом феросиліцію з добавками барію і розчином їдкою натру за умов хімічної взаємодії головних елементів сплаву. Вивчено характер змін температур у ході реакції. Коефіцієнти тепловіддачі узагальнені у виді критеріальної залежності. Установлено значний вплив числа Re рідини у підйомному потоці.

Пакки Г.В.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АППАРАТОВ
С ФТОРОПЛАСТОВЫМИ ФИЛЬТРОПАКЕТАМИ
ДЛЯ ОЧИСТКИ ЖИДКОСТИ ОТ МЕХАНИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ**

Основным недостатком использования фильтрации для разделения суспензий является накопление на поверхности и в поровой структуре фильтров твердых частиц, в результате чего происходит рост перепада давления на фильтрующем элементе, снижение пропускной способности фильтрующих элементов и необходимость замены фильтров. С этой проблемой постоянно сталкиваются потребители фильтрационного оборудования. При использовании различных фильтрующих элементов и фильтрующих устройств используются различные технические и технологические приемы для обеспечения регенерации фильтров в процессе непрерывной работы или при временном останове, увеличения межрегенерационного периода использования фильтрующих элементов либо периодической очистки фильтровальной перегородки или фильтрующего элемента.

Теоретические работы по исследованию механизма внедрения твердой частицы в поровую структуру фильтра провел Финкельштейн [1].

В работе Финкельштейна сделаны теоретические предположения о непроникинности механической частицы в пористое тело фильтра при высокой продольной скорости (свыше 6 м/с), вектор которой лежит в плоскости или параллелен образующей фильтрующей поверхности.

В работе [2] указано на возможность постоянного смыва жидкостью или снятия механическими устройствами механических примесей, задержанных на фильтровальной перегородке при фильтровании с образованием осадка на поверхности. Указанный способ рекомендуется при отделении механических примесей, размер которых больше диаметра пор и сепарация частиц происходит на фильтровальной поверхности.

Автором были проведены экспериментальные исследования для определения влияния закрутки потока на процесс отделения механических примесей из суспензии. Экспериментальная установка приведена на рис.1.

В качестве рабочей среды была выбрана водопроводная вода, в которую добавлялся загрязнитель – механические примеси. В качестве фильтрующих устройств использовались аппараты различных конструкций: без закрутки потока; с закруткой потока жидкости тангенциальным подводом в аппарат; аппарат с завихрителем потока жидкости на входе в кольцевую полость и аппарат с вращающимися лопастями в кольцевой полости. В результате экспериментальных исследований определялись следующие параметры: давление на входе в фильтр, давление на выходе из фильтра, перепад давления на аппарате при чистом фильтрующем элементе в начале эксперимента и перепад давления на фильтре в процессе работы по мере загрязнения фильтрующего элемента. Эксперимент прекращался при увеличении перепада давления на аппарате на один бар по сравнению с перепадом давления на чистом фильтре. Конструкции аппаратов, в которых не осуществлялась закрутка потока представлены на рис. 2.

Результаты экспериментов приведены на рис. 3.

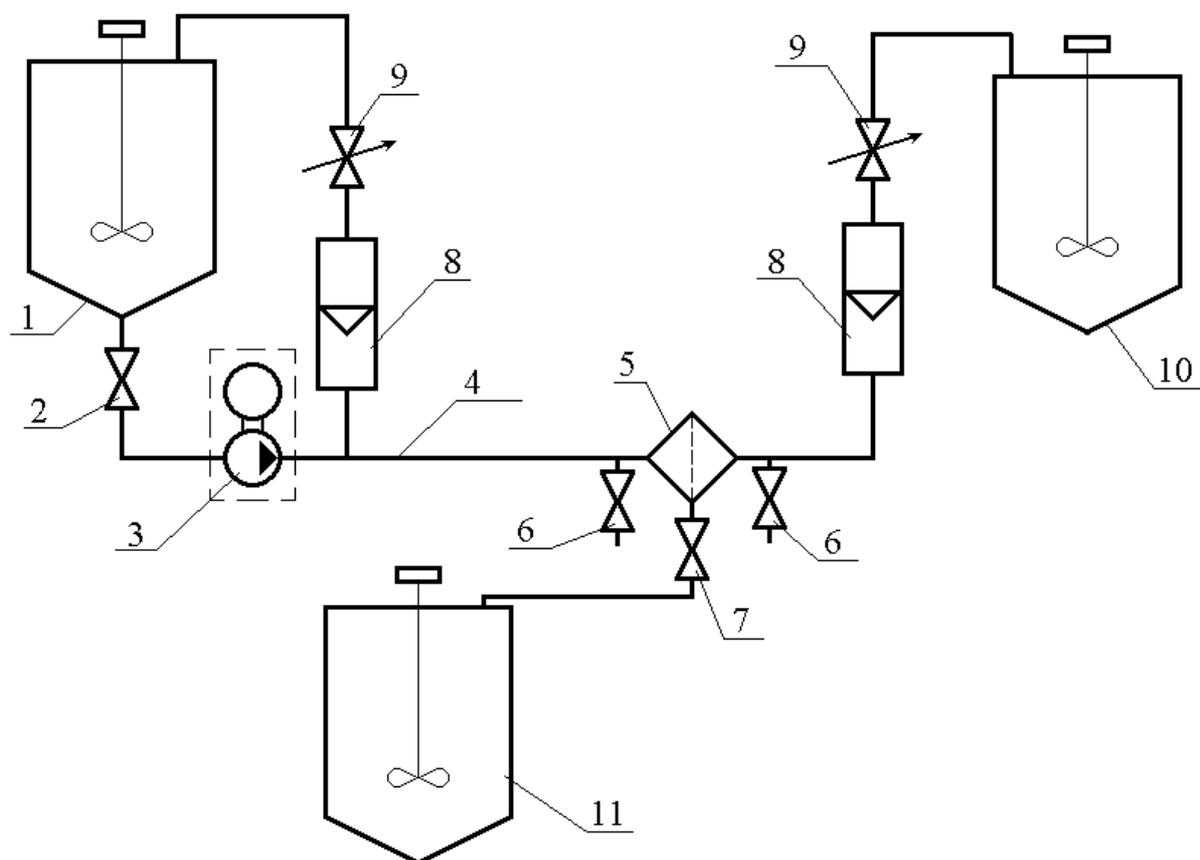


Рисунок 1 – Схема установки для определения эффективности работы фильтра

- 1 – расходный бак; 2,9 – краны; 3 – насос; 4 – соединительные трубы и шланги;
 5 – исследуемый фильтр; 6 – краны отбора проб; 7 – кран отвода дренажа;
 8 – расходомеры; 10 – бак очищенной жидкости; 11 – бак сбора дренажа

Аппарат с тангенциальным подводом жидкости

Конструкция аппарата с тангенциальным подводом жидкости представлена на рис. 4. Горизонтальный входной патрубок сдвинут относительно центральной оси симметрии к стенке цилиндрического корпуса, благодаря чему осуществляется закрутка потока на входе в кольцевую полость, а также отделение твердых частиц за счет центробежных сил на внутреннюю стенку корпуса. Фильтрующий элемент расположен вертикально, соосно корпусу. Подача суспензии осуществляется с внешней стороны фильтрующего элемента, отвод очищенной жидкости из внутреннего пространства фильтроэлемента проводится вверх. В аппарате реализована противоточная схема фильтрации. Патрубок выхода очищенной жидкости расположен горизонтально, несколько выше входного патрубка. Результаты экспериментов приведены на рис. 5.

Аппарат с завихрителем потока жидкости на входе в кольцевую полость

Конструкция аппарата с завихрителем потока жидкости на входе в кольцевую полость представлена на рис. 6. Горизонтальный входной патрубок направлен перпендикулярно центральной оси симметрии цилиндрического корпуса. Закрутка потока жидкости на входе в кольцевую полость осуществляется специальным завихрителем в виде направляющих пластин. Предварительное отделение твердых частиц происходит за счет дей-

ствия центробежных сил, отбрасывающих твердые частицы на внутреннюю стенку корпуса. Фильтрующий элемент расположен вертикально, соосно корпусу. Подача суспензии осуществляется с внешней стороны фильтрующего элемента, отвод очищенной жидкости из внутреннего пространства фильтроэлемента проводится вверх. В аппарате реализована противоточная схема фильтрации. Патрубок выхода очищенной жидкости расположен горизонтально, на одной оси с входным патрубком. Результаты экспериментов приведены на рис. 7.

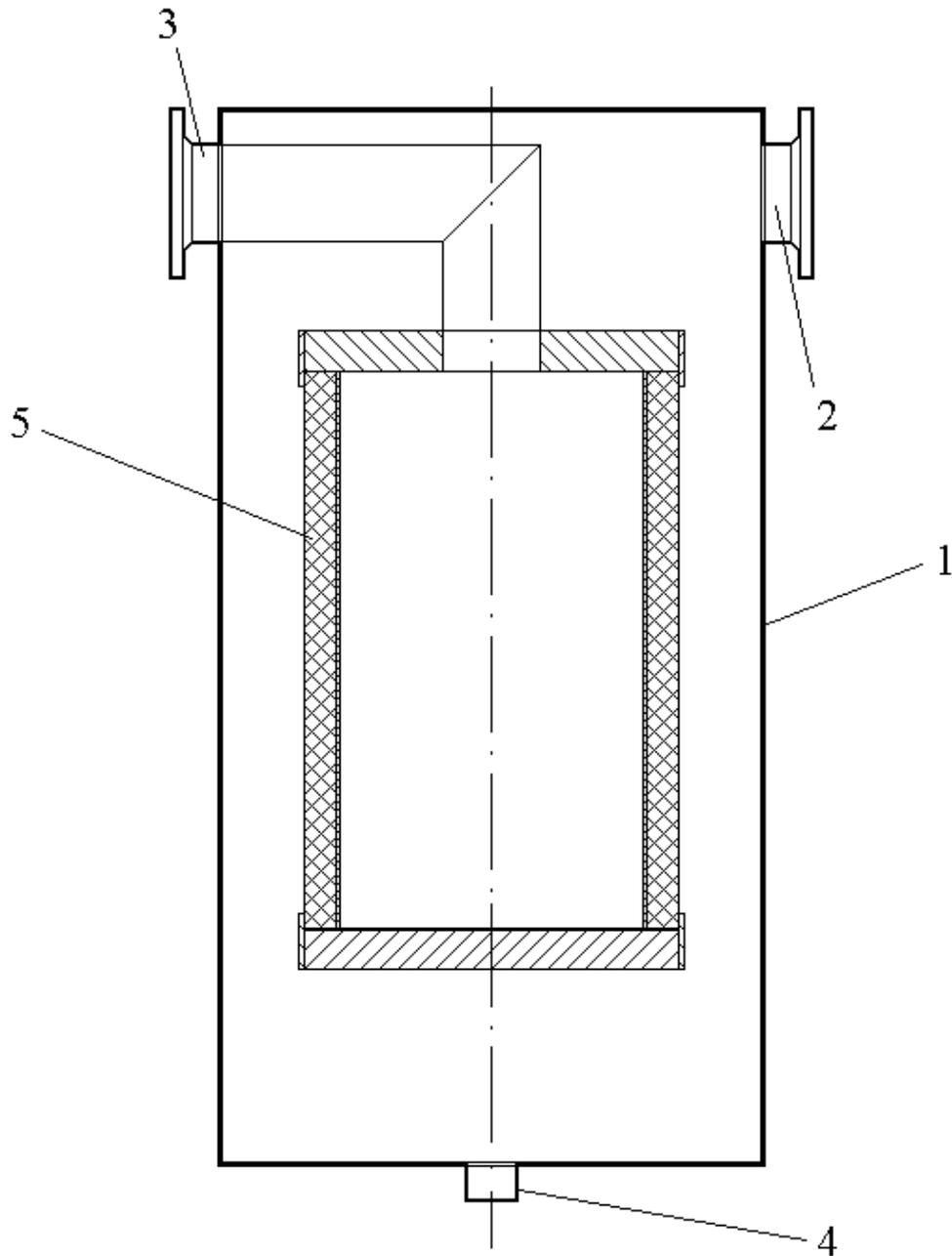


Рисунок 2 – Фильтр
1 – корпус; 2 – патрубок ввода; 3 – патрубок вывода; 4 – патрубок сливной;
5 – элемент фильтрующий

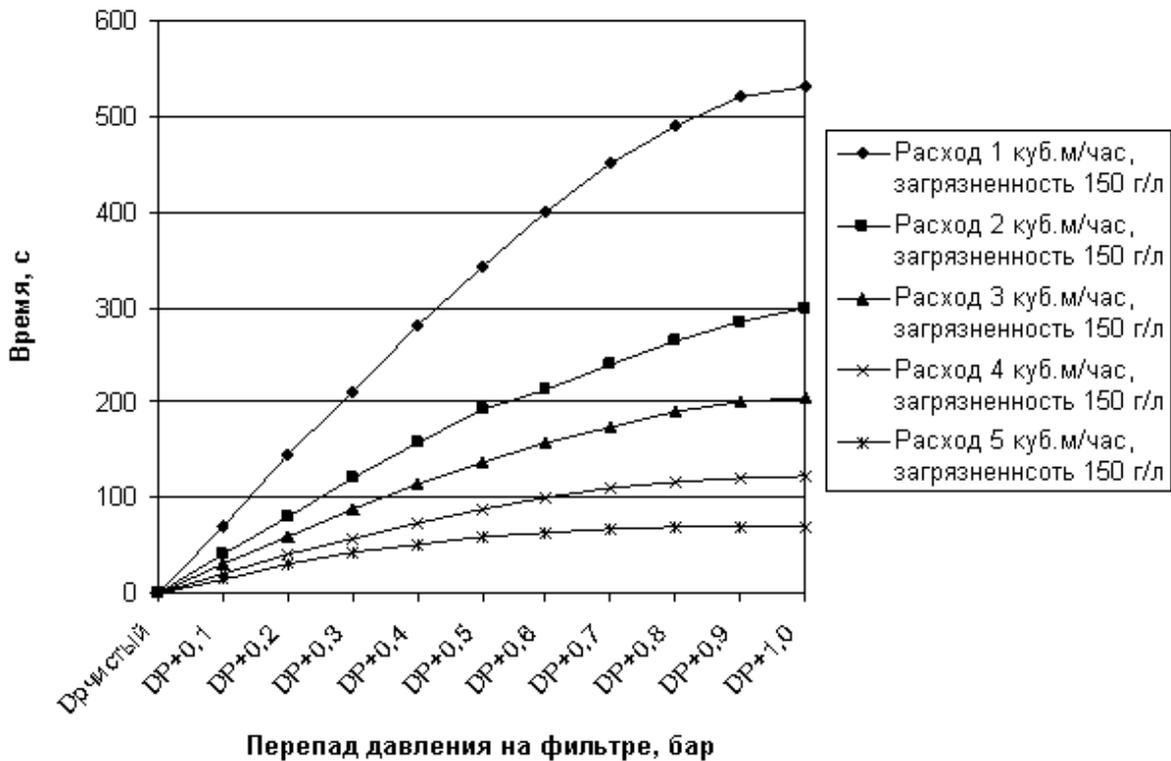


Рисунок 3 – Зависимость роста перепада давления на фильтре от расхода и времени работы при радиальной фильтрации

Аппарат с вращающимися лопастями в кольцевой полости

Конструкция аппарата с вращающимися лопастями в кольцевой полости представлена на рис.8. Вращение узких лопастей, расположенных вблизи поверхности фильтропакета обеспечивается частичным преобразованием кинетической энергии потока жидкости во вращательное движение благодаря лопаточному приводу, жестко связанному с лопастями, лопатки которого вращаются потоком жидкости. Горизонтальный входной патрубок сдвинут относительно центральной оси симметрии к стенке цилиндрического корпуса и поток направляется на лопатки в верхней части корпуса. Далее поток жидкости через отверстие попадает в кольцевую полость. Тангенциальная скорость потока жидкости на входе в кольцевую полость близка тангенциальной составляющей скорости вращающихся лопастей. Предварительное отделение твердых частиц происходит за счет действия центробежных сил, отбрасывающих твердые частицы на внутреннюю стенку корпуса. Фильтрующий элемент расположен вертикально, соосно корпусу. Подача суспензии осуществляется с внешней стороны фильтрующего элемента, отвод очищенной жидкости из внутреннего пространства фильтроэлемента проводится вверх. В аппарате реализована противоточная схема фильтрации. Патрубок выхода очищенной жидкости расположен горизонтально выше входного патрубка и лопаточного вращающего устройства. Результаты экспериментов приведены на рис. 9.

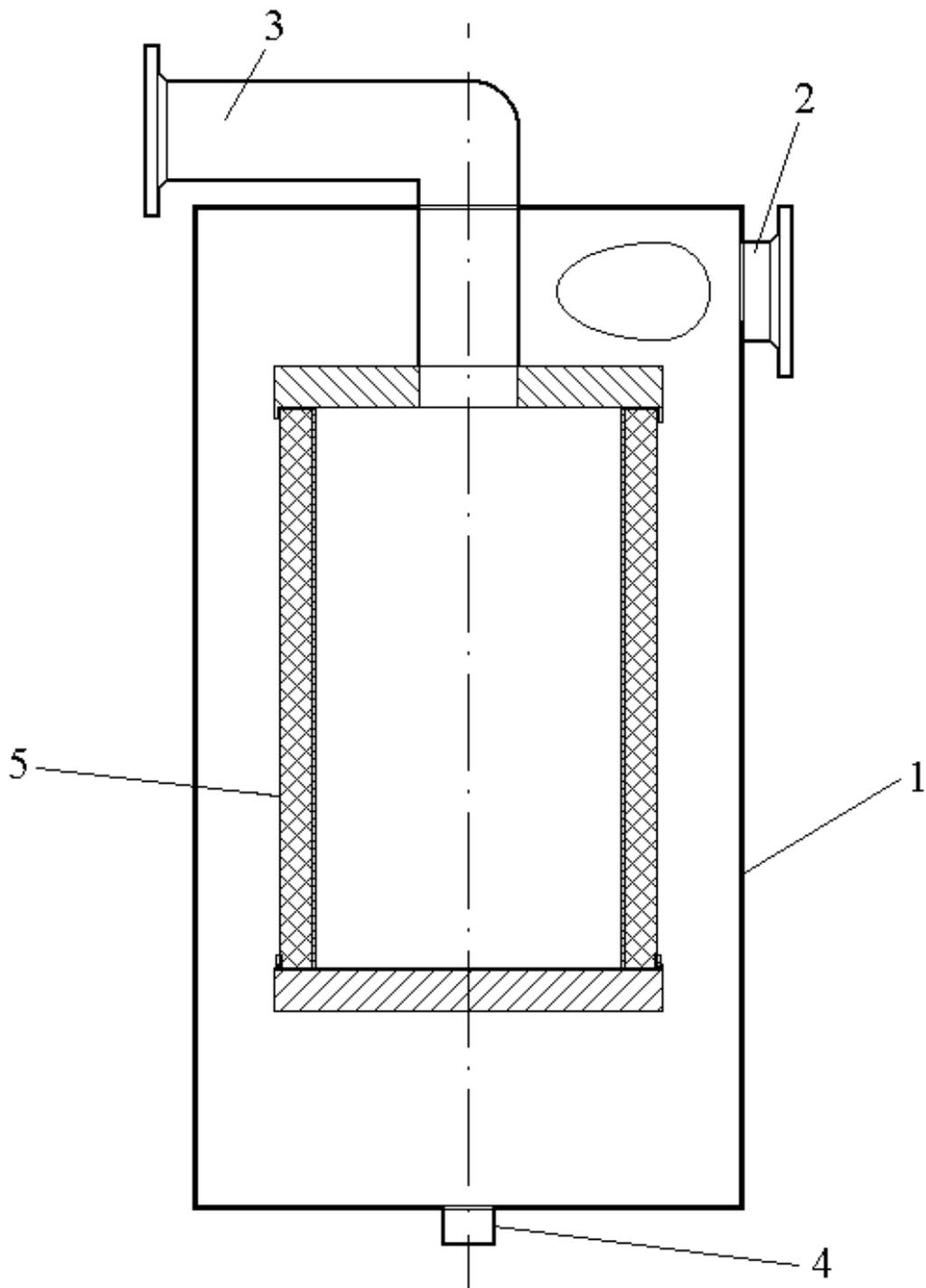


Рисунок 4 – Фильтр с тангенциальным подводом жидкости
1 – корпус; 2 – тангенциальный патрубок ввода; 3 – патрубок вывода;
4 – патрубок сливной; 5 – элемент фильтрующий

Влияние рециркуляции на эффективность очистки жидкости

Проведенные эксперименты и многолетний опыт эксплуатации фильтрующих устройств с фторопластовыми фильтроэлементами показали, что тангенциальное вращение жидкости существенно продлевает межрегенерационный период работы фильтроэлементов до максимально допустимого перепада давления. Анализ загрязнения

фільтропакетов показав, що при значительном соотношении длины фильтропакета к его диаметру и ширине кольцевой полости при противоточном режиме фильтрации загрязнение начинает накапливаться на нижней части фильтропакета, что приводит к росту перепада давления и росту скорости фильтрации в верхней части фильтропакета. При проведении экспериментов с конструкциями фильтрующих аппаратов с начальной закруткой потока (аппарат с тангенциальным подводом жидкости и аппарат с завихрителем потока жидкости на входе в кольцевую полость) было определено, что закрутка потока затухает и в нижней части фильтропакет работает в условиях радиальной фильтрации.

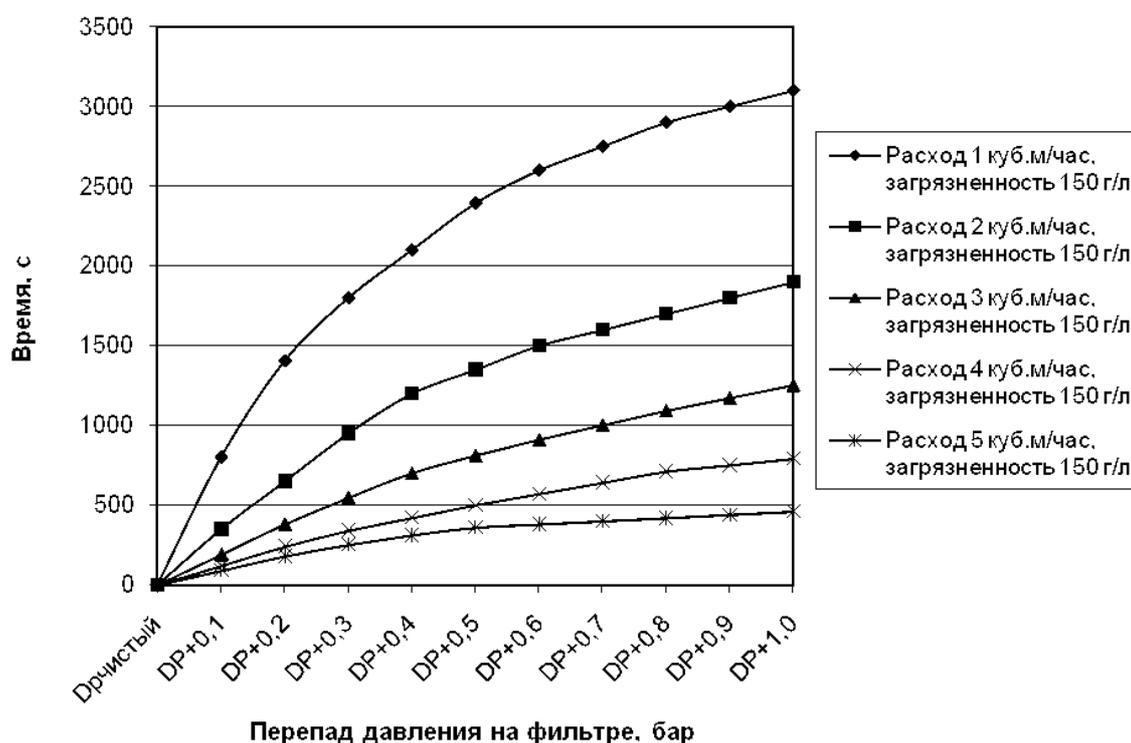


Рисунок 5 – Зависимость роста перепада давления на фильтре от расхода и времени работы при тангенциальной фильтрации

С увеличением процента жидкости, направляемой на рециркуляцию, условия работы фильтропакета в режиме тангенциальной фильтрации улучшаются. Однако большой расход рециркуляционной жидкости требует дополнительных устройств для выделения механических примесей из сгущенной суспензии, каковой есть рециркуляционная жидкость.

В зависимости от конкретного применения фильтрующего устройства, содержания и фракционного состава механических примесей и других причин рециркуляция жидкости может осуществляться либо совместно с дренированием через дренажный патрубок либо отдельно от дренирования через специальный рециркуляционный патрубок. Жидкость, отведенная на рециркуляцию, может возвращаться в исходную емкость, промежуточную емкость либо прямо во входной патрубок.

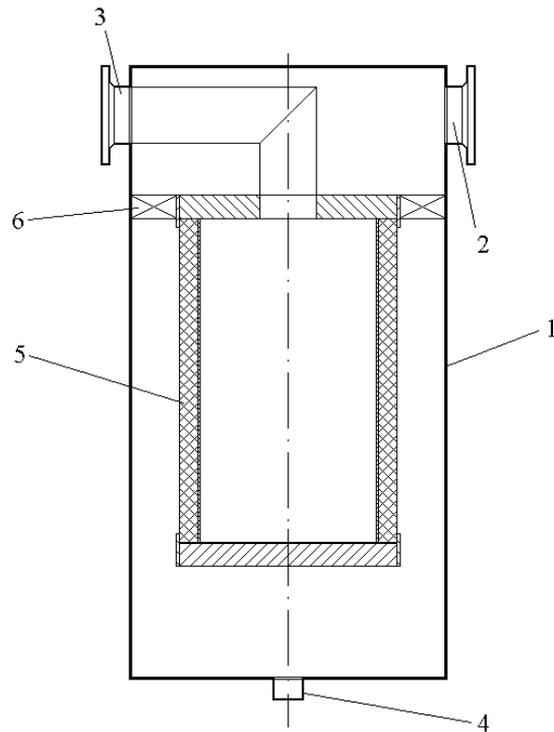
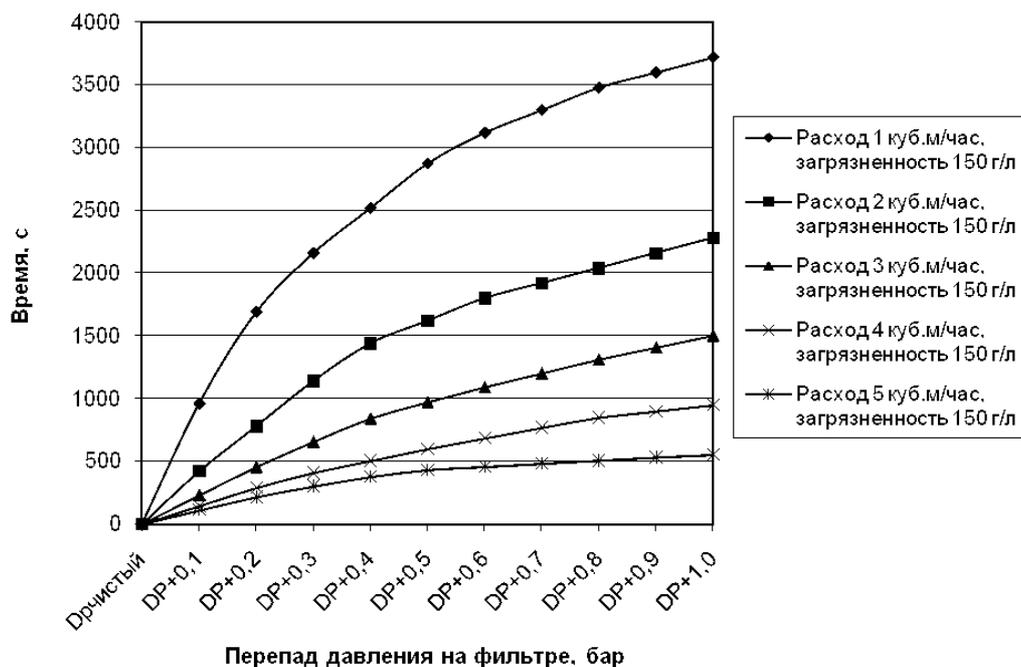


Рисунок 6 – Фільтр с завихрителем
 1 – корпус; 2 – патрубок ввода; 3 – патрубок вывода; 4 – патрубок сливной;
 5 – элемент фильтрующий; 6 – завихритель

Расход жидкости, направляемой на рециркуляцию, находился в пределах от 1 до 25 % общего расхода жидкости.



Перепад давления на фильтре. бар
 Рисунок 7 – Зависимость роста перепада давления на фильтре от расхода и времени работы при фильтрации потока, закрученного завихрителем

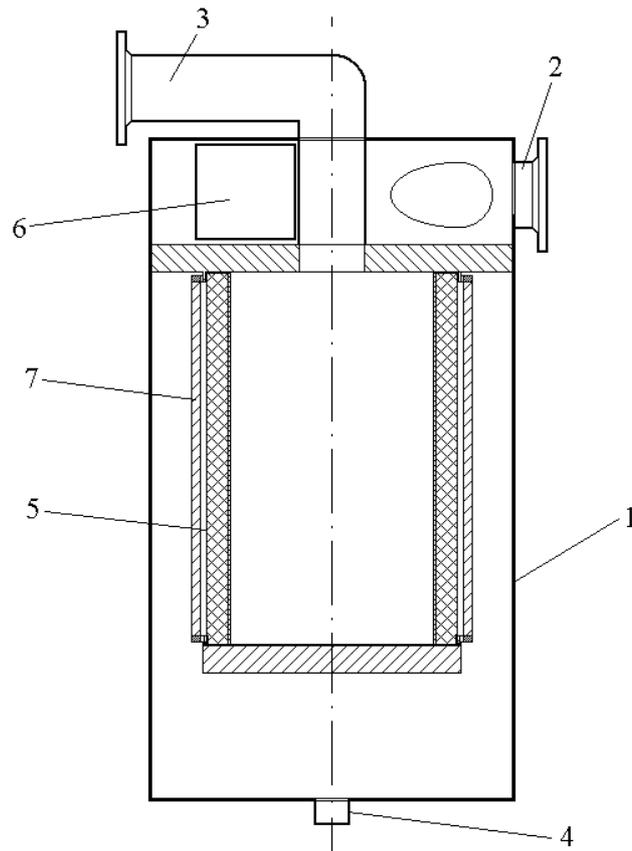


Рисунок 8 – Фільтр с вращающимися лопастями
 1 – корпус; 2 – патрубок ввода; 3 – патрубок вывода; 4 – патрубок сливной;
 5 – элемент фильтрующий; 6 – турбина; 7 – пластина

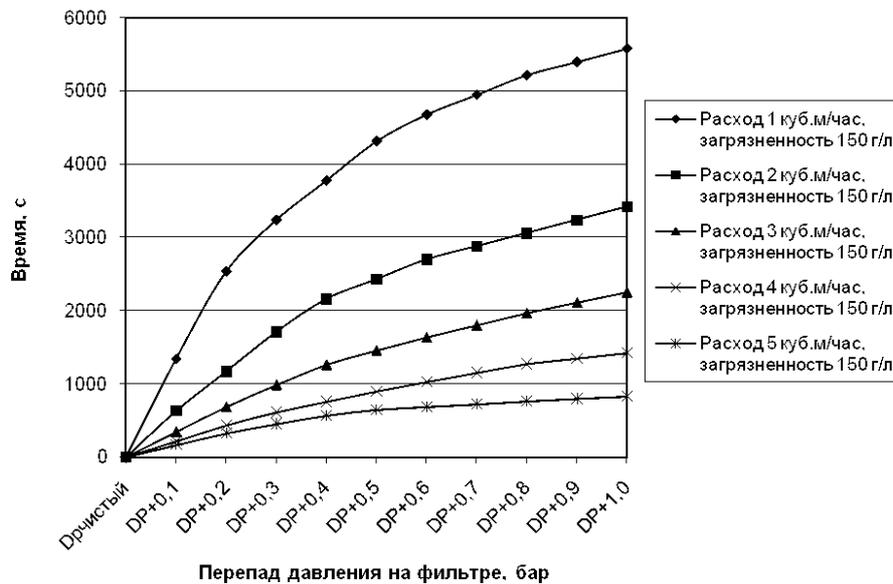


Рисунок 9 – Зависимость роста перепада давления на фильтре от расхода и времени работы при фильтрации потока, закрученного вращающимися лопастями

Выводы

1. Исследовано влияние местной закрутки потока жидкости и рециркуляции потока жидкости на межрегенерационный срок службы фторопластовых фильтропакетов типа ФЭП в фильтрах очистки жидкости.

2. Показано, что местная закрутка потока жидкости позволяет перейти от радиальной объемной фильтрации жидкости к тангенциальной поверхностной фильтрации, что обеспечивает возможность эффективной регенерации фильтропакетов.

3. Показано положительное влияние рециркуляции части потока жидкости на межрегенерационный срок службы фильтропакетов.

Литература

1. Финкельштейн З.Л. Применение и очистка рабочих жидкостей для горных машин. // М.: Недра, 1986. – 232 с., с ил.

2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. // М.: Химия. – 1971.

Bibliography (transliterated)

1. Finkelshteyn Z.L. Primenenie i ochistka rabochih zhidkostey dlya gornyih mashin. M.: Nedra, 1986. – 232 p., s il.

2. Kasatkin A.G. Osnovnyie protsessyi i apparaty himicheskoy tehnologii. M.: Himiya. – 1971.

УДК 66.067–9

Паккі Г.В.

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ АПАРАТІВ
З ФТОРОПЛАСТОВИМИ ФІЛЬТРОПАКЕТАМИ
ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ РІДИНИ ВІД МЕХАНІЧНИХ ДОМІШОК**

Досліджено вплив місцевої закрутки потоку рідини та рециркуляції потоку рідини на межрегенерацийний строк використання фторопластових фільтропакетів типу ФЭП в фільтрах очищення рідини.

УДК 662.997

Сиворакша В.Е., Марков В.Л.

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ СПОСОБОВ ПОДДЕРЖАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В ТЕПЛОВЫХ АККУМУЛЯТОРАХ

В теплотехнических системах с неравномерным поступлением или расходом энергии всегда имеются тепловые аккумуляторы (ТА), которые позволяют накапливать, хранить и выдавать тепловую энергию в соответствии с требованиями потребителя. В литературе [1, 2] много внимания уделено принципам накопления и хранения теплоты в тепловых аккумуляторах, но вопросы экономически выгодной их теплозащиты остались не рассмотренными. В работе [3] сделана попытка оценить возможности использования теплового насоса для компенсации тепловых потерь из ТА, но экономическая сторона этого вопроса осталась не затронутой.

Авторы предлагают для сравнения различных способов теплозащиты, обеспечивающей температуру в ТА неизменной, использовать приведенные годовые затраты C_{OC} на создание этой защиты, которые могут быть записаны следующим образом:

$$C_{\text{OC}} = C_{\text{e}} + C_{\text{y}} + C_{\text{f}} . \quad (1)$$

Здесь

$$C_{\text{e}} = (\varepsilon + \sigma)_{\text{e}} \cdot V_{\text{e}} \cdot \ddot{O}_{\text{e}} ,$$

$$C_{\text{y}} = Q_{\text{y}\ddot{n}\ddot{o}\ddot{o}} \cdot n \cdot \delta \cdot \ddot{O}_{\text{y}} ,$$

$$C_{\text{f}} = (\varepsilon + \sigma)_{\text{f}} \cdot \frac{Q_{\text{y}\ddot{n}\ddot{o}\ddot{o}}}{\tau_{\text{f}}} \cdot \ddot{O}_{\text{f}} .$$

Величина V_{e} вычисляется как

$$V_{\text{e}} = \frac{F_{\ddot{n}\ddot{o}} + F_{\text{e}}}{2} \cdot \delta_{\text{e}} = F_{\ddot{O}} \cdot \delta_{\text{e}} , \text{ м}^3 . \quad (2)$$

Суточный расход энергии $Q_{\text{y}\ddot{n}\ddot{o}\ddot{o}}$ определяется суточными потерями теплоты.

При использовании для компенсации тепловых потерь термоэлектронагревателей (ТЭН)

$$Q_{\text{y}\ddot{n}\ddot{o}\ddot{o}} = \frac{Q_{\ddot{\alpha}\ddot{\alpha}\ddot{o}\ddot{o}}}{\eta_{\text{f}}} = \frac{0,024}{\eta_{\text{f}}} \cdot \lambda_{\text{e}} \cdot (\ddot{O}_{\ddot{\alpha}\ddot{\alpha}} - \ddot{O}_{\text{e}\ddot{\delta}}) \cdot \frac{F_{\ddot{O}}}{\delta_{\text{e}}} , \text{ кВт} \cdot \text{ч/сутки} . \quad (3)$$

В том случае, когда с этой целью применяется тепловой насос (ТН), воспринимающий тепло из окружающей среды,

$$Q_{y\dot{n}o\dot{o}} = \frac{Q_{\dot{o}i\dot{o}o}}{\varphi_e} = \frac{0,024}{\varphi_{\dot{a}}} \cdot \lambda_{\dot{e}} \cdot (\dot{O}_{\dot{O}\dot{A}} - \dot{O}_{i\dot{e}\dot{o}}) \cdot \frac{F_{\dot{O}}}{\delta_{\dot{e}}}, \text{ кВт}\cdot\text{ч/сутки}, \quad (4)$$

$$\text{где } \varphi_e = \frac{(\dot{O}_{\dot{O}\dot{A}} + \Delta\dot{O}_{\dot{E}}) \cdot \alpha}{(\dot{O}_{\dot{O}\dot{A}} + \Delta\dot{O}_{\dot{E}}) - (\dot{O}_{i\dot{e}\dot{o}} - \Delta\dot{O}_{\dot{E}\dot{N}})}.$$

Для ТН небольшой мощности можно принимать $\alpha=0,45\dots0,55$ [5]

Если для компенсации тепловых потерь используется солнечная установка (СУ) или электрические ветроагрегаты (ВА), то затраты C_y , связанные с расходом энергии, равны нулю, а затраты на нагревательное оборудование включают в себя или затраты $C_{\dot{N}\dot{O}}$ на СУ, или затраты $C_{\dot{A}\dot{A}}$ на ВА [6]:

$$C_{\dot{N}\dot{O}} = (\varepsilon + \sigma)_{\dot{N}\dot{O}} \cdot \ddot{O}_{\dot{N}\dot{O}} \cdot F_{\dot{N}\dot{E}}; \quad C_{\dot{A}\dot{A}} = (\varepsilon + \sigma)_{\dot{A}\dot{A}} \cdot \ddot{O}_{\dot{A}\dot{A}} \cdot N_{\dot{A}\dot{A}}.$$

Площадь солнечного коллектора (СК) можно определить из условия равенства суточных тепловых потерь из ТА вероятному количеству теплоты, получаемой от СУ [7]:

$$F_{\dot{N}\dot{E}} = \frac{0,024 \cdot \lambda_{\dot{e}} \cdot (\dot{O}_{\dot{O}\dot{A}} - \dot{O}_{i\dot{e}\dot{o}})}{G_{\dot{o}\dot{a}} \cdot \tilde{n}_{\dot{o}i} \cdot (\dot{O}_{\dot{D}} - \dot{O}_{\dot{O}\dot{A}}) \cdot \hat{O}_N \cdot \tau_{\tilde{n}} \cdot \Psi_{\tilde{n}} \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{F_{\dot{O}}}{\delta_{\dot{e}}}. \quad (5)$$

Тогда

$$C_{\dot{N}\dot{O}} = \hat{A}_{\dot{N}\dot{O}} \cdot \frac{F_{\dot{O}}}{\delta_{\dot{e}}}, \quad (6)$$

$$\text{где } \hat{A}_{\dot{N}\dot{O}} = \frac{24 \cdot (\varepsilon + \sigma)_{\dot{N}\dot{O}} \cdot \ddot{O}_{\dot{N}\dot{O}} \cdot \lambda_{\dot{e}} \cdot (\dot{O}_{\dot{O}\dot{A}} - \dot{O}_{i\dot{e}\dot{o}})}{G_{\dot{o}\dot{a}} \cdot \tilde{n}_{\dot{o}i} \cdot (\dot{O}_{\dot{D}} - \dot{O}_{\dot{O}\dot{A}}) \cdot \hat{O}_N \cdot \tau_{\tilde{n}} \cdot \Psi_{\tilde{n}}}.$$

Мощность ВА определяется суточным потреблением электроэнергии и вероятным временем работы ветроагрегатов:

$$N_{\dot{A}\dot{A}} = \frac{Q_{y\dot{n}o\dot{o}}}{\tau_{\dot{A}\dot{A}}}.$$

Тогда

$$C_{\dot{A}\dot{A}} = \hat{A}_{\dot{A}\dot{A}} \cdot \frac{F_{\dot{O}}}{\delta_{\dot{e}}}, \quad (7)$$

где $\hat{A}_{\Delta\lambda} = \frac{0,024}{\eta_f \cdot \tau_{\Delta\lambda}} \cdot (\varepsilon + \sigma)_{\Delta\lambda} \cdot \ddot{O}_{\Delta\lambda} \cdot \lambda_e \cdot (\dot{O}_{\Delta\lambda} - \dot{O}_{i\delta\delta})$ при использовании ТЭН;
 $\hat{A}_{\Delta\lambda} = \frac{0,024}{\varphi_{\Delta} \cdot \tau_{\Delta\lambda}} \cdot (\varepsilon + \sigma)_{\Delta\lambda} \cdot \ddot{O}_{\Delta\lambda} \cdot \lambda_e \cdot (\dot{O}_{\Delta\lambda} - \dot{O}_{i\delta\delta})$ при использовании ТН.

Приведенные годовые затраты на теплозащиту ТА зависят от площади теплообмена и толщины изоляции:

$$C_{\text{ог}} = \hat{A}_e \cdot F_{\dot{O}} \cdot \delta_e + \hat{A}_y \cdot \frac{F_{\dot{O}}}{\delta_e} + \hat{A}_f \cdot \frac{F_{\dot{O}}}{\delta_e}, \quad (8)$$

где $\hat{A}_e = (\varepsilon + \sigma)_e \cdot \ddot{O}_e$,

$$\hat{A}_y = \frac{0,024}{Y} \cdot \lambda_e \cdot (\dot{O}_{\Delta\lambda} - \dot{O}_{i\delta\delta}) \cdot n \cdot p \cdot \ddot{O}_y,$$

$$\hat{A}_f = \frac{0,024}{Y} \cdot \lambda_e \cdot (\dot{O}_{\Delta\lambda} - \dot{O}_{i\delta\delta}) \cdot (\varepsilon + \sigma)_f \cdot \ddot{O}_f \cdot \frac{1}{\tau_f},$$

$Y = \eta_f$ при использовании ТЭН, $Y = \varphi_{\Delta}$ при использовании ТН.

При заданном объеме теплоаккумулятора $V_{\Delta\lambda}$ площадь теплообмена, в первую очередь, зависит от формы ТА. Наиболее распространенными формами являются шар, цилиндр и прямоугольный параллелепипед. Минимальной площадью поверхности обладает шар. Тела других форм имеют площади поверхности, большие в k раз по сравнению с шаром. Так, для цилиндра диаметром D и высотой $L_{\ddot{O}}$ коэффициент

$k_{\ddot{O}} = \left(\frac{1}{2} + h_{\ddot{O}} \right) \cdot \sqrt[3]{\frac{4}{9 \cdot h_{\ddot{O}}^2}}$, где $h_{\ddot{O}} = \frac{L_{\ddot{O}}}{D}$; для параллелепипеда с ребрами D, b, c коэффициент

$k_f = \frac{2 \cdot (h_b + h_c + h_b \cdot h_{\bar{n}})}{\sqrt[3]{36 \cdot \pi \cdot h_b^2 \cdot h_c^2}}$, где $h_b = \frac{b}{D}$; $h_{\bar{n}} = \frac{c}{D}$.

Для цилиндров минимальное значение $k_{\ddot{O}} = 1,14$ при $h_{\ddot{O}} = 1$ (нормальный цилиндр); для параллелепипедов – $k_f = 1,24$ при $h_b = h_c = 1$ (куб).

В таблице 1 приведены выражения для расчета характерных величин ТА указанных форм.

Существенное влияние на приведенные годовые затраты оказывает толщина теплоизоляционного слоя δ_e . Ее увеличение приводит, с одной стороны, к росту объема V_e и затрат на теплоизоляцию, а, с другой стороны, снижает суточные тепловые потери и затраты на расход энергии и на нагревательную аппаратуру. Для выявления оптимальной толщины слоя теплоизоляции рассмотрим производную

$$\frac{\partial C_{\text{ог}}}{\partial \delta_e} = \hat{A}_e \cdot \frac{\partial V_e}{\partial \delta_e} + (\hat{A}_y + \hat{A}_f) \cdot \frac{\partial}{\partial \delta_e} \left(\frac{F_{\dot{O}}}{\delta_e} \right). \quad (9)$$

Производная $\frac{\partial V_{\epsilon}}{\partial \delta_{\epsilon}}$ рассчитывается по следующим выражениям соответственно:

для шара

$$\pi \cdot (D^2 + 4 \cdot D \cdot \delta_{\epsilon} + 6 \cdot \delta_{\epsilon}^2),$$

для цилиндра

$$\pi \cdot \left[\left(\frac{1}{2} + h_{\delta} \right) \cdot D^2 + 4 \cdot D \cdot (2 + h_{\delta}) \cdot \delta_{\epsilon} + 18 \cdot \delta_{\epsilon}^2 \right],$$

для параллелепипеда

$$2 \cdot (h_b + h_c + h_b \cdot h_c) \cdot D^2 + 8 \cdot D \cdot (1 + h_a + h_b) \cdot \delta_{\epsilon} + 36 \cdot \delta_{\epsilon}^2.$$

Производная $\frac{\partial (F_{\delta} / \delta_{\epsilon})}{\partial \delta_{\epsilon}}$ рассчитывается по следующим выражениям соответ-

ственно:

для шара

$$\pi \left(2 - \frac{D^2}{\delta_{\epsilon}^2} \right),$$

для цилиндра

$$\pi \left[6 - \left(\frac{1}{2} + h_{\delta} \right) \frac{D^2}{\delta_{\epsilon}^2} \right],$$

для параллелепипеда

$$12 - 2(h_b + h_c + h_b \cdot h_c) \frac{D^2}{\delta_{\epsilon}^2}.$$

Приравняв производную $\frac{\partial C_{\delta}}{\partial \delta_{\epsilon}}$ нулю, получим уравнение

$$\dot{A}_1 \cdot \frac{\frac{\dot{A}_2}{\delta_{\epsilon}^2} - \dot{A}_3}{\dot{A}_2 + \dot{A}_4 \cdot \delta_{\epsilon} + 3 \cdot \dot{A}_3 \cdot \delta_{\epsilon}^2} = 1. \quad (10)$$

Выражения для вычисления $\hat{A}_1, \hat{A}_2, \hat{A}_3, \hat{A}_4$ для ТА рассматриваемых форм приведены в таблице 2.

Таблица 2

Обозначение	Размерность	Шар	Цилиндр	Параллелепипед
A_1	m^2	$\frac{\hat{A}_y + \hat{A}_f}{\hat{A}_e}$	$\frac{\hat{A}_y + \hat{A}_f}{\hat{A}_e}$	$\frac{\hat{A}_y + \hat{A}_f}{\hat{A}_e}$
A_2	m^2	D^2	$\left(\frac{1}{2} + h_{\delta}\right) \cdot D^2$	$(h_b + h_n + h_b \cdot h_n) \cdot D^2$
A_3	–	2	3	6
A_4	m	4D	$2 \cdot (2 + h_{\delta}) \cdot D$	$4 \cdot (1 + h_b + h_c) \cdot D$

Примечание:

- 1) если используется СУ, то $\hat{A}_1 = \frac{\hat{A}_{\tilde{N}O}}{\hat{A}_e}$;
- 2) если используются ВА, то $\hat{A}_1 = \frac{(\hat{A}_{AA} + \hat{A}_f)}{\hat{A}_e}$.

Уравнение (10) решается численным методом. Для вычисления приведенных годовых затрат полученное из него оптимальное значение δ_e^* подставляется в уравнение (8).

Условие экономической целесообразности использования теплового насоса в системе теплозащиты ТА может быть выявлено из неравенства:

$$(C_y + C_f)_{\delta} < (C_y + C_f)_{\delta \dot{y}} .$$

Из него следует, что таким условием является:

$$\ddot{O}_{\delta} < \frac{(\varphi_a - 1) \cdot n \cdot p \cdot \tau_i \cdot \ddot{O}_y}{\varepsilon + \sigma} + \varphi_a \cdot \ddot{O}_{\delta \dot{y}} . \tag{11}$$

Пример расчета

Тепловой аккумулятор объемом $V_{\delta A} = 90 \text{ м}^3$ с теплоизоляционным слоем из шлаковаты содержит горячую воду при $\dot{O}_{\delta A} = 333 \text{ К}$ ($t_{\delta A} = 60 \text{ }^\circ\text{C}$) в течение $n = 20$ суток/цикл и в продолжении года $p = 5$ цикл/год. Необходимо оценить приведенные годовые затраты на тепловую защиту ТА по средним метеоданным летнего периода в г. Днепропетровске. В расчетах использованы следующие удельные стоимости: $\ddot{O}_e = 150 \text{ грн/м}^3$; $\ddot{O}_{\delta \dot{y}} = 20 \text{ грн/кВт}$; $\ddot{O}_{\delta} = 200 \text{ грн/кВт}$; $\ddot{O}_{\tilde{N}O} = 180 \text{ грн/м}^2$; $\ddot{O}_{AA} = 2000 \text{ грн/кВт}$; $\ddot{O}_y = 0,22 \text{ грн/кВт}\cdot\text{ч}$.

Таблица 3 – Значения величин, входящих в уравнение (10)

№№ п/п	Обозначение	Размерность	Шар	Нормальный цилиндр	Куб
1	D	м	5,56	4,86	4,48
2	\dot{A}_2	м ²	0,099/0,0407	0,099/0,0407	0,099/0,0407
3	\dot{A}_2	м ²	30,91	35,43	60,21
4	\dot{A}_3	–	2	3	6
5	\dot{A}_4	м	22,24	29,16	53,76

Таблица 4 – Результаты расчета (в числителе нагрев ТЭН, в знаменателе – ТН)

№№ п/п	Обозначение	Размерность	Сфера	Нормальный цилиндр	Куб
1	δ_u^*	м	0,285/0,188	0,280/0,187	0,278/0,185
2	V_e	м ³	30,66/19,53	33,3/21,65	37,9/24,19
3	ϵ/δ_e^*	м	377,5/552,7	424,7/619,2	490,4/706,9
4	C_e	грн/год	367,9/234,4	399,6/259,8	454,8/290,3
5	C_f	грн/год	437,9/215,5	492,6/241,5	568,9/275,7
6		грн/год	10,9/54,2	12,3/60,7	14,2/69,3
7	$C_{\sigma\sigma}$	грн/год	816,7/504,1	904,5/562,0	1037,9/635,3

Таблица 5 – Результаты расчета для ТА кубической формы при нагреве от СУ и ВА с ТН

Тип системы нагрева	δ_e^*	V_e	$F_{\dot{O}}/\delta_e^*$	C_e	C_f	$C_{\sigma\sigma}$
СУ	0,365	51,7	388,06	620,4	1543,7	2164,1
ВА с ТН	0,365	51,7	388,06	620,4	872,3	1492,7

Выводы

Предлагаемая методика технико-экономического анализа позволяет оценить влияние составляющих приведенных затрат на тепловую защиту теплового аккумулятора и определить оптимальную толщину теплоизоляционного слоя с выбранным значением коэффициента теплопроводности материала изоляции.

Условные обозначения

C – приведенные годовые затраты; \hat{O}_N – функция, зависящая от параметров солнечного коллектора и теплообменника в ТА; \dot{O} – удельная стоимость; α – коэффициент, суммарно учитывающий все потери в ТН; δ – толщина слоя; ϵ – коэффициент эффективности капиталовложений; η – коэффициент полезного действия; λ – коэффициент теплопроводности; σ – коэффициент, учитывающий отчисления на текущий ремонт, зарплату и т.д.; τ – длительность работы в каждом сутках; ϕ_e – действительный коэффициент преобразования ТН; ψ – коэффициент солнечного сияния; b, c – ребра

параллелепипеда; $\tilde{n}_{\delta i}$ – удельная теплоемкость теплоносителя; D – характерный размер; F – площадь наружной поверхности; h – удлинение; G – расход теплоносителя; n – число суток хранения в одном цикле; p – число циклов в году; N – мощность; $Q_{\tilde{n}\delta}$ – суточный расход; T – температура по шкале Кельвина; ΔT – средний температурный напор; V – объем.

Индексы

\hat{A} – ветроагрегат; \hat{e} – изоляция; $\hat{E}\tilde{N}$ – испаритель теплового насоса; \hat{E} – конденсатор теплового насоса; n – нагрев; \hat{I} – нагревательная аппаратура; $\hat{i}\hat{e}\hat{\delta}$ – окружающая среда; \hat{I} – параллелепипед; $\hat{\delta}$ – равновесный; \tilde{n} – солнечный; $\tilde{N}\hat{E}$ – солнечный коллектор; $\tilde{n}\delta$ – силовая стенка; $\tilde{N}\hat{O}$ – солнечная установка; \hat{O} – тепловой; $\hat{O}\hat{A}$ – тепловой аккумулятор; $\hat{O}\hat{C}$ – тепловая защита; $\hat{O}\hat{I}$ – тепловой насос; δi – теплоноситель; $\hat{o}\hat{i}$ – удельный; \hat{o} – цилиндр; \hat{y} – энергия.

Литература

1. Даффи Дж.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Даффи Дж.А., Бекман У.А.: Пер. с англ. – М: Мир, 1977. – 420 с.
2. Левенберг В.Д. Аккумулирование тепла / В.Д. Левенберг, М.Р. Ткач, В.А. Гольстрем: – К.: Техника, 1991. – 112 с.
3. Сиворакша В.Е. Марков В.Л., Петров Б.Е. Комбинированная теплозащита сезонных тепловых аккумуляторов / Сиворакша В.Е., Марков В.Л., Петров Б.Е. // Научно-практический журнал „Интегрированные технологии и энергосбережение”, 2005, № 3. – С. 37–41.
4. Валов М.И. Оценка экономической эффективности систем солнечного теплоснабжения / Валов М.И., Зимин Е.Н.: Под ред. Е.В. Калинина – М.: МЭИ, 1988. – 48 с.
5. Мартыновский В.С. Анализ действительных термодинамических циклов – М.: Энергия, 1972. – 216 с.
6. В.Е. Сиворакша. Технично-економическая оптимизация комбинированной солнечно-ветровой системы горячего водоснабжения / В.Е. Сиворакша, В.Л. Марков, Б.Е. Петров // Проблемы высокотемпературной техники: Зб. наук. пр. – Дніпропетровськ: РВВ ДНУ, 2004. – С. 116–123.
7. Сиворакша В.Ю. Теплові розрахунки геліосистем / Сиворакша В.Ю., Марков В.Л., Петров Б.Є., Золотько К.Є., Стаценко І.М. // Монографія – Дніпропетровськ: Вид-во ДНУ, 2003. – 132 с.

Bibliography (transliterated)

1. Daffi Dzh.A. Teplovyie protsessyi s ispolzovaniem solnechnoy energii Daffi Dzh.A., Bekman U.A.: Per. s angl. – M: Mir, 1977. – 420 p.
2. Levenberg V.D. Akkumulirovanie tepla V.D. Levenberg, M.R. Tkach, V.A. Golstrem: – K.: Tehnika, 1991. – 112 p.
3. Sivoraksha V.E. Markov V.L., Petrov B.E. Kombinirovannaya teplozaschita sezonnyih teplovyih akkumulyatorov Sivoraksha V.E., Markov V.L., Petrov B.E. Nauchno-prakticheskiy zhurnal „Integrirovannyye tehnologii i energosberezhenie”, 2005, # 3. – p. 37–41.
4. Valov M.I. Otsenka ekonomicheskoy effektivnosti sistem solnechnogo teplosnabzheniya Valov M.I., Zimin E.N.: Pod red. E.V. Kalinina – M.: MEI, 1988. – 48 p.

5. Martynovskiy V.S. Analiz deystvitelnyih termodinamicheskikh tsiklov – M.: Energiya, 1972. – 216 p.

6. V.E. Sivoraksha. Tehniko-ekonomicheskaya optimizatsiya kombinirovannoy solnechno-ventrovoy sistemy goryachego vodosnabzheniya V.E. Sivoraksha, V.L. Markov, B.E. Petrov Problemyi vyisokotemperaturnoy tehniki: Zb. nauk. pr. – DnIpropet-rovsk: RVV DNU, 2004. – p. 116–123.

7. Sivoraksha V.Yu. Teplovi rozrahunki geliosistem Sivoraksha V.Yu., Markov V.L., Petrov B.E., Zolotko K.E., Statsenko I.M. Monografiya – Dnipropetrovsk: Vid-vo DNU, 2003. – 132 p.

УДК 662.997

Сиворакша В.Ю., Марков В.Л.

ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ СПОСОБІВ ПІДТРИМАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В ТЕПЛОАКУМУЛЯТОРАХ

Пропонується методика техніко-економічного аналізу способів підтримання температури в теплових акумуляторорах, яка дозволяє оцінити вплив складових зведених річних витрат на їх теплозахист та визначити оптимальну товщину теплоізоляційного шару з вибраним значенням коефіцієнту теплопровідності матеріалу.

УДК 662.6

Товажнянский Л.Л., Гарев А.О., Арсеньева О.П., Перевертайленко А.Ю.

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫХ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ПРИ ИНТЕГРАЦИИ ТЕПЛОНАСОСНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ПРОМЫШЛЕННЫЕ ХОЛОДИЛЬНЫЕ ЦИКЛЫ

Анализ производственных процессов многих отраслей пищевой промышленности Украины [1] указывает на типичность структуры схем энергопотребления предприятий. Тепло к процессам подводится горячими утилитными потоками, а отводится холодными утилитными потоками. Некоторые процессы требуют охлаждения технологических потоков до достаточно низких температур. Это может быть обеспечено только низкотемпературными холодильными утилитами, получаемыми в холодильных установках.

Обобщенная принципиальная схема энергопотребления для ряда пищевых производств (производство молока и молокопродуктов, производство пива, вина, хлебопекарных дрожжей и некоторые другие) приведена на рис. 1.

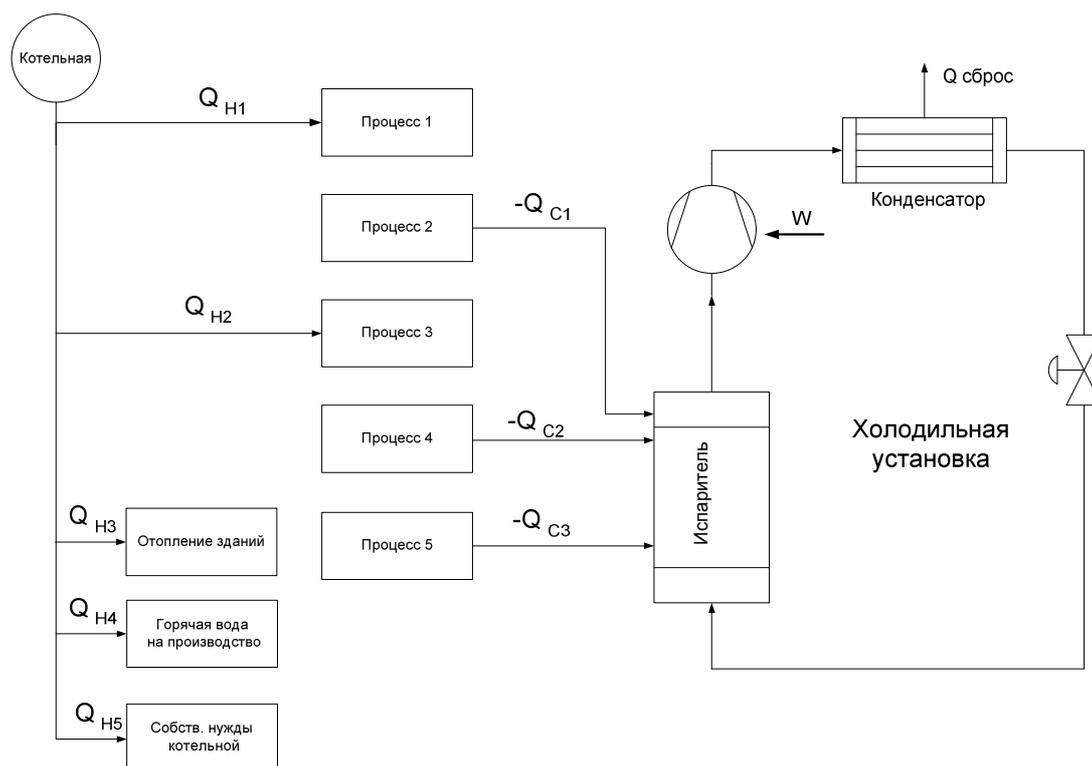


Рисунок 1

Источниками тепловой энергии, подаваемой к производственным процессам паром и/или горячей водой, как правило, является котельная. Часть тепла затрачивается на отопление, приготовление горячей воды на производственные и бытовые нужды и на собственные нужды котельной. Отвод тепла, т.е. охлаждение технологических пото-

ков производится различными холодными утилитами в зависимости от целевых температур технологических потоков. Во многих производствах предприятий пищевой промышленности требуется охлаждение целевых продуктов до температур в диапазоне от 0 до +8 °С (брожение пива, охлаждение термообработанного молока как готового продукта, охлаждение вина для извлечения винного камня, охлаждения смеси в производстве мороженого и т.д.) [1,2]. В качестве холодных утилит в этих случаях используют ледяную воду, рассолы (водные растворы CaCl_2 и NaCl), водные растворы пропиленгликоля и некоторые другие жидкости. Для обеспечения соответствующего температурного потенциала предназначена холодильная установка, в испарителе которой происходит охлаждение утилит испаряющимся хладагентом.

Тепло, снятое в испарителе, передается в конденсаторе охлаждаемой среде: обротной воде или потоку воздуха (см. рис. 1):

$$Q_K = Q_{C1} + Q_{C2} + Q_{C3} + W, \quad (1)$$

где W – работа, затраченная на сжатие паров хладагента в компрессоре.

В существующих холодильных системах предприятий пищевой промышленности Украины это тепло практически не используется, то есть выбрасывается в окружающую среду:

$$Q_K = Q_{\text{сброс}}. \quad (2)$$

Анализ холодильных систем отечественных пищевых производств показывает, что в основном в них в качестве хладагента применяется аммиак (R717). Аммиак обладает благоприятными для его использования как хладагента теплофизическими свойствами и высоким термодинамическим совершенством [3, 4]. Аммиак не разрушает озоновый слой ($\text{ODP}=0$) и не оказывает прямого действия на увеличение парникового эффекта ($\text{GWP}=0$). Резкий характерный запах, присущий аммиаку, и проявляющийся на уровне предельно допустимой концентрации в рабочей зоне является хорошим индикатором утечки [5]. Негативными свойствами аммиака являются токсичность, взрывоопасность и горючесть при концентрациях, указанных в ГОСТ 6221-90Е.

Поток паров аммиака после испарителя поступает в компрессорное отделение, где происходит его сжатие до 10–15 кг/см². Как известно аммиак имеет наиболее существенный перегрев после сжатия среди хладагентов, поэтому температура нагнетания паров аммиака после компрессорного отделения составляет 80–120 °С. Охлаждение перегретых паров аммиака происходит в предконденсаторах (форконденсаторах) или непосредственно в конденсаторах, однако это тепло не используется:

$$Q_{\text{ОХЛ}} + Q_K = Q_{\text{сброс}}, \quad (2a)$$

где $Q_{\text{ОХЛ}}$ – количество тепла, отданное перегретыми парами аммиака при их охлаждении до температуры конденсации; Q_K – количество тепла, отданное парами аммиака при их конденсации.

Результаты обследования аммиачных холодильных установок украинских предприятий пищевой промышленности показали, что фактическое количество сбросного тепла конденсационного отделения является близким по величине к количеству тепла, вырабатываемого котельной, однако, в основном, это тепло с невысоким температурным потенциалом, определяемым температурой конденсации насыщенных паров ам-

миака при давленні сжаття (27–35 °С). Сбросное тепло, отведенное при охлаждении перегретых паров аммиака до температуры конденсации составляет около 15–20 % всего количества тепла после компрессора, однако температурный потенциал этого тепла существенно выше, 80–120 °С.

Утилизация сбросного тепла после компрессорной установки зависит от потребностей технологических процессов, теплоснабжения и горячего водоснабжения в теплоносителе различных температурных потенциалов.

В качестве примера рассмотрим один из сыродельных заводов Харьковской области. Функциональная схема производства твердого сыра представлена на рис. 2.

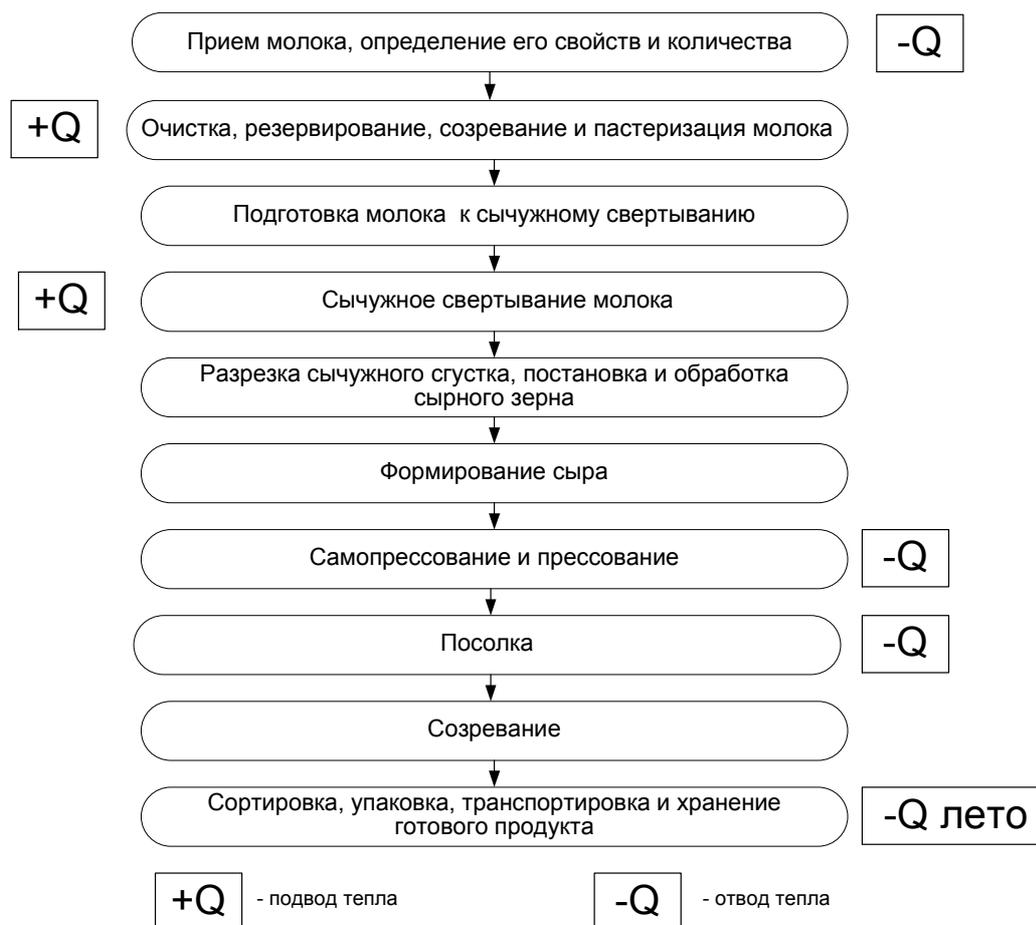


Рисунок 2

Тепло с самым высоким температурным потенциалом требуется для пастеризации молока. В зависимости от качества получаемого молока для пластинчатых пастеризаторов требуемая температура горячей воды для нагрева молока до температуры пастеризации составляет 78–90 °С. Затем идет горячая вода на отопление помещений (50–80 °С), горячая вода для промывки оборудования и другие нужды (50–60 °С), горячая вода на сычужное свертывание молока (28–34 °С) – первое нагревание, 36–58 °С – второе нагревание в зависимости от сорта сыра). В некоторых производствах термическую обработку получаемого молока не производят с целью повышения его сыропригодности [1]. Кроме того, требуется подогрев сырой воды до 30–32 °С перед химводоподготовкой котельной.

Тепловая энергия, которую необходимо отвести от паров аммиака после компрессора (отделение конденсации) не используется. Решить задачу утилизации тепла газообразного аммиака можно с помощью пластинчатого теплообменного аппарата за счет высокой степени рекуперации тепловой энергии в теплообменнике.

Высокоэффективные пластинчатые теплообменники применяются в холодильных технике в качестве испарителей, конденсаторов, маслоохладителей для аммиачных и фреоновых холодильных установок, охладителей молока, пива, воды, масел, газов, химикатов, конденсатоохладителей в системах теплоснабжения, утилизаторов тепла. В холодильных установках молочной промышленности могут использоваться полусварные, сварные, никельпаяные, медно-паяные и разборные пластинчатые теплообменные аппараты.

Полуразборные теплообменники (Рис. 3) применяются как в аммиачных, так и во фреоновых циклах, где можно позволить использовать непосредственное охлаждение конечного продукта за счет надежного разделения теплоносителя и хладагента. В полуразборных пластинчатых теплообменниках сварные каналы чередуются с каналами, герметизированными традиционными прокладками. Хладагент циркулирует по сварным каналам, с ним контактируют только две кольцевые прокладки в отверстиях, соединяющих каналы. Эти прокладки изготавливаются из особо стойких материалов и устанавливаются без клея, что значительно упрощает их замену. Каналы вторичного хладоносителя уплотняются обычными прокладками из эластомера. Двойное уплотнение и пластины из коррозионно-стойкого материала предотвращают смешение циркулирующих сред, обеспечивают отсутствие механических напряжений в сварных швах, а также делают конструкцию гибкой и при этом виброустойчивой.

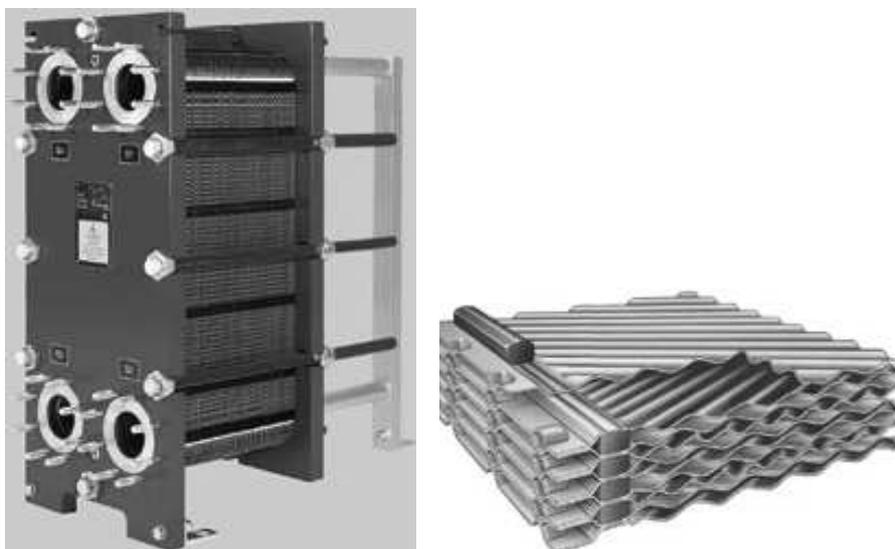


Рисунок 3

Конструктивные особенности пластинчатых теплообменных аппаратов позволяют легко объединить в одном агрегате несколько таких теплообменников, например, из двух полуразборных пластинчатых теплообменников можно скомпоновать один агрегат с функциями “предконденсатор/конденсатор” или “маслоохладитель / конденсатор”(рис. 4). Это позволяет конструировать агрегаты, имеющие одну раму, но выполняющие две функции, что снижает затраты, а также уменьшает габариты оборудования

и место, занимаемое на полу. При необходимости повышения производительности или изменения температурного режима поверхность теплопередачи можно увеличить, установив дополнительные кассеты. Диапазон производительности полуразборных аппаратов от 50 до 8000 кВт[6].

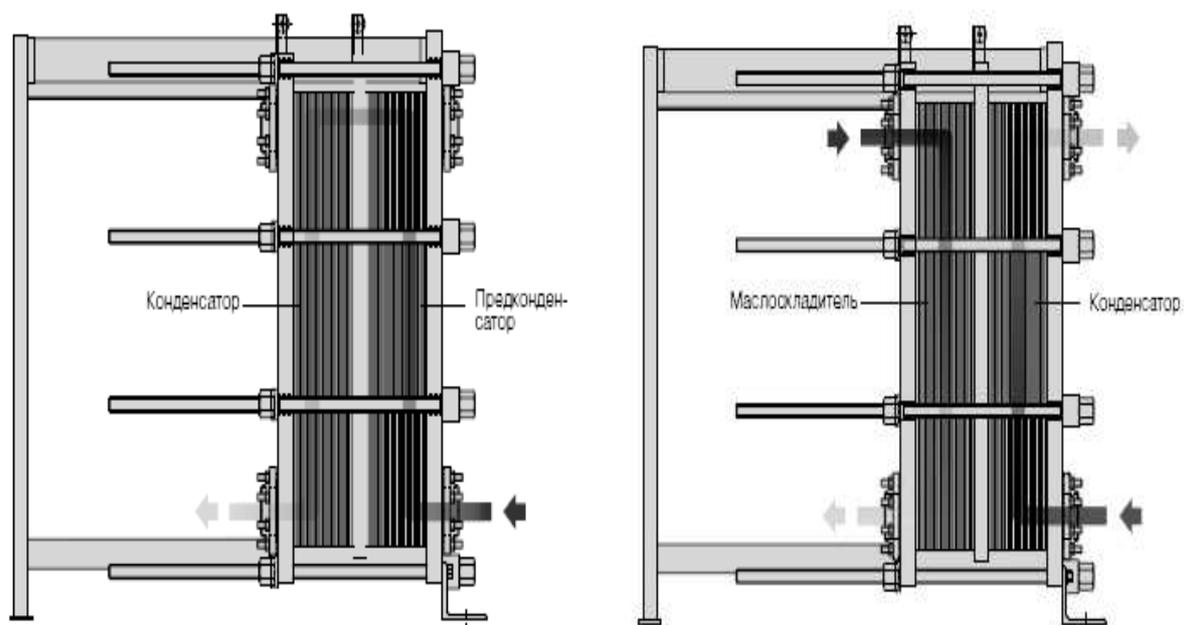


Рисунок 4

Поскольку в пластинчатом теплообменнике среда течет через каналы с гофрированными стенками, а теплообмен осуществляется через тонкие пластины, эффективность теплопередачи чрезвычайно высока. Турбулентность потока препятствует образованию отложений и увеличивает коэффициент теплопередачи, что позволяет эффективно использовать его даже при малой разности между температурой испарения и температурой охлаждаемой воды. Это, в свою очередь, обеспечивает экономию эксплуатационных расходов благодаря высокому холодильному коэффициенту. Применение полуразборных пластинчатых теплообменников дает следующие практические преимущества:

- меньший вес;
- меньшее занимаемое пространство;
- меньшая масса заправляемого хладагента.

Полуразборный пластинчатый теплообменник состоит из попарно сваренных пластин, образующих каналы, ограниченные сваркой, так называемые кассеты.

Характеристики кассет

Существуют три типа каналов, образуемых смежными пластинами и отличающихся углом между гофрами пластин:

L-каналы – предназначены для работы при больших значениях расхода сред и разности температур (температуры охлаждаемой среды на выходе и охлаждающей среды на входе).

М-каналы – предназначены для работы при средних значениях расхода и разности температур.

Н-каналы – предназначены для работы при низких значениях расхода и разности температур.

М-каналы состоят из одной L-пластины и одной Н-пластины.

Для охлаждения агрессивных жидкостей можно использовать пластины из специальных материалов.

Полусварной пластинчатый теплообменник выдерживает резкие перепады температур, а из-за близкого расположения точек крепления в нем не возникают вибрации.

В полусварном пластинчатом теплообменнике не существует цельносварного пакета пластин, так как кассеты уплотняются между собой через эластичные прокладки. Это существенно повышает надежность конструкции пакета при циклических нагрузках, а также при локальном замерзании.

Сварной пластинчатый теплообменник представляет собой пакет гофрированных пластин, соединенных методом лазерной или диффузионной сварки. Гофры на соседних пластинах направлены в противоположные стороны. Этот пакет смонтирован на раме между неподвижной и подвижной плитами, которые скреплены стяжными болтами. Присоединительные патрубки расположены на передней плите и имеют уплотнение, которое приваривается к пакету пластин. Сварные теплообменники применяются практически для работы в более широком диапазоне температур и давлений. Мощность от 50 до 3000 кВт. При выборе сварных теплообменников на позицию конденсатора/предконденсатора необходимо учитывать возможные циклические нагрузки, которые обуславливаются компрессионным оборудованием.

Никельпаяные теплообменники используются преимущественно в аммиачных циклах на небольших мощностях от 1 до 500 кВт.

Медно-паяные теплообменники широко применяются в фреоновых холодильных циклах. Взаимодействующие среды надежно разделены, что позволяет использовать непосредственное охлаждение. Спектр медно-паяных теплообменников значительно расширяется в последнее время за счет создания принципиально новых конструкций.

Пластинчатые теплообменники имеют ряд существенных преимуществ по сравнению с кожухотрубными теплообменниками, которыми оснащены все холодильные системы на Украине, спроектированные 20–30 лет назад [9]:

- маленький внутренний объем, благодаря чему количество хладагента в системе удастся сократить в 10 раз, особенно это актуально для аммиачных систем, т.к.;
- в 3 раза компактнее и более чем в 6 раз легче при одинаковой мощности;
- высокие значения коэффициента теплопередачи, за счет высокой турбулентности и малой толщины пластин (примерно в 2–4 раза выше, чем в кожухотрубных) и, как следствие – компактность, уменьшение монтажных и эксплуатационных затрат, уменьшение энергозатрат;
- эффективное использование тепловой энергии (КПД до 99 %);
- при необходимости есть возможность увеличения поверхности теплопередачи (за счет увеличения количества пластин) без установки дополнительного теплообменного оборудования;
- надежны и просты в установке и не требуют специального фундамента;
- не требуют больших затрат на обслуживание, ремонт. Возможность 100 % очистки разборных пластинчатых теплообменников;

– удобство в експлуатації і довговечність.

Центром інтегрованих енергосберегаючих інтегрованих технологій НТУ «ХПІ» совместно с АО «Содружество-Т» была разработана и изготовлена модульная установка охлаждения газообразного аммиака на базе полусварного пластинчатого теплообменника M10-BWFDR. Основная задача, выполняемая установкой – утилизация теплоты перегретого пара аммиака существующей холодильной установки предприятия[7]. Принципиальная схема установки показана на рис. 5.

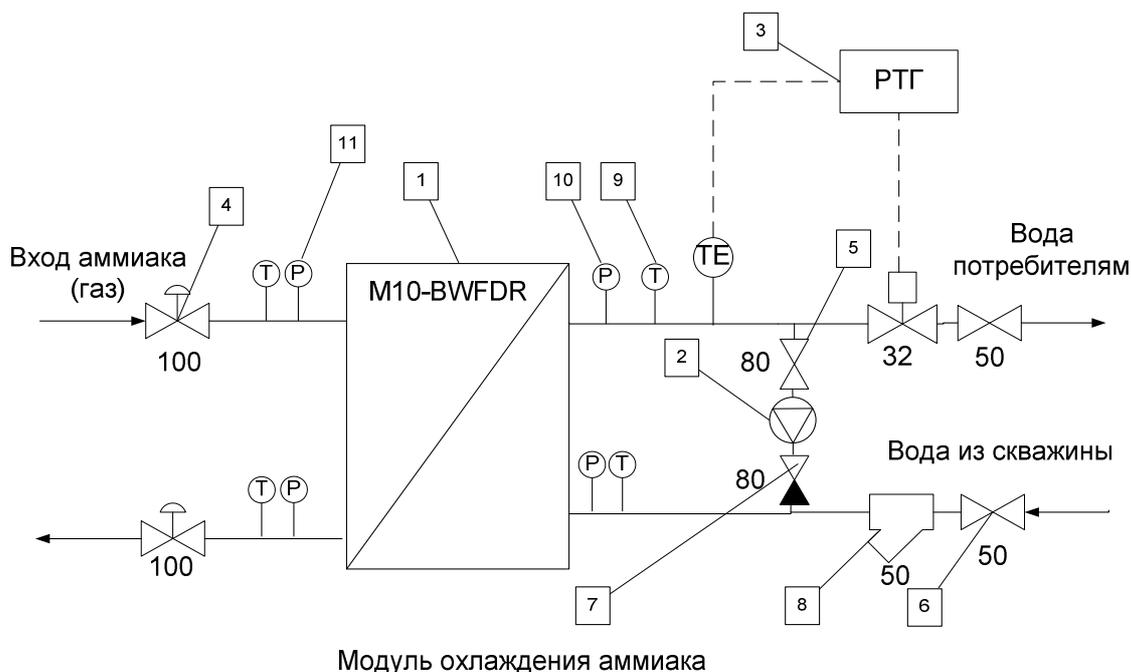


Рисунок 5

Потенциал тепла, которое можно получить при охлаждении аммиака от температуры нагнетания компрессора 100–120 °С до температуры конденсации 28–30 °С составляет около 483 кВт. Температура нагретой воды со скважины может составлять от 50 °С до 75 °С.

Данное тепло можно использовать в трех направлениях:

- приготовление горячей воды для технологических нужд;
- приготовление горячей воды для теплоснабжения и горячего водоснабжения;
- подогрев сырой воды, поступающей на водоподготовку котельной предприятия.

Теплоту в цикле охлаждения можно утилизировать двумя способами: использовать всю теплоту конденсации для нагрева воды (или воздуха) до относительно низкой температуры конденсации, либо нагревать в специальном пароохладителе меньшее количество воды до температуры, близкой к фактической температуре хладагента (в ПТО разность температур может достигать 1–2 °С). Использование энергии конденсации с температурой до 35 °С практически бесполезно для нужд предприятия, поэтому был выбран вариант использования одноцелевой теплонасосной установки охлаждения пара хладагента[10].

В результате расчетов, выполненных с помощью соответствующего программного обеспечения, на позицию охлаждения газообразного аммиака был выбран тепло-

обменный модуль на базе полусварного ПТА М10-BWFDR с толщиной пластины 0,6 мм. В системе автоматики теплообменного модуля предусмотрена установка автоматического регулятора температуры РТГ-32 производства АО "Содружество-Т". Общий вид модуля в сборе приведен на рис. 6.

Мероприятия по модернизации существующей холодильной установки были разработаны таким образом, что монтаж и пусконаладка теплообменного оборудования не должны были влиять на работу аммиачного отделения и котельной, т.е., нет необходимости в остановке производства или изменении технологических режимов работы завода. Совместно с НПП «ХОЛОД» была разработана проектно-конструкторская документация реконструкции компрессорно – конденсаторного отделения сыродельного завода. На рис. 7 показано размещение модульной установки в существующую схему холодильной установки.

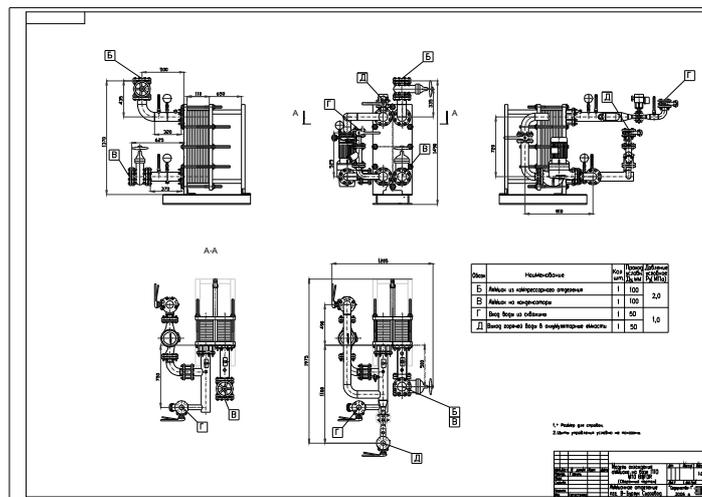


Рисунок 6

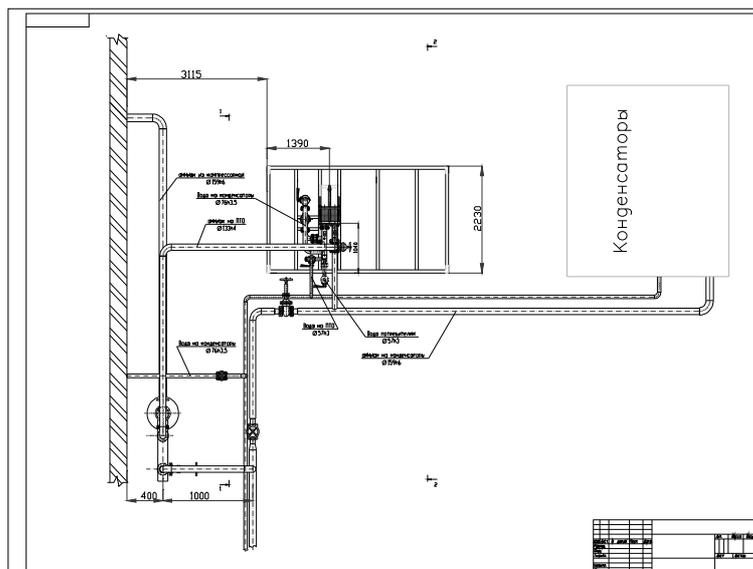


Рисунок 7

Была исследована возможность увеличения теплового потенциала нагреваемого теплоносителя. Это возможно при применении дополнительной компрессии хладагента с целью увеличения температуры конденсации [8]. С помощью программного обеспечения Aspen HYSYS был смоделирован цикл холодильной установки – теплового насоса, где часть потока паров аммиака компримировалась и конденсировалась при давлении 2,7 МПа. (рис. 8).

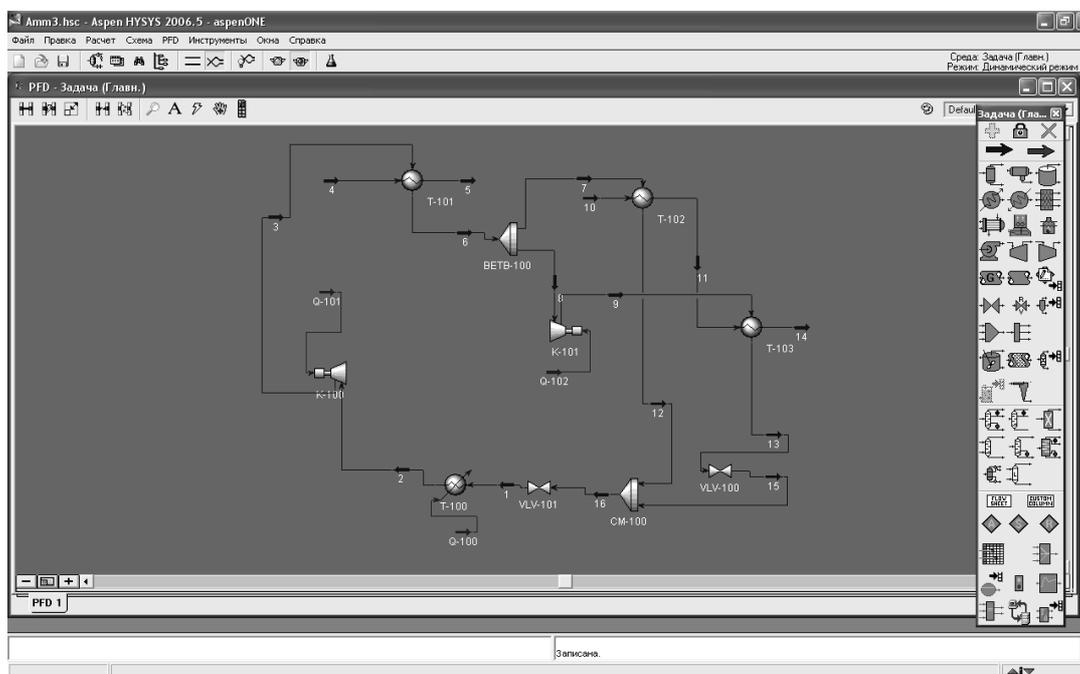


Рисунок 8

Величина тепловой энергии, полученной при конденсации паров аммиака с температурой 61 °С составила 1,150 МВт. Эффективное использование этого тепла позволило бы сократить потребление пара на предприятии до 80 %. Однако это техническое решение связано с увеличением капитальных затрат и необходимости установки нового оборудования, обеспечивающего надежную работу холодильной установки при более высоких значениях давления и температуры хладагента.

Таким образом, можно сделать вывод, что внедрение энергосберегающих мероприятий, в которых используется сбросное тепло холодильной установки является перспективным и актуальным в условиях повышения цен на энергоресурсы. Снижение выработки тепла котельной за счет сжигания топлива позволит уменьшить выбросы продуктов сгорания в окружающую среду. При модернизации холодильных систем предприятий пищевой промышленности, то есть при одновременной выработке тепла и холода, необходимо учитывать индивидуальные технико-экономические факторы для каждого конкретного предприятия, которые будут обуславливать целесообразность внедрения энергосберегающих технологий и оборудования, в том числе и теплонасосных установок.

Литература

1. Товажнянский Л.Л., Бухкало С.И., Капустенко П.А., Хавин Г.Л. Основные

технологии пищевых производств и энергосбережение: Учебн. пособие. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2005.

2. Общая технология пищевых производств. (под ред. Ковальской Л.П.) М, Колос, 1993, 384 с.

3. Овчаренко В.С., Афонский В.Л. Основные аспекты комплексного подхода к расширению применения аммиачного оборудования в холодильной промышленности // Холодильная техника. – 2001.– №7. – С. 13–15.

4. Перельштейн И.И., Парушин Е.Б. Термодинамические и теплофизические свойства рабочих веществ холодильных машин и тепловых насосов.– М.: Легкая и пищевая промышленность, 1984. – 232 с.

5. Братута Э.Г., Шерстюк В.Г. Основные аспекты комплексного подхода к расширению применения аммиака в холодильной промышленности. <http://kholod.valor.ua/articles/30.html>

6. A Technical Reference Manual For Plate Heat Exchangers in Refrigeration & Air conditioning Application By Dr. Claes Stenhede/Alfa Laval AB Fifth edition, February 2nd, 2004. Alfa Laval AB.

7. Tovazhnyansky L., Sherstyuk V., Kapustenko P., Khavin G. Perevertaylenko O., Boldyrev S., Garev A. Plate heat exchangers for environmentally friendly heat pumps. Chemical Engineering Transactions. Volume 12, 2007, p. 213–217.

8. Panno G., Auguanno S., Messineo A., Panno D. Ammonia heat pump for energy saving in food industrial processes: the case of cheese factory. IIR Conference: Ammonia Refrigerating Systems, Renewal and Improvement, Ohrid, 2005.

9. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Хавин Г.Л., Арсеньева О.П. Пластинчатые теплообменники в теплоснабжении: Монография – Харьков: НТУ «ХПИ», 2007.

10. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Ульянов Л.М., Болдырев С.А., Гарев А.О. Интеграция цикла аммиачного охлаждения в теплосеть сыро-молочного завода. // Інтегровані технології та енергозбереження. Харьков. 2005, №2. С. 92–100

Bibliography (transliterated)

1. Tovazhnyanskiy L.L., Buhkalo S.I., Kapustenko P.A., Havin G.L. Osnovnyie tehnologii pischevyih proizvodstv i energosberezhenie: Uchebn. posobie. – Harkov: NTU «HPI», 2005.

2. Obschaya tehnologiya pischevyih proizvodstv. (pod red. Kovalskoy L.P.) M, Kolos, 1993, 384 p.

3. Ovcharenko V.C., Afonskiy V.L. Osnovnyie aspektyi kompleksnogo podhoda k rasshireniyu primeneniya ammiachnogo oborudovaniya v holodilnoy promyishlennosti Holodilnaya tehnika. – 2001.– #7. – p. 13–15.

4. Perelshteyn I.I., Parushin E.B. Termodinamicheskie i teplofizicheskie svoystva rabochih veschestv holodilnyih mashin i teplovyih nasosov.– M.: Legkaya i pischevaya promyishlennost, 1984. – 232 p.

5. Bratuta E.G., Sherstyuk V.G. Osnovnyie aspektyi kompleksnogo podhoda k rasshireniyu primeneniya ammiaka v holodilnoy promyishlennosti. <http://kholod.valor.ua/articles/30.html>

6. A Technical Reference Manual For Plate Heat Exchangers in Refrigeration & Air conditioning Application By Dr. Claes Stenhede/Alfa Laval AB Fifth edition, February 2nd, 2004. Alfa Laval AB.

7. Tovazhnyansky L., Sherstyuk V., Kapustenko P., Khavin G. Perevertaylenko O., Boldyrev S., Garev A. Plate heat exchangers for environmentally friendly heat pumps. Chemical Engineering Transactions. Volume 12, 2007, p. 213–217.

8. Panno G., Aaguanno S., Messineo A., Panno D. Ammonia heat pump for energy saving in food industrial processes: the case of cheese factory. IIR Conference: Ammonia Refrigerating Systems, Renewal and Improvement, Ohrid, 2005.

9. Tovazhnyanskiy L.L., Kapustenko P.A., Havin G.L., Arseneva O.P. Plastinchatye teploobmenniki v teplosnabzhenii: Monografiya – Harkov: NTU «NPI», 2007.

10. Tovazhnyanskiy L.L., Kapustenko P.A., Ulev L.M., Boldyirev S.A., Garev A.O. Integratsiya tsikla ammiachnogo ohlazhdeniya v teploset syiro-molochnogo zavoda. Integrovani tehnologiyi ta energozberezheniya. Harkov. 2005, #2. p. 92–100

УДК 662.6

Товажнянський Л.Л., Гарєв А.О., Арсеньєва О.П., Перевертайленко О.Ю.

**ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ
ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ ПЛАСТИНЧАСТИХ ТЕПЛОБМІННИХ АПАРАТІВ
ПРИ ІНТЕГРАЦІЇ ТЕПЛОНАСОСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
У ПРОМИСЛОВІ ХОЛОДИЛЬНІ ЦИКЛИ**

Було розглянуто питання застосування вискоефективних пластинчатих теплообмінних апаратів, як важливих компонентів промислових холодильних циклів. Розроблено пілотну модульну установку утилізації тепла перегрітих парів аміаку. Одночасне вироблення тепла і холоду дозволяє знизити споживання енергоносіїв та зменшити рівень шкідливих викидів у довкілля.

УДК 62-522

Черкашенко М.В., Фатеев А.Н.

СИНТЕЗ СХЕМ ГИДРОПНЕВМОАГРЕГАТОВ

В последнее время происходит широкое внедрение в промышленность систем гидропневмоагрегатов промышленных роботов, подъемно-транспортных машин, автоматических линий и других сложных машин-автоматов. Активному внедрению пневмоагрегатов в промышленность оказывают относительная простота конструкции и эксплуатации; большой срок службы; надежность работы в низком диапазоне температур в условиях большой влажности, запыленности и радиации окружающей среды; пожаро- и взрывобезопасность и др. Итак, дальнейшее повышение эффективности и качества проектирования пневмоагрегатов приобретает все большее значение.

В настоящей работе авторы приводят новую структурную организацию схем гидропневмоагрегатов дискретно-аналогового управления с использованием дискретной аппаратуры, а в частности распределителей с односторонним управлением (РОУ). Дается метод проектирования многотактных схем дискретно-аналогового управления с использованием РОУ, включающий в себя:

- описание работы системы гидропневмоагрегата;
- структурный синтез гидропневмоагрегата ;
- синтез многотактной схемы управления;
- синтез схемы для отдельного позиционного гидропневмоагрегата.

Структурная организация системы гидро- и пневмоприводов (а.с. СССР №№1166064, 1399533) (рис. 1) базируется на симбиозе агрегатного и элементного подходов к структурному синтезу [1,2].

Эта структура позволяет свести к минимуму число элементов памяти (ЭП) блока памяти, а также число логических элементов, необходимых для реализации схемы.

Множество входных сигналов управляющих автоматов (УА) X состоит из подмножества сигналов X_c выходов узлов U , а также из подмножества X_e влияния от органов ручного управления. Во входном блоке формируется множество условий E , которое состоит из подмножеств Q и T . Каждое условие из подмножества Q функционально зависит от сигналов из множества X , которые определяют соответствующий переход в реализуемом технологическом процессе, и описывается конъюнкцией входных переменных УА, которые принимают единичное значение на данном наборе. Каждое условие из подмножества T зависит не только от указанных выше сигналов, которые вызывают переходы, но и от дополнительных сигналов из подмножества X_c . Набор входных сигналов УА, при котором принимает единичное значение условие из подмножества T , дальше называем удлинненным набором. Рассмотрим такие удлинненные наборы T , которые дополнены минимальным числом переменных.

Блок памяти 5 включает в себя командоаппарат, содержащий последовательно соединенные ЭП (триггеры с отдельными входами), каждый предшествующий ЭП включается сигналом с выхода следующего (следующим за последним ЭП считается первый). В командоаппарате используется один выход ЭП. Исключение составляет случай, если УА содержит два внутренних состояния, а блок памяти содержит один ЭП и при этом используются два его инверсных выхода.

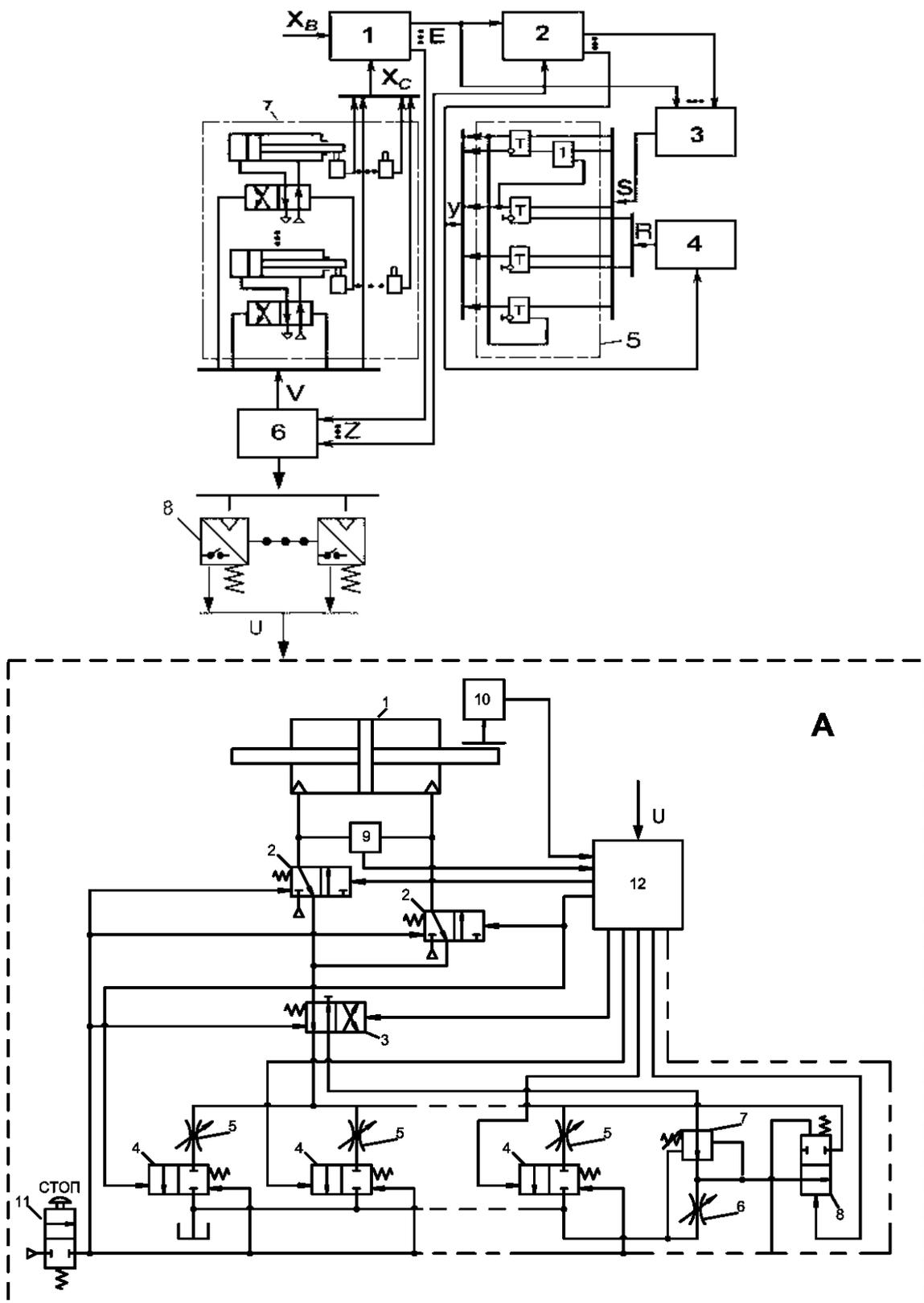


Рисунок 1– Структурная организация гидропневмоагрегатов

Блок совпадений 1 служит для формирования множества V условий, любое из которых функционально зависит от удлинённых некоторыми сигналами из множества Y условий из E .

Блок разделений включений 3 содержит элементы \vee и используется при включении одного ЭП разными наборами из множества U для разных программ работы УА.

Блок разделений включений 4 содержит элементы \vee и используется в случае нескольких программ работы УА, которые приводят к появлению различного числа внутренних состояний для каждой программы.

Выходной блок 6 содержит элементы \vee , а также пневмо- или гидрораспределители, которые посылают рабочую среду в исполнительные устройства 7. В рассмотренной структуре, в отличие от стандартной позиционной структуры, сигналы от входного блока совпадений 1 или от блока совпадений 2 подаются непосредственно в выходной блок разделений 6, тогда как в стандартной структуре в выходной блок подаются сигналы от блока памяти. Это дает возможность использовать две особенности агрегатного и элементного подходов к проектированию систем приводов с УА: командоаппаратный принцип выполнения блока памяти (из агрегатного подхода) и удлинение наборов, которые вызывают переходы (из элементного подхода), с дальнейшим синтезированием минимального блока памяти и формального удлинения наборов, вызывающих переходы. Блок 8 – блок пневмо(гидро)-электрореобразователей.

Блок позиционирования (рис. 1 поз. А) содержит цилиндр 1, два управляемых трехлинейных двухпозиционных распределителя 2, управляемый четырехлинейный двухпозиционный распределитель 3, подпружиненные клапаны 4 и дроссели 5, которые параллельно подключены к линии слива, дроссель 6, редукционный клапан 7, дополнительный подпружиненный клапан 8, датчик 9 перепада давлений в полостях цилиндра и датчик 10 положения штока, сигналы от которых поступают в управляющее устройство 12, кнопка аварийной остановки 11, сигнал, от которой подается на входы управления распределителей 2,3 и клапанов 4,8, возвращая их в исходное положение.

Распределители 2 соединяют полости цилиндра 1 с напорной (сливной) магистралью в зависимости от управляющего сигнала. Все управляющие сигналы, которые подаются на входы распределителей 2,3 и клапанов 4,8 поступают из управляющего устройства 12.

Распределитель 3, установленный в линии слива, обеспечивает два основных режима работы привода и один дополнительный.

При первом режиме работы привода расход рабочей среды будет определяться не только конфигурацией линии слива (набор включенных клапанов 4), но и давлением рабочей среды в полости сброса давления.

Второй режим работы привода обеспечивает компенсацию изменения нагрузки на штоке. В этом режиме на управляющие входы распределителя 3 и клапана 8 подаются сигналы и рабочая среда из полости сброса давления проходит через редукционный клапан 7.

Дополнительный режим работы привода обеспечивает ручное регулирование параметров движения поршня независимо от нагрузки на штоке. В этом случае управляющий сигнал подается на распределитель 3 и рабочая среда проходит через редукционный клапан 7 и дроссель 6 на слив. Параметры движения регулируются настройкой дросселя 6, на котором поддерживается постоянный перепад давления независимо от нагрузки на штоке цилиндра.

В основных режимах работы привода дросселирование рабочей среды осуществляется через выбранную управляющим устройством 12 комбинацию параллельно включенных клапанов 4 (дросселей 5). Выбор управляющей комбинации происходит с учетом информации, поступающей от датчиков 9, 10 и сигнала U .

Эффективные площади дросселей 5 выбираются таким образом, чтобы обеспечить соотношение расходов в параллельных ветвях по формуле

$$f_j = \frac{f_p f_k}{\sqrt{(f_p^2 + f_k^2)(2^{2(n-j)} - 1)}},$$

где f_p и f_k – соответственно эффективные площади распределителей и клапанов; n – число клапанов; j – порядковый номер клапана и соединенного с его входом дросселя.

Конструктивное выполнение привода позволяет осуществлять цифровое регулирование проводимости сливной линии в ее широком диапазоне и тем самым улучшить динамические характеристики привода.

Сокращение числа уравнений достигается двумя путями: уменьшением количества уравнений включений ЭП (минимизация структуры; уменьшением количества уравнений включений и выключений ИУ при неиспользовании ЭП в выходном блоке УА.

Предложенный метод уменьшает количество уравнений, синтезированных вследствие удлинения наборов Q . В связи с этим минимизируется число столбцов МС. Удлинения находим по следующему алгоритму.

Проводим разбиение последовательности входных наборов на блоки [2] таким образом, чтобы в каждом из них не было одинаковых входных наборов и последние наборы соседних блоков не были одинаковыми.

Строим матрицу соответствий МС [2].

Для одинаковых наборов проводим удлинения поднаборов соответствующими сигналами.

Заполняем МС единицами, если поднабор столбца входит в набор строки, и нолями в противном случае.

Выбираем функции для синтеза уравнений.

Для выбранного проверяем временной интервал его действия по столбцу с целью устранения «0», проведя соответствующие удлинения поднаборов. Если устранение не возможно, используем ЭП в выходном звене.

Строим минимизированную МС.

Выписываем уравнения для функций переключения «памяти» и функций выходов. Функцию $z_{\zeta}(\bar{z}_{\zeta})$ формируем дизъюнкцией входных наборов для переходов временного интервала их действия.

При удлинении следует учитывать возможности ЭП внутренней памяти.

Рассмотрим выбор синтезированных функций. В общем случае функции выходов

$$\tilde{Z} = f(X, Y),$$

где \tilde{Z} – функции включения (отключения) выходов; X – множество входных сигналов, Y – множество сигналов с выходов ЭП.

Функции переключения ЭП

$$S = f(X, Y), R = f(Y),$$

В случае двух внутренних состояний

$$S, R = f(X),$$

На рис. 2 представлены возможные схемы включения каналов распределителей с односторонним управлением для пневмоприводов. Для сокращения числа уравнений достаточно синтезировать z_{ζ} или \bar{z}_{ζ} . Основным критерием при выборе функции (z_{ζ} или \bar{z}_{ζ}) является число минимизированных столбцов МС (неиспользованных столбцов), а также тех, которые имеют наибольшее число удлинений.

Следующий критерий, неразрывно связан с основным, – число переходов, которые составляют временной интервал действия. Если временные интервалы для обеих инверсных функций одинаковые, то целесообразно выписать обе функции и выбрать оптимальное решение.

Построение схемы покажем на примере синтеза пневмоагрегата промышленного робота, условие работы системы управления которого представлено в виде графа операций [3] (рис. 3). Таблица взаимодействия входных и исполнительных устройств дана ниже:

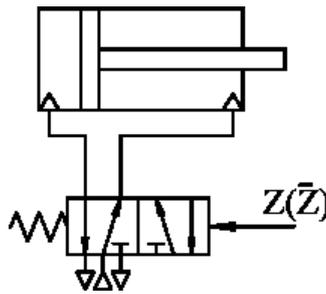


Рисунок 2 – Схема подключения исполнительных устройств

Таблица

Исполнительные устройства		Входные сигналы	
Обозначение	Наименование	Исходное положение	Конечное положение
Ц1	Захват	-	X3
Ц2	Выдвижение руки	X4	X5
Ц3	Поворот руки	X6	X7
X1 – кнопка пуска			

Под графом операций понимают ориентированный граф, вершины А которого однозначно отвечают операциям технологического процесса, а дуги – переходам от одних операций к другим. На дугах графа операций записываются секвенции вида $Q_{\gamma} \mapsto z_{\nu}$ (т.е. формулы типа "если справедливо условие Q_{γ} , то справедливо условие z_{ν} "). Здесь Q_{γ} представляет собой входной набор УА, который содержит выходы x_c узлов, воздействия x_b от органов ручного управления и др. Набор Q_{γ} переводит УА от

одних операций к другим. Выходной набор УА z_v содержит входы узлов, которые изменили свои значения на данном переходе.

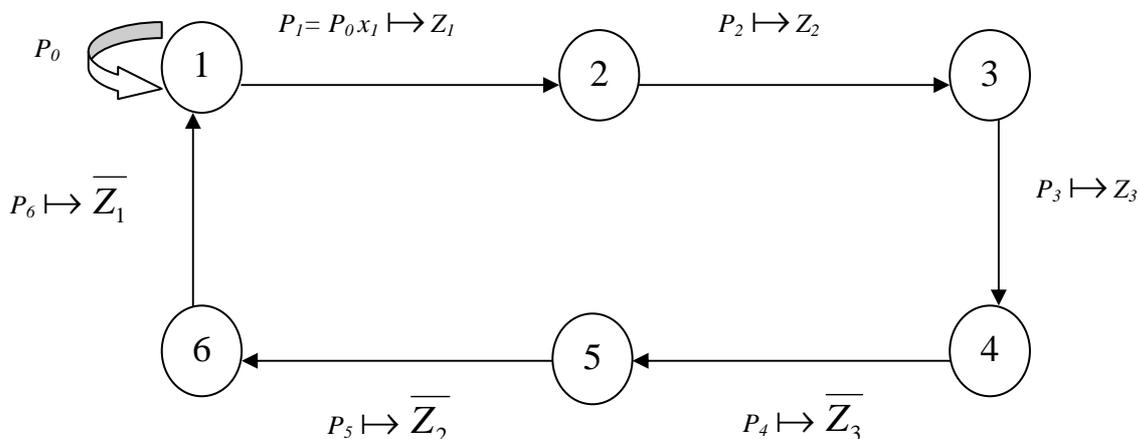


Рисунок 3 – Граф операций

Здесь $P_0 = \emptyset, x_4 x_6 y$; $P_1 = x_1, x_4 x_6$; $P_2 = x_3, x_4 x_6$; $P_3 = x_5, x_3 x_6$; $P_4 = x_5, x_3 x_6$; $P_5 = x_7, x_5$; $P_6 = x_6, x_3 x_5$; $P_7 = x_4, x_3 x_6$

Матрица соответствия имеет вид:

	x_1	$x_3 y$	$x_5 y$	x_7	$x_6 \bar{y}$	$x_4 \bar{y}$	
$\emptyset, x_4 x_6 \mapsto \emptyset$	0	0	0	0	1	1	\bar{y}
$x_1, x_4 x_6 \mapsto z_1 S$	1	0	0	0	1	0	y
$* x_3, x_4 x_6 \mapsto z_2$	0	1	0	0	0	0	
$** x_5, x_3 x_6 \mapsto z_3$	0	1	1	0	0	0	y
$x_7, x_5 \mapsto \bar{z}_3 R$	0	0	0	1	0	0	
$** x_6, x_3 x_5 \mapsto \bar{z}_2$	0	0	0	0	1	0	\bar{y}
$* x_4, x_3 x_6 \mapsto \bar{z}_1$	0	0	0	0	1	1	y

Сканируя столбцы выбираем функции выходов системы управления. Для этого на временном интервале действия z_ζ (\bar{z}_ζ) находим «0», которые прерывают интервал и проводим их устранение путем изменения поднаборов Q . Так для функции Z_1 (первый столбец) имеем «0» на пересечении со столбцом с выходом \bar{Z}_2 при $\bar{y} = 1$. Что не дает устранить преждевременное срабатывание $\bar{Z}_1 = 1$.

Если включать «память» в переходе из первой вершины во вторую, то ноли, стоящие во временном интервале действия $y = 1$ не влияют на временной интервал действия Z_1 . Таким образом, для исполнительного устройства Ц1 выбираем функцию \bar{Z}_1 . Здесь в столбце $x_4 \bar{y}$ на пересечении со строкой для $Z_1 = 1$ устраняется при переключении «памяти». Для исполнительного устройства Ц2 выбираем «память». Так как

устранение «0» не возможно. Кроме того, Ц2 требует позиционирования руки работа, для чего принимаем схему позиционирования с программным управлением (рис. 1, поз. А). Для исполнительного устройства Ц3 выбираем Z_3 .

Минимизированная матрица МС имеет вид

	x_3y	x_5y	$\overline{x_6y}$	$\overline{x_4y}$	
$\emptyset, x_4x_6 \mapsto \emptyset$	0	0	1	1	\overline{y}
$x_1, x_4x_6 \mapsto z_1 S$	0	0	1	0	\overline{y}
$*x_3, x_4x_6 \mapsto z_2$	1	0	0	0	
$**x_5, x_3x_6 \mapsto z_3$	1	1	0	0	y
$x_7, x_5 \mapsto \overline{z_3} R$	0	0	0	0	
$**x_6, x_3x_5 \mapsto \overline{z_2}$	0	0	1	0	\overline{y}
$*x_4, x_3x_6 \mapsto \overline{z_1}$	0	0	1	1	\overline{y}

Синтезируя уравнения, получаем

$$S = x_1; R = x_7; \overline{z_1} = \overline{yx_4}; z_2 = x_3y; \overline{z_2} = \overline{x_6y}; z_3 = x_5y.$$

Логические уравнения для этого случая значительно более простые, чем для выходного блока, который содержит ЭП. Это говорит о том, что использование предложенного алгоритма приводит к значительному упрощению логических уравнений. Пневмосхема управления промышленного робота, синтезированные с учетом типа пневмораспределителей выходного блока, приведена на рис. 4.

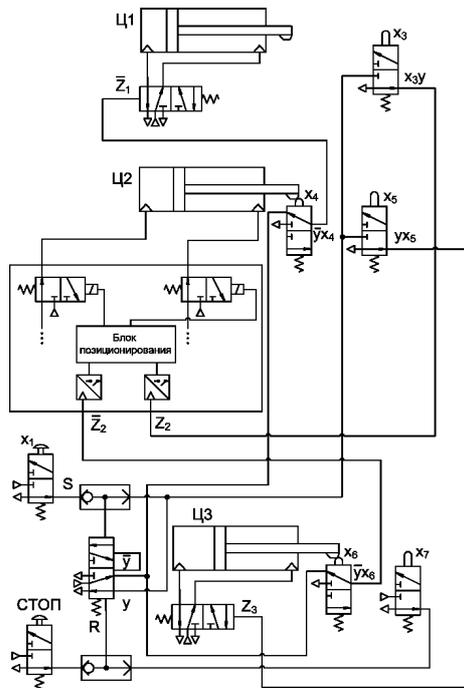


Рисунок 4 – Схема пневмоагрегата промышленного робота

Для построения схемы целесообразно воспользоваться методом безраздельной декомпозиции уравнений, приведенном в [4].

Для синтеза части схемы управления позиционного привода выдвижения руки робота разработаны специальные алгоритмы программного управления для микропроцессорного контроллера.

Таким образом, предложенная структура и метод проектирования, построенный на принципах дискретного управления, имеют несомненные преимущества, так как синтезированные схемы содержат простейшую дискретную гидропневмоаппаратуру, и не требуют использования сложных пропорциональных и следящих гидропневмоаппаратов.

Литература

1. Черкашенко М.В и др. Синтез дискретных систем управления промышленных роботов // Автоматика и телемеханика. – 1981. – № 5. – С. 148–153. (Printed of USA "Automation and Remote Control").
2. Черкашенко М.В. Метод логического проектирования дискретных систем управления машин–автоматов с пневмо- или гидроприводом. Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления. М.: Машиностроение, 1981. Вып. 8.– С.181–189.
3. Юдицкий С.А. К вопросу описания и синтеза дискретных систем промышленной автоматики // Техническая кибернетика.– 1976.– №1.– С. 131–141.
4. Cherkashenko M.V. Synthesis of schemes of hydraulic and pneumatic automation. 5 International Fluid Power Symposium in Aachen, Germany. March. 2006. Volume 1–Worshop.– P. 147–154.

Bibliography (transliterated)

1. Cherkashenko M.V i dr. Sintez diskretnyih sistem upravleniya promyishlennyih robotov Avtomatika i telemehaniка. – 1981. – # 5. – p. 148–153. (Printed of USA "Automation and Remote Control").
 2. Cherkashenko M.V. Metod logicheskogo proektirovaniya diskretnyih sistem upravleniya mashin–avtomatov s pnevmo- ili gidroprivodom. Pnevmatika i gidravliка. Privody i sistemy upravleniya. M.: Mashinostroenie, 1981. Vyip. 8.– p.181–189.
 3. Yuditskiy S.A. K voprosu opisaniya i sinteza diskretnyih sistem promyish-lennoy avtomatiki Tehnicheskaya kibernetika.– 1976.– #1.– p. 131–141.
 4. Cherkashenko M.V. Synthesis of schemes of hydraulic and pneumatic automation. 5 International Fluid Power Symposium in Aachen, Germany. March. 2006. Volume 1–Worshop.– P. 147–154.
- УДК 62-522

Черкашенко М.В., Фатеев А.Н.

СИНТЕЗ СХЕМ ГІДРОПНЕВМОАГРЕГАТІВ

Приводиться нова структурна організація схем гідропневмоагрегатів дискретно-аналогового управління. Дається метод проектування многотактних схем з використанням дискретних апаратів, а, зокрема, розподільників з однобічним управлінням.

УДК 678.5

Рассоха А.Н., Черкашина А.Н.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРИРОДЫ И КОНЦЕНТРАЦИИ ИНГРЕДИЕНТОВ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ФУРАНО-ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Композиционные материалы на основе фурано-эпоксидных реакционноспособных олигомеров (PCO типа ФАЭД и ФЭО), структурированные аминными и аминифенольными отвердителями рекомендуется использовать в качестве конструкционных и защитных систем в различных отраслях промышленности.

Представляло интерес исследовать влияние природы и соотношения ингредиентов композиции (PCO, модификаторы) на процесс формирования структуры и свойства разработанных фурано-эпоксидных связующих и полимерных композиционных материалов на их основе.

В качестве объектов исследования использовали фурано-эпоксидный PCO, представляющий собой продукт термомеханического совмещения фурфуролацетонного мономера (марки ФАМ или ФА) и эпоксидианового олигомера ЭО (марки ЭД-16, ЭД-20, ЭД-22) при различном соотношении компонентов. Модификаторами служили: каменноугольная смола (КУС), низкомолекулярный полиизобутилен (НМПИБ), госсиполовая смола (ГС), битум (БН), фурфурамид (ФФ). Структурирующими агентами выбраны аминный отвердитель полиэтиленполиамин (ПЭПА) и аминифенольный – марки Агидол АФ-2 в количествах обеспечивающих максимальную прочность исследованных фурано-эпоксидных материалов.

С целью выбора оптимальных параметров технологического процесса (температура, время) совмещения фурановых и эпоксидных ингредиентов для получения однородного PCO представляло интерес в рамках концепции неравновесной термодинамики оценить время, в течение которого при определенной температуре устанавливается стационарная скорость диффузии ЭО в фурановом компоненте системы.

При этом оценивалось состояние термодинамического равновесия, реализуемое в физически бесконечно малых частях неравновесной в целом системы (так называемое локальное равновесие) [1]. Для перехода к макроскопическим параметрам анализируемого процесса совмещения компонентов PCO необходимо учитывать функции пространственных координат и времени, то есть флуктуации состава в различных точках объема системы в течение времени совмещения ингредиентов смеси.

Исходными данными для анализа служили коэффициент взаимодиффузии ЭО в системе D_v ($\text{м}^2/\text{с}$), молекулярная масса эпоксидного олигомера M_i (г/моль), и температура процесса совмещения T (К).

При анализе учитывался тот факт, что в рассматриваемой бинарной системе (ФАМ + ЭО) на коэффициент диффузии в общем случае могут оказывать влияние внешние факторы: температура, давление и состав системы [2]. С нашей точки зрения наиболее важным для решения поставленной задачи является температура. Коэффициент взаимодиффузии ЭО в системе D_v в диапазоне рассматриваемых температур и концентраций составляет значения порядка 10^{-11} – 10^{-12} $\text{м}^2/\text{с}$ [3]. Молекулярная масса выбранных ЭО (ЭД-22, ЭД-20, ЭД-16) находится в пределах менее 300–540 г/моль, технологически обоснованная температура - 20–80 °С (293–353 К).

Исходя из второго закона Ньютона $f = m \cdot a$ с учетом двух действующих при совмещении ингредиентов сил: диффузионной силы Y_i и силы трения f_i , имеем соотношение:

$$Y_i + f_i = m \cdot \frac{dw_i}{dt}$$

При этом сила трения связана со скоростью движения частицы (молекулы ЭО) w_i зависимостью $w_i = -B_i \cdot f_i$, где B_i – подвижность частицы. Подставив это соотношение в предыдущее и интегрируя с учетом начальных условий $t = 0$ и $w_i = 0$ находим

$$w_i = Y_i \cdot B_i \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{B_i m_i}\right) \right].$$

При $t \rightarrow 0$, разлагая экспоненту в ряд и ограничиваясь двумя первыми членами, получаем $w_i \approx \frac{Y_i \cdot t}{m_i}$, т.е. при малых временах процесса совмещения ЭО и ФАМ движение молекул ЭО равноускоренное, но при $t \rightarrow \infty$ очевидно, что $w_i = Y_i \cdot B_i$, т.е. движение частиц равномерное. На основании этого, представляется возможным оценить время, за которое скорость диффузии молекул ЭО в системе станет равной порядка 99 % от своего стационарного значения, т.е. $w_i = 0,99 \cdot Y_i \cdot B_i$. В результате очевидных преобразований имеем формулу $t = m_i \cdot B_i \cdot \ln 10^2$. Подвижность связана с коэффициентом диффузии D_v соотношением $D_{vi} = B_i \cdot k \cdot T$. (k – постоянная Больцмана).

Тогда $t = \frac{M_i D_{vi} \ln 10^2}{RT}$, где $M_i = m_i N_A$, $R = k N_A$ (N_A – число Авогадро).

Данные оценки представлены в табл. 1

Таблица 1

Эпоксидный олигомер	Подвижность $B_i \cdot 10^9$ (с/кг) при T (°C)		Время $t \cdot 10^{13}$ (с) при T (°C)	
	20	80	20	80
ЭД-16	<u>2,47</u>	<u>2,05</u>	<u>10,21</u>	<u>8,47</u>
	24,7	20,5	1,02	0,85
ЭД-20	<u>2,47</u>	<u>2,05</u>	<u>7,56</u>	<u>6,27</u>
	24,7	20,5	0,76	0,63
ЭД-22	<u>2,47</u>	<u>2,05</u>	<u>5,67</u>	<u>4,71</u>
	24,7	20,5	0,57	0,47

Примечание: значение коэффициента взаимодиффузии D_v в числителе – 10^{-11} м²/с, в знаменателе – 10^{-12} м²/с.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что стационарная скорость движения частиц (молекул ЭО) под действием диффузионной силы устанавливается практически мгновенно.

Поэтому при получении ФАЭД совмещение мономера ФАМ (или ФА) с ЭО целесообразно осуществлять при температурах 40–60 °C в течение непродолжительного промежутка времени – до 0,5 ч. При этом получается однородный продукт без видимых

структурних аномалій, фізико-хімічні та технологічні властивості (щільність, в'язкість і др.) якого практично однаково в усіх точках об'єму системи.

При формуванні однорідної, гомогенної (однофазної) термодинамічно стійкої суміші РСО на основі ФАЭД і модифікаторів спостерігається зменшення ізобарно-ізотермічного потенціалу (енергії Гіббса) ΔG при суміщенні інгредієнтів [4]:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S < 0.$$

Ентальпія змішування ΔH при відсутності специфічних взаємодій між компонентами ФАЭД і модифікаторами (сольватація, комплексотворення і др.) оцінюється за формулою [4,5]:

$$\Delta H = V_m \cdot (\delta_1 - \delta_2)^2 \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2$$

де V_m – молярний об'єм суміші інгредієнтів, δ_i – параметр розчинності i -го інгредієнта; φ_i – молярні частки.

З вищевикладеного випливає, що розчинення модифікаторів в компонентах ФАЭД (мономер ФАМ, ФА і ЭО) можливо при приблизно рівності параметрів розчинності модифікатора і компонентів зв'язуючого σ_s .

При цьому оптимальну молекулярну масу модифікатора M_m з урахуванням температури кипіння $T_{\dot{e}}$, щільності ρ_m модифікатора, а також константи $k = 89,12 \text{ Дж/моль К}$ можна оцінити за співвідношенням [5]:

$$M_m = \frac{k \cdot T_{\dot{e}} \cdot \rho_m}{\sigma_s^2}$$

Для оцінки M_m приймаємо для модифікаторів температурний діапазон кипіння 200–300 °С, щільність 800–1200 кг/м³. Параметр розчинності σ_s для мономера ФАМ і ЭО оцінювали за адитивною схемою.

Оптимальна молекулярна маса M_m , при якій модифікатор повністю розчиняється в зв'язуючому з утворенням однофазного складу, становить для мономера ФАМ 49–89 г/моль, для ЭО (в разі ЭД-20) 84–153 г/моль.

Отримані дані суттєво нижче середніх молекулярних мас досліджуваних модифікаторів зв'язуючих на основі ФАЭД і ФЭО (каменноугольної смоли – 800–1000 г/моль, бітума – 1600–1800 г/моль, госсиполової смоли ≈ 1000 г/моль, низькомолекулярного поліізобутилена – 1050–1200 г/моль, фурфуріамада – 267 г/моль). Ймовірно, в фурано-епоксидному зв'язуючому можуть частково розчинятися тільки низькомолекулярні фракції (в діапазоні оптимальних M_m) досліджуваних модифікаторів.

Таким чином, з позицій термодинамічного підходу слід передбачати, що при введенні в склад ФАЭД або ФЭО вибраних модифікуючих агентів утворюється мікрогетерогенна структура полімерної матриці.

Топологічну структуру густосшитих фурано-епоксидних полімерів можна розглядати як неперервну тривимірну структуру, що складається з локальних згущень (густосшитих «ядер») і розріджених дефектних зон, концентруючих топо-

логические дефекты [6,7]. Густосшитые участки этой структуры проявляются в виде глобулярных агрегатов с большой плотностью молекулярной упаковки.

С целью направленного регулирования свойств фурано-эпоксидных полимеров и композитов на их основе целесообразно проводить межструктурную модификацию выбранными материалами (КУС, ГС, НМПИБ, БН), в результате которой добавки-модификаторы оказываются вытесненными из более плотных глобул в рыхло упакованные дефектные зоны, квазиадсорбируясь на поверхности густосшитых «ядер». При этом общая структурная организация фурано-эпоксидного полимера практически не изменяется.

Минимальное количество модификатора C_m (масс. %), необходимого для формирования на поверхности глобулярного образования («ядра») с эффективным диаметром d (мкм) мономолекулярного слоя, можно ориентировочно оценить из соотношения [6]: $d = 0,2/C_i$.

Учитывая, что морфологический анализ композиций ФАЭД-20 – ФАЭД-40 показал преимущественное наличие глобул со среднеэффективным диаметром $d = 0,015 – 0,040$ мкм и незначительное количество сферических структурных элементов $\approx 1,5–2,0$ мкм, то количество модификатора (моно-, ди-, тримолекулярный слой) составляет (табл. 2):

Таблица 2

Диаметр d , мкм	Количество модификатора C_m (масс. %) при толщине слоя (в молекулах)		
	Моно	Ди	Три
0,015	13,3	26,6	39,9
0,040	5,0	10,0	15,0
1,5	0,13	0,26	0,39
2,0	0,1	0,2	0,3

Таким образом, диапазон оптимальных концентраций модифицирующего агента фурано-эпоксидных полимеров в случае мономолекулярного слоя находится в интервале 5–13,3 масс. %. Введение большего количества модификаторов (вариант ди- и тримолекулярной квазиадсорбции), как правило, приводит к трансформированию структуры фурано-эпоксидных полимеров и, как правило, к ухудшению комплекса прочностных и эксплуатационных свойств.

По результатам механических испытаний разработанных фурано-эпоксидных материалов при известном коэффициенте Пуассона μ можно оценить (табл. 3) величины фрактальной (хаусдорфовой) размерности d_H структуры материала, фрактальной размерности поверхности разрушения для хрупкого $d_{\delta}^{\ddot{\delta}}$ и вязкого $d_{\delta}^{\dot{\delta}\dot{\delta}}$ типов разрушения, размерности областей избыточной локализации энергии D_f , доли флуктуационного свободного объема f по известным соотношениям [8,9]:

$$d_H = (d-1) \cdot (1+\mu); \quad d_{\delta}^{\ddot{\delta}} = \frac{10 \cdot (1+\mu)}{7-3\mu}; \quad d_{\delta}^{\dot{\delta}\dot{\delta}} = \frac{2 \cdot (1+4\mu)}{1+2\mu}; \quad D_f = \frac{2 \cdot (1-\mu)}{1-2\mu}; \quad f = K \frac{1+\mu}{1-2\mu},$$

где d – размерность евклидова пространства, равная в данном случае 3; K – константа, принятая равной примерно 0,012 [9].

Таблиця 3

Матеріал	M	d_H	$d_{\delta}^{\delta\delta}$	$d_{\delta}^{\delta\delta\zeta}$	D_f	f
ФАЭД-50(20)+ПЭПА	0,30	2,60	2,13	2,75	3,50	0,039
ФАЭД-50(20)+АФ-2	0,30	2,60	2,13	2,75	3,50	0,039
ФАЭД-50(20)+КУС+ПЭПА	0,35	2,70	2,27	2,82	4,33	0,054
ФАЭД-50(20)+КУС+АФ-2	0,33	2,66	2,21	2,79	3,72	0,047
ФАЭД-50(20)+БН+ПЭПА	0,34	2,68	2,24	2,81	4,00	0,052
ФАЭД-50(20)+БН+АФ-2	0,32	2,64	2,18	2,78	3,78	0,044
ФАЭД-50(20)+ГС+ПЭПА	0,35	2,70	2,27	2,82	4,33	0,054
ФАЭД-50(20)+ГС+АФ-2	0,33	2,66	2,21	2,79	3,72	0,047
ФАЭД-50(20)+НМПИБ+ПЭПА	0,36	2,72	2,30	2,84	4,57	0,058
ФАЭД-50(20)+НМПИБ+АФ-2	0,33	2,66	2,21	2,79	3,72	0,047

Анализ данных, приведенных в табл. 3 свидетельствует о фрактальности структуры исходных и модифицированных (КУС, БН, ГС, НМПИБ) фурано-эпоксидных полимеров ($d_H = 2,6-2,7$). Структурирующий агент (ПЭПА, Агидол АФ-2) существенного влияния на d_H не оказывают.

Поверхность разрушения исследованных образцов при низких (не более 40 °С) и повышенных (более 60 °С) температурах эксплуатации характеризуется незначительным уровнем фрактальности $d_{\delta}^{\delta\delta} = 2,13-2,3$ и $d_{\delta}^{\delta\delta\zeta} = 2,75-2,84$. При этом в случае хрупкого разрушения поверхность образца в зоне разрушения практически плоская, а при вязком – имеет высокую неоднородность структуры, что подтверждается экспериментальными данными фрактографического анализа.

Размерность областей локализации избыточной энергии D_f , в первом приближении равная показателю статистической гибкости полимерной цепи C_{∞} , находится в пределах 3,5–4,57. Это позволяет оценить величину вектора Бюргера b [10]: 33,8–38,6 нм.

Свободный флуктуационный объем f , характеризующий степень неупорядоченности структуры полимерной матрицы и скорость молекулярных перегруппировок, для исследованных фурано-эпоксидных композиций составляет 0,039–0,058.

При этом анализ структуры изучаемых систем в рамках кластерной модели [11] показывает, что постоянная компонента флуктуационного объема $f_{i\hat{i}\hat{n}\hat{o}}$, связанная с областями узлов химической шивки равна 0,024 [12], а переменная составляющая $f_{i\hat{a}\hat{o}}$, характеризующая кластерную сетку физических зацеплений и обуславливающая упругость материала, его локальную пластичность, существенно зависит от химической природы модификаторов. Для исходных фурано-эпоксидных полимеров отношение $f / f_{i\hat{a}\hat{o}}$ равно 1,625, а при введении модификаторов увеличивается до 1,958–2,417.

Изменение энтропии структуры исследованных материалов ΔS , обусловленное относительным флуктуационным объемом f , определенное согласно [10] по соотношению $\Delta S = (3-5)Rf \ln f$, для немодифицированных ФАЭД равно – 3,15–5,27 Дж/кг моль, а в случае структурной модификации находится в интервале – 3,66–6,86 Дж/кг моль.

Таким образом, проведенный комплексный анализ влияния химической природы и концентрации ингредиентов связующего на структуру и свойства фурано-

эпоксидных материалов позволяет сделать вывод о том, что ФАЭД на стадии совмещения ФАМ (ФА) и ЭО имеет гомогенную однофазную структуру, а в случае введения в систему исследованных модификаторов наблюдается микрофазовое расслоение, усиливающееся при структурировании РСО. При механическом разрушении фураноэпоксидных композитов поверхность разрыва имеет вид фрактальной структурой, более четко выраженной в области повышенных температур.

Литература

1. Агеев Е.П. Неравновесная термодинамика в вопросах и ответах. Изд.2-е, испр. и доп. – М.:МЦНПО, 2005.– 160 с.
2. Чалых А.Е. Диффузия в полимерных системах. – М.: Химия, 1987.– 312 с.
3. Чалых А.Е., Шмалий О.Н., Бухтев А.Е. Взаимодиффузия в эпоксидных олигомерах // Высокомолекулярные соединения.– Т.А44.– № 11, 2002.– С. 1985–1989.
4. Полимерные смеси Т.1 и 2 / Под ред. Д.Пола и С. Ньюмена.– Пер. с англ., М.: Мир, 1981.– 550 и 543 с.
5. Гарькина И.А. Модификаторы для серных композитов специального назначения // Химия и химическая технология.– 2008.– Т.51.– Вып. 5.– С. 70–75.
6. Папков С.П. Физико-химические основы переработки растворов полимеров.– М.: Химия, 1971.– 364 с.– библиогр. С. 359
7. Хозин В.Г., Мурафа А.В., Череватский А.М. Принципы усиления эпоксидных связующих // Механика композитных материалов.– 1987.– № 1.– С. 130–135.
8. Козлов Г.В., Яновский Ю.Г., Карнет Ю.Н. Обобщенная фрактальная модель процесса текучести аморфных стеклообразных полимеров // Механика композиционных материалов и конструкций.– 2008.–Т.14.– № 2.– С.174–187.
9. Машуков Н.И., Васнецова О.А., Маламатов А.Х., Козлов Г.В. Полимерные покрытия на основе полиэтилена с пониженной газопроницаемостью // Лакокрасочные материалы.
10. Сандитов Д.С., Козлов Г.В. О природе корреляций между упругими модулями и температурой стеклования аморфных полимеров // Физика и химия стекла.– 1993.–Т.19.– №4.– С. 593–601.
11. Козлов Г.В. Новиков В.У., Заиков Г.Е. Функциональность кластеров в эпоксиполимерах // Пластические массы.– 2002.– №5.– С. 33–34.
12. Белоусов В.Н., Белошенко В.А., Козлов Г.В., Липатов Ю.С. Флуктуационный объем и структура полимеров // Украинский химический журнал.– 1996.– Т.62.– №1.– С. 62–65.

Bibliography (transliterated)

1. Ageev E.P. Neravnovesnaya termodinamika v voprosah i otvetah. Izd.2-e, ispr. i dop. – М.:MTsNPO, 2005.– 160 p.
2. Chalyih A.E. Diffuziya v polimernyih sistemah. – М.: Himiya, 1987.– 312 p.
3. Chalyih A.E., Shmaliy O.N., Buhtev A.E. Vzaimodiffuziya v epoksidnyih oligomerah Vvisokomolekulyarnyie soedineniya.– Т.А44.– # 11, 2002.– p. 1985–1989.
4. Polimernyie smesi T.1 i 2 / Pod red. D.Pola i S. Nyumena.– Per. s angl., М.: Mir, 1981.– 550 i 543 p.
5. Garkina I.A. Modifikatoryi dlya sernyih kompozitov spetsialnogo naznache-niya Himiya i himicheskaya tehnologiya.– 2008.– Т.51.– Vyip. 5.– p. 70–75.

6 Papkov S.P. Fiziko-himicheskie osnovy pererabotki rastvorov polimerov.- M.: Himiya, 1971.– 364 p.– bibliogr. p. 359

7. Hozin V.G., Murafa A.V., Cherevatskiy A.M. Printsipy usileniya epoksidnyih svyazuyuschih Mehanika kompozitnyih materialov.– 1987.– # 1.– p. 130–135.

8. Kozlov G.V., Yanovskiy Yu.G., Karnet Yu.N. Obobschennaya fraktalnaya model protsessa tekuchesti amorfnyih stekloobraznyih polimerov Mehanika kompozitsion-nyih materialov i konstruktsiy.– 2008.–Т.14,– # 2.– p.174–187.

9. Mashukov N.I., Vasnetsova O.A., Malamatov A.H., Kozlov G.V. Polimernyye pokryitiya na osnove polietilena s ponizhennoy gazopronitsaemostyu Lakokrasochnyye materialy.

10. Sanditov D.S., Kozlov G.V. O prirode korrelyatsiy mezhdru uprugimi modulyami i temperaturoy steklovaniya amorfnyih polimerov Fizika i himiya stekla.– 1993.–Т.19,– #4.– p. 593–601.

11. Kozlov G.V. Novikov V.U., Zaikov G.E. Funktsionalnost klasterov v epoksipolimerah Plasticheskie massyi.– 2002.– #5.– p. 33–34.

12. Belousov V.N., Beloshenko V.A., Kozlov G.V., Lipatov Yu.S. Fluktuatsion-nyiy ob'em i struktura polimerov Ukrainskiy himicheskiy zhurnal.– 1996.– Т.62.– #1.– p. 62–65.

УДК 678.5

Рассоха О.М., Черкашина Г.М.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРИРОДИ ТА КОНЦЕНТРАЦІЇ ІНГРЕДІЄНТІВ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ФУРАНО-ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТНИХ МАТЕРІАЛІВ

В роботі наведені дані комплексного аналізу впливу хімічної природи та концентрації інгредієнтів фурано-епоксидних систем (реакційноздатний олігомер ФАЕД та ФЕО, модифікатори – кам'яновугільна смола, бітум, низькомолекулярний поліізобутилен, госиполова смола, фурфурамід; тужавлювачі – поліетиленполіамін та Агідол АФ-2) на структуру і властивості фурано-епоксидних сполучників та композитів на їх основі.

Лавинский В.И., Назаренко С.А.

ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА ОБЪЕКТОВ НОВОЙ ТЕХНИКИ

Развитие науки и техники в условиях информационной ориентированной на развитие рыночной экономики, интенсификация рабочих процессов в современных конструкциях обуславливают необходимость высокого уровня интеграции наукоемких технологий виртуального моделирования жизненного цикла инновационных изделий (Virtual Product Development)[1–4]. Необходимость комплексного моделирования сложных составных конструкций, создания достоверной цифровой модели прототипов и проведения виртуальных испытаний, приближенных к условиям эксплуатации; внутренняя логика интеграции различных научных дисциплин определяют потребность в создании совершенных конечномерных и континуальных моделей структурно связанных систем, обладающих высоким уровнем адекватности реальным объектам и процессам. При разработке современных объектов техники привлекаются специалисты из различных областей знаний и отраслей промышленности, которые сталкиваются с необходимостью проведения больших объемов расчетных и экспериментальных работ по отработке функционирования многих модификаций изделия в различных эксплуатационных режимах. Это стало возможно благодаря увеличению вычислительной мощности компьютеров, повышению эффективности вычислений (в т.ч. за счет сетевых Internet-технологий, многопроцессорности и параллелизации).

Стремительное развитие CAD/CAM/CAE/CIM/CNC/PDF/PLM систем является общемировой тенденцией, что особенно проявляется на крупных предприятиях, использующих наукоемкие технологии: авиа-, авто-, нефтегазовая промышленность и т.д. Жизненный цикл изделия определяется четырьмя основными этапами: проектированием, подготовкой производства, изготовлением и эксплуатацией. Все этапы взаимосвязаны и находятся в единой системе. На первых трех этапах формируется потенциальный уровень протяженности жизненного цикла. Проблема повышения надежности и эффективности использования новой техники связана с решением проблем прогнозирования и диагностики фактического технического состояния при изготовлении, эксплуатации, поступлении в ремонт и после ремонта.

Современные машины (технические объекты) создаются и функционируют как комбинация множества взаимодействующих между собой и с внешней средой конструктивных элементов. Задачу анализа характеристик качества технических объектов $J = J(h, y)$ можно записать в общем виде $A(y, h, t) = 0$, где A – уравнения состояния в операторной форме, характеризующие математические связи между заданными h и искомыми y физическими величинами, t – время. Структуру уравнений определяет тип исследуемого процесса, состав системы, граничные условия, нагрузки и условия сопряжения. Вектор (функция) y переменных состояния, образующих пространство решений, может определять перемещения, температуры, потенциалы электрического поля и другое, под вектором (функцией) h варьируемых и детерминированных параметров понимаются характеристики физико-механических свойств материалов, присоединенных масс и жесткостей, геометрические размеры и другое. Реальные эксплуатационные режимы моделируются нагрузками, которые зависят от характера взаимодействия объекта с окружающей средой (газом, жидкостью) или с внешним полем (темпера-

турное, электромагнитное), а также от возможного контакта с другими элементами в структуре объекта.

Возможности классических методов, базирующихся на решении системы уравнений в частных производных, определяющих краевые задачи математической физики, весьма ограничены. Краевая задача может быть приведена к вариационной форме. Вариационные методы приводят к матричной алгебраической проблеме и служат удобной основой для построения теоретически обоснованных расчетных схем. Задачи теории поля (теплопроводность, гидромеханика, расчет электрических или магнитных полей и т.д.) сводятся к системе уравнений, аналогичной соотношениям метода конечных элементов (МКЭ) для задач механики деформируемого твердого тела, являющегося наиболее мощным, универсальным и распространенным методом расчета.

Цель настоящего исследования заключалась в разработке на единой комплексной научно-методологической базе основных конечно-элементных моделей для некоторых объектов новой техники в условиях действия физических полей различной природы. Основное внимание уделялось оценкам влияния степени специфической связанности в системе на получаемые решения при достаточно больших размерностях векторов переменных. Кроме этого, при выполнении процессов анализа с использованием повторяемых и отлаженных этапов, наиболее полно приближенных к реальным условиям работы объекта, была предпринята попытка свести различные по физической природе процессы к единой унифицированной схеме моделирования на разных этапах жизненного цикла.

С точки зрения формальной логики все многообразие расчетных технологий жизненного цикла инновационных изделий удобно классифицировать следующим образом. Рассмотрим вначале двухуровневые модели физических явлений с учетом их взаимного влияния друг на друга, которые являются комбинацией различных по физической природе процессов и, как следствие, расчетных схем взаимодействия. Введем следующие виды степеней связности структурных элементов системы:

– последовательная (при одностороннем действии)

$$\begin{bmatrix} K_{11} & 0 \\ 0 & K_{22}(\bar{y}_1) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{y}_1 \\ \bar{y}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{F}_1 \\ \bar{F}_2(\bar{y}_1) \end{Bmatrix}; \quad (1)$$

– сильная (полная)

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{y}_1 \\ \bar{y}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{F}_1 \\ \bar{F}_2 \end{Bmatrix}; \quad (2)$$

– слабая с учетом обратных связей (при двустороннем взаимодействии)

$$\begin{bmatrix} K_{11}(\bar{y}_2) & 0 \\ 0 & K_{22}(\bar{y}_1) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{y}_1 \\ \bar{y}_2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \bar{F}_1(\bar{y}_2) \\ \bar{F}_2(\bar{y}_1) \end{Bmatrix}, \quad (3)$$

где K_{11} , K_{21} , K_{22} – обобщенные матрицы жесткости; \bar{y}_1 и \bar{y}_2 – обобщенные вектора узловых переменных, \bar{F}_1 и \bar{F}_2 – обобщенные вектора нагрузок.

Основная идея применения данного математического обобщения, реализуемого в едином информационном пространстве жизненного цикла инновационных изделий,

заклучена в підвищенні точності результатів, мінімізації затрат часу на підготовку моделі і трансляції проміжних даних. Розбиення на підпункти носить умовний методологічний зміст, оскільки фізичний процес може мати комплексний і взаємодіючий характер. Моделювання структурними рівняннями може включати велике число методів з різних областей.

Основним відмінням моделей з послідовною (слабкою) ступенню зв'язаності від сильної ступені є відсутність недиагональних блоків в глобальних матрицях K_{2l} . Прикладами конструкцій, для яких важливий врахування взаємодії фізичних полів різної природи (2) з сильною ступенню зв'язності, є пьезоелектричні пристрої акустичної електроніки. Відміння польових рівнянь пьезоефекта керамічних серед від аналогічних рівнянь класичної теорії еластичності обумовлено необхідністю введення додаткових термодинамічних змінних, що характеризують електричний стан середовища. В результаті замість 15 змінних, що описують механічне еластичне поле (зсуви, деформації і напруження), приходимо до 22-х змінних (вектори напруженості і індукції електричного поля, електростатичний потенціал). Початковими співвідношеннями стану для даної задачі будуть рівняння пьезоефекта, що описують електромеханічне перетворення, квазістатичні рівняння Максвелла, рівняння руху елемента середовища; а також геометричні співвідношення Коші.

Основні розв'язуючі рівняння для процесів, що змінюються в часі, можуть бути безпосередньо отримані з узагальненого варіаційного принципу Гамильтона-Остроградського $\delta \int (\dot{O} - \dot{I} + W) dt = 0$, де T – кінетична енергія системи, P – потенціальна енергія (є найбільш важливою енергетичною характеристикою довільної системи, вираженою через компоненти вибраного простору станів і при необхідності може включати, наприклад, енергію електричної індукції для тривимірного пьезоелектричного тіла), W – робота прикладених сил. Після застосування варіаційного принципу і кінечно-елементної дискретизації співвідношення для задачі про власні коливання в матричній формі для пьезоелемента представляються в вигляді $K_{yy} \vec{y} + K_{y\phi} \vec{\phi} - \omega^2 M_{yy} \vec{y} = 0$; $K_{y\phi}^T \vec{y} + K_{\phi\phi} \vec{\phi} = 0$, де $K_{yy}; K_{y\phi}; K_{\phi\phi}$ – відповідно матриці жорсткості; пьезоелектричної зв'язі; діелектричної проникності, M_{yy} – матриця мас системи; \vec{y} і $\vec{\phi}$ – вектори вузлових зсувів і потенціалів електричного поля в пьезоелектриці. Відзначимо, що матриці $K_{yy}; K_{y\phi}; K_{\phi\phi}$ обчислюються одночасно як "загальнена" матриця жорсткості, при цьому в кожному вузлі об'ємного ізопараметричного кінцевого елемента вважаються невідомими три зсуви і потенціал електричного поля.

Для демонстрації розробленого математичного апарату була розглянута задача розрахунку пьезоелектричного датчика-перетворювача. Пьезокерамічний перетворювач представляє собою куб з матеріалу PZT4 з поляризацією вздовж осі. Електроди розміщені на поверхнях, ортогональних осі поляризації. Розглядалися групи частот коливань, що відповідають як короткозамкнутій ланці, так і розімкнутій. Піделектродна область представляє собою екіпотенціальну поверхню і спеціальним чином не моделюється. Для короткозамкнутій ланці верхній і нижній електроди заземлюються (напруження на електродах дорівнює нулю). Для випадку розімкнутій ланці заземлюється тільки верхній електрод. Випадок короткозамкнутій ланці представляє собою збудження перетворювача прикладеним до електродів потенціалом, а випадок розімкнутій ланці – збудження зарядом. Перетворювач моде-

лировался четвертью куба с приложенными граничными условиями симметрии по поверхностям раздела. Распределение интенсивностей напряжений на соответствующих формах собственных колебаний приведено на рис. 1 и 2. В качестве формы иллюстрации результатов сделана тоновая заливка на поверхности. Светлыми тонами показана зона близких к нулю интенсивностей напряжений, темными – экстремальных.

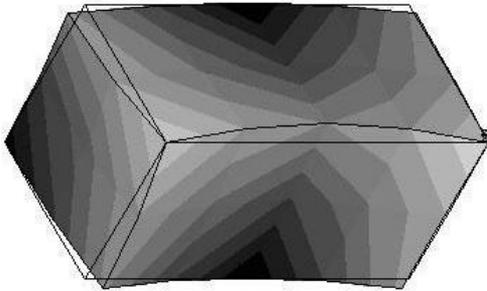


Рисунок 1 – Третья собственная форма.
Короткозамкнутая цепь

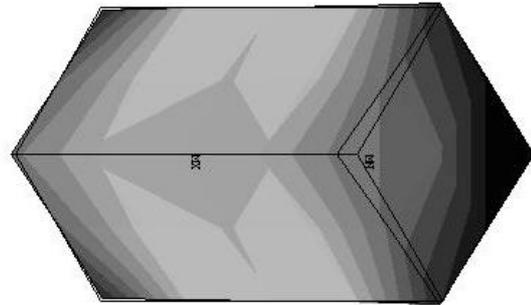


Рисунок 1 – Пятая собственная форма.
Разомкнутая цепь

Недостатком моделей сильной связанности является увеличение размерности и ширины ленты системы разрешающих уравнений, преимуществом – возможность достижения решения за одну итерацию.

Примерами конструкций, для которых необходим учет воздействия последовательно связанных физических полей различной природы (1), являются колеса турбины, нагруженные тепловым потоком от выхлопных газов цилиндров ДВС. Рассмотрим установившийся режим, когда температурное поле можно считать стационарным. Этот режим устанавливается при достаточно долгом прогреве после включения, постоянной внешней температуре и является основным рабочим режимом. Согласно гипотезе Дюамеля-Неймана обобщенные уравнения состояния приняты в виде тензорно-линейных соотношений: $\varepsilon_{ij} = A_{ijkl}\sigma_{kl} + \alpha_{ij}T$, где A_{ijkl} , α_{ij} – компоненты, которыми описываются особенности деформирования и температурного расширения материала, T – приращение температур, зависящее от координат. После декомпозиции, состоящей в разделении системы (модели) на подсистемы (подмодели) с сохранением структур и принадлежности одних элементов и подсистем другим, задача анализа включает в себя: 1) задачу стационарной теплопроводности $\Lambda \vec{T} = \vec{Q}$, где Λ – матрица теплопроводности, \vec{Q} – вектор обобщенной тепловой нагрузки; 2) задачу термоупругости $K_{yy} \vec{y}_t = \vec{F}_t$, где \vec{y}_t – обобщенный вектор термоупругих перемещений. Решение задачи теплопроводности определяет нагрузки для задачи термоупругости. Температурное нагружение оказывает двойное действие: вызывает дополнительные статические напряжения, связанные с возникновением градиента температур, а также в некотором диапазоне изменяет физико-механические характеристики материала. Совместное решение задачи теплофизики и механики позволяет, с одной стороны, экономить затраты времени (например, за счет генерации единой КЭ сетки), а с другой стороны – более адекватно задавать нагрузки. Анализ проводился с использованием циклической симметрии. Температурные напряжения для колеса турбины ТКР-8.5-ТВ составляют величины порядка 5...7 % напряжений от центробежных сил (рис. 3). Во многих случаях последовательная связь не только эффективнее сильной, но и более удобна, так как имеется возможность выполнять расчеты независимо.

Полная модель колеса турбины связана также с необходимостью решения задач термогазодинамики и колебаний. Задача анализа резонансного состояния колеса турбины в поле центробежных сил и тепловых нагрузок, сводится к матричной проблеме $[K_{yy} + G(\bar{y}_s) - \lambda M_{yy}] \bar{y}_d = 0$, где $G(\bar{y}_s, \bar{u})$ – матрица “геометрической” жесткости (приведенных начальных напряжений), формируемая на решении \bar{y}_s статической задачи (температура + центробежные силы, рис. 4).

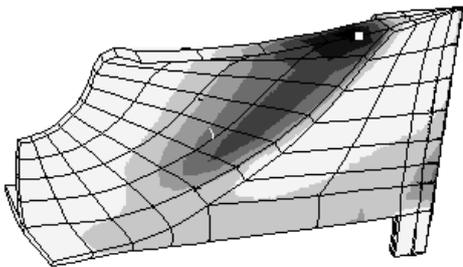


Рисунок 3 – Распределение интенсивностей статических напряжений

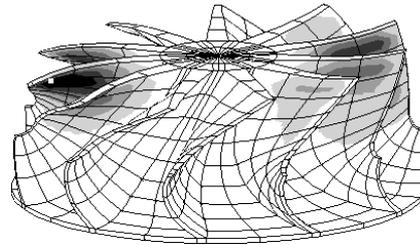


Рисунок 4 – Форма интенсивностей напряжений на 1-ой собственной частоте

Примером конструкций, для которых важен учет воздействия слабосвязанных физических полей различной природы (3), являются резонансные приборы. Особенностью таких задач является учет обратных связей (при двустороннем взаимодействии) и необходимость нескольких итераций при решении нелинейной задачи. Ультразвуковые колебания высокой интенсивности вызывают существенный разогрев системы. Соответствующая связанная нелинейная математическая модель включает стационарные уравнения теплопроводности $\Lambda \bar{T} = \bar{Q}(\bar{\sigma}(\bar{y}_d))$; в которых функция тепловых источников строится по форме резонансных динамических напряжений как доля интенсивности гистерезисных потерь, и уравнения собственных колебаний $[K_{yy}(\bar{T}) - \omega^2 M_{yy}(\bar{T})] \bar{y}_d = 0$, включающие зависимость физико-механических характеристик и геометрии элемента $E = E(T, \bar{x})$; $\rho = \rho(T, \bar{x})$; $\lambda = \lambda(T, \bar{x})$; от распределения температуры. При этом выполняются итерации между различными физическими анализами до тех пор, пока не будет достигнут желаемый уровень сходимости. При двустороннем взаимодействии (3) в гидродинамическом анализе необходимо учесть деформации конструктивных элементов и повторить расчет параметров движения среды для новой геометрии. Общая расчетная схема может носить нестационарный характер, при этом временные шаги могут быть различными. Таким методом решаются задачи флаттера несущих поверхностей, вибраций в лопаточных машинах, искусственных сердечных клапанах и т.д.

После сборки, состоящей в преобразовании модели, реализующей поставленную цель из заданных или определяемых подмоделей (структурно связанных и устойчивых), возможно построение многоуровневых иерархических систем. Так в случае излучателя, работающего на большой глубине в жидкости и изготовленного из пьезоактивного материала, для достижения хорошего соответствия математической модели реальному поведению конструкции необходимость учитывать и связь напряженно-деформированного и электрических полей в конструкции:

$$[K_{yy}] \bar{y}_s = \bar{F}_s; \quad \{[K_{yy}] + [G(y_s)] - \omega^2 [M_{yy}]\} \bar{y} + [K_{y\phi}] \bar{\phi} - [R]^T \bar{p} = 0;$$

$$[K_F] \bar{p} - \omega^2 [M_F] \bar{p} - \omega^2 \rho [R] \bar{y} = 0; \quad [K_{\phi y}] \bar{y} + [K_{\phi \phi}] \bar{\phi} = 0, \quad (4)$$

где $[M_F]$, $[K_F]$ – матрицы масс и жесткости жидкости или газообразной среды; $[R]$ – матрица взаимосвязи “давление-перемещение”, определяемая из условия совместности на границе конструкции с жидкостью \bar{p} – вектор узловых давлений.

Данное исследование позволило провести классификацию задач анализа мультифизических конечноэлементных моделей различной степени связанности, позволяющую построить схему позадачного подхода для декомпозиции комплексной проблемы на ряд отдельных физических задач, и успешно апробировать разработанный математический аппарат на ряде конструкций. Анализ структуры и типов связей между отдельными задачами служит основой схемы и последовательности решения рассматриваемых задач. Использование единой расчетной модели для мультифизического моделирования позволяет минимизировать время, обычно затрачиваемое на подготовку множества расчетных моделей, преобразование и передачу данных от одной расчетной модели в одной системе к другой модели в другой системе. Дальнейшим направлением исследований является применение математического аппарата при исследовании жизненного цикла ряда современных конструкций, а также его развитие на проблемы оптимизации и анализа чувствительности. Применение предложенных технологий позволяет сократить затраты и трудоемкость процессов проектирования, технической подготовки и освоения производства новых изделий; эксплуатации, обслуживания и ремонта изделий.

Литература

1. Piegl L.A. Ten challenges in computer-aided design. // Computer-aided design. – 2005. – №37. – p. 461–470.
2. Судов Е.В. Интегрированная информационная поддержка жизненного цикла машиностроительной продукции. М.: ООО Издательский дом МВМ, 2003. – 264 с.
3. <http://www.cimdata.com/>
4. Лавинский В.И., Назаренко С.А., Анацкий Ю.П. Анализ чувствительности характеристик прочности и жесткости структурно связанных систем. // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Збірник наукових праць. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2007. – № 38. – с. 77–83.

Bibliography (transliterated)

1. Pieg L.A. Ten challenges in computer-aided design. Computer-aided design. – 2005. – #37. – p. 461–470.
2. Sudov E.V. Integrirovannaya informatsionnaya podderzhka zhiznennogo tsikla mashinostroitelnoy produktsii. M.: ООО Izdatelskiy dom MVM, 2003. – 264 p.
3. <http://www.cimdata.com/>
4. Lavinskiy V.I., Nazarenko S.A., Anatskiy Yu.P. Analiz chuvstvitelnosti harakteristik prochnosti i zhestkosti strukturno svyazannyih sistem. VIsnik Natsionalnogo tehnlchnogo unIversitetu «HarkIvskiy polItehnIchniy Institut». ZbIrnik naukovih prats. – HarkIv: NTU «HPI». – 2007. – # 38. – p. 77–83.

УДК 539.3

Лавінський В.І., Назаренко С.О.

**ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ
ОБ'ЄКТІВ НОВОЇ ТЕХНІКИ**

Розглядаються проблемні питання, що виникають при розробці математичних моделей складних конструкцій за наявності дії полів різної природи. Розроблені методи аналізу послідовнозв'язаних, сильнозв'язаних, слабозв'язаних мультифізичних просторових скінчено-елементних моделей систем. Обґрунтовано використання сукупності методів аналізу при дослідженні життєвого циклу об'єктів нової техніки.

УДК 615.014.8

Литвиненко Є.І., Мельник Ю.Я., Земке В.М.

ТЕХНОЛОГІЯ ОДЕРЖАННЯ НАПОВНЕНОГО АКРИЛОКСИДУ З ПОКРАЩЕНИМИ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Розвиток новітніх технологій та сучасних виробництв потребує створення матеріалів із комплексом специфічних властивостей. Сучасним вимогам найбільше відповідають полімерні матеріали та композити, асортимент яких розширюється завдяки модифікації та наповненню полімерів, що дозволяють ціленаправлено змінювати їхні властивості. Одним з найпростіших, технологічно доступних методів модифікації полімерів є адсорбційна модифікація поверхні і наповнення дисперсними наповнювачами.

Введення в полімерні матеріали наповнювачів дозволяє одержувати полімерні композиційні матеріали (ПКМ) із поліпшеними фізико-механічними властивостями, знижує вартість композитів за рахунок економії полімерного зв'язного. Модифікація поверхні наповнювачів займає особливе місце в технології одержання ПКМ, хоча і пов'язана з додатковими витратами, однак вони виправдуються значними покращеннями основних експлуатаційних властивостей та розширенням областей їхнього застосування.

Одним із пріоритетних напрямів створення ПКМ для застосування в медицині є розроблення нових ПКМ стоматологічного призначення з покращеним комплексом міцнісних та експлуатаційних характеристик при використанні біологічно-індиферентних вихідних матеріалів.

До таких ПКМ відносяться матеріали на основі акрилових полімерів. Низька токсичність, можливість варіювання міцнісних і адгезійних характеристик, біосумісність обумовлюють їх широке застосування для виготовлення пломбувальних матеріалів, штучних зубів, ортопедичних і ортодонтичних апаратів та ін. [1].

Особливу зацікавленість викликають полімерні композити, що містять мінеральний наповнювач, які за рахунок направленої сполучення компонентів одержують необхідний комплекс технологічних, міцнісних, експлуатаційних і антимікробних властивостей. На сьогоднішній день значно розширився асортимент речовин, які використовуються у якості наповнювачів ПКМ. Успішно використовують як наповнювачі цеоліти, які є дисперсними алюмосилікатами каркасної структури.

Мета даної роботи – дослідити вплив наповнювачів на комплекс технологічних і експлуатаційних властивостей ПКМ.

У якості наповнювачів використовували цеоліт (ТУ 6-18-29-86) і кварц (ТУ 0284409-89). Як полімерне зв'язне використовувався композиційний матеріал на основі епоксидно-(мет)акрилових кополімерів – акрилоксид (ТУ У 24.4-00481318-024-2003).

Акрилоксид є полімерним композитом холодного тверднення типу порошок-рідина. Кополімерну основу акрилоксиду складає метакрилована епоксидна смола, яка в процесі тверднення полімерного матеріалу вступає у взаємодію з метилметакрилатом і (ММА). Процес протікає за радикальним механізмом під впливом ініціюючої редокс-системи: пероксид бензоїлу – N,N'-диметилпаратолуїдин. Основу порошкоподібної фракції акрилоксиду складає продукт суспензійної (ко)полімеризації ММА і бутилметакрилату (БМА), який введено з метою надання кополімеру підвищеної еластичності і адгезії. Порошок містить також 10 % наповнювача (подрібнений кварц), ініціюючу сис-

тему і стабілізатор (крохмаль) і інші доданки.

У порошкоподібну фракцію акрилоксида вводили додатково мінеральні наповнювачі: цеоліт, а також для порівняння кварц у кількості 5...20 мас. ч. і проводили звичайне змішування. Після цього у спеціальну поліетиленову ємність дозували мономерну (рідку) складову і поступово додавали отриманий порошок акрилоксида у співвідношенні рідкої і порошкоподібної фракцій 1:1, замішуючи шпателем, до повного насичення рідини. Змішування проводили протягом 1 хв. і накривали кришкою. Отриману масу витримували при кімнатній температурі протягом 5...7 хв. (доки композиція не переставала тягнутися) [2]. Готову масу закладали у форми із фторопласту і вручну ущільнювали композицію, або для зразків, призначених для механічних випробувань – у металеву прес-форму і пресували при зусиллі 30 кгс. Фізико-механічні дослідження отриманих ПКМ на основі акрилоксида проводили для сухих зразків і гідратованих у фізіологічному розчині (0,9 %-ий водний розчин натрію хлориду) і у дистильованій воді.

Водопоглинання визначали ваговим методом з точність зважування – 0,0002 г згідно з ГОСТ 4650. Готували зразки у вигляді дисків діаметром 25 мм і товщиною 3 мм і через 3 год, після повного тверднення занурювали їх у посудину з дистильованою водою на гідратацію. Перед зважуванням гідратовані зразки ретельно протирали від поверхневої вологи.

Дослідження водопоглинання складалося з двох серій. У першій серії зразки ПКМ витримували у дистильованій воді при 50...60 °С протягом 24 год з метою вимивання непрореагованого мономера, після чого їх висушували протягом 5 год при 95 °С і зважували. Потім їх витримували в дистильованій воді при температурі 20 °С протягом 24 год і 14 діб і визначали водопоглинання. У другій серії визначали водопоглинання при витримуванні зразків ПКМ у дистильованій воді протягом 24 год при температурі 37 °С.

Водопоглинання (W, %) розраховували:

$$W = \frac{m_1 - m_2}{m_2} \cdot 100\% , \quad (1)$$

де m_1 – маса вологого зразка; г, m_2 – маса сухого зразка, г.

Отримані результати наведені в табл. 1, 2.

Величина адгезії полімер-мономерних композицій холодного тверднення залежить не тільки від природи мономера, але і від техніки нанесення клеючої композиції. Процес набухання полімеру в мономері протікає 3 стадії: пісочна, “липка” і тістоподібна. Клеюча композиція проявляє адгезію лише у другій стадії, тому процес склеювання проводили саме на цій стадії. Простим і надійним методом дослідження адгезії є метод оцінки міцності клейового з’єднання при зсуві за ГОСТ 14759.

Суть методу полягає у визначенні величини руйнівної сили при розтягуванні стандартних сталевих зразків, склеєних досліджуваною композицією внакладку, зусиллям, що намагається зсунути одну половину зразка відносно другої.

Дві пластини листового металу розміром 2 × 15 × 60 мм з одинарною накладкою довжиною 15 мм склеювали одна з одною, так щоб відстань між центрами отворів була 70 мм (рис. 1).

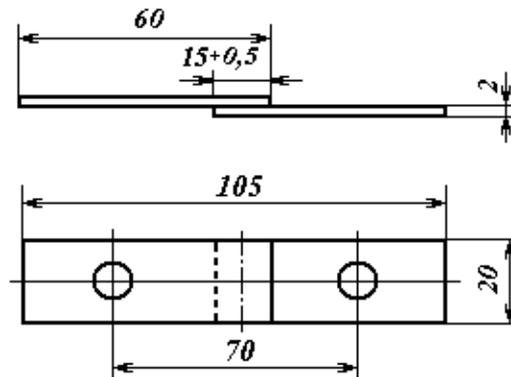


Рисунок 1 – Схема заміру зразків, призначених для визначення границі міцності клейового з'єднання при зсуві

Склеєні зразки витримували 3 год і 24 год на повітрі і у фізіологічному розчині. Підготовлені для визначення зразки встановлювали за допомогою шпильок у захватах випробувальної машини. Випробування проводили за допомогою розривної машини “Kimura Mashinery” типу “050/RT-6010” з електронною індикацією при швидкості деформування зразка 25 мм/хв. поступовим нарощуванням навантаження до руйнування клейового з'єднання. Фіксували максимальне навантаження, досягнуте при випробування. Для випробувань брали не менше п'яти зразків.

Границю міцності клейового з'єднання при зсуві P (МН/м²) обчислювали за формулою:

$$D = \frac{F}{S}, \quad (2)$$

де F – руйнівне навантаження, МН; S – площа склеювання, м².

Площу склеювання S обчислювали з точністю до 0,0001 м² за формулою:

$$S = a \times b, \quad (3)$$

де a і b – відповідно, довжина і ширина адгезивного шару, м.

Отримані результати наведені в табл. 1, 2.

Твердість характеризує здатність поверхневого шару матеріалу протидіяти деформації від статичного або динамічного стискуючого зусилля. Випробування на твердість служать для оцінки опірності матеріалу пластичній деформації на його поверхні. Твердість досліджуваних ПКМ визначали при прикладенні малих навантажень. Цей метод, який має назву “випробування на мікротвердість” використовується для вимірювання твердості композитів, зокрема для при вивченні поверхневих властивостей композиційних матеріалів на основі полі метилметакрилату, зокрема штучних зубів [3].

Зразки для випробувань у вигляді циліндрів діаметром 10 мм і висотою (12,0±0,2) мм виготовляли пресуванням досліджуваних композицій у прес-формі при зусиллі 30 кгс протягом 10 хв. Перед випробуванням зразки витримували при температурі (22±3) °С не менше 16 год. Для випробувань брали не менше п'яти зразків.

Вимірювання поверхневої твердості досліджуваних ПКМ проводили при допомозі консистометра Хеплера. Принцип роботи консистометра полягає у введенні спеціального твердого сталюго конуса під навантаженням 50 Н у досліджуваний матеріал до досягнення точки текучості. Кут вістря конуса складає 53°08', так що діаметр кожної

поверхні завжди дорівнює відповідній висоті. Таким чином, глибина його проникнення, яку показує вимірювальний механізм рівна діаметру опорної поверхні проникаючого конуса.

Опорну поверхню проникаючого конуса ($F, \text{м}^2$) розраховували за формулою:

$$F = \frac{s^2 \cdot \pi}{4}, \quad (4)$$

де s – глибина проникнення, м.

Поверхневу мікротвердість оцінювали за кінчною точкою текучості ($F_p, \text{МН/м}^2$):

$$F_p = \frac{G}{F}, \quad (5)$$

де G – прикладене навантаження, МН.

Отримані результати наведені в табл. 1, 2.

У табл. 1 наведено результати досліджень ПКМ на основі акрилоксида, наповнених цеолітом у кількості від 5 до 20 мас ч.

Таблиця 1 – Склади та експлуатаційні властивості ПКМ на основі акрилоксида, наповнених цеолітом

Композиційні склади, умови проведення випробувань та експлуатаційні властивості ПКМ			Склади ПКМ на основі акрилоксида, мас. ч.				
			1	2	3	4	відомий
Рідка фракція			50	50	50	50	50
Порошкоподібна фракція			47,5	45	42,5	40	50
Цеоліт			2,5	5	7,5	10	–
Водопоглинання, W, %	T = 37 °C	24 год	2,56	2,82	3,34	4,00	2,45
		24 год	2,17	2,55	2,57	2,88	1,80
	T = 20 °C	14 діб	3,10	3,17	3,70	4,18	3,00
Адгезія, P, МН/м ²	сухі	3 год	38,7	39,1	45,2	38,2	–
		24 год	39,1	41,9	47,5	39,8	34,5
	гідратовані *	3 год	30,6	37,4	31,2	25,4	–
		24 год	25,7/37,4	28,0/38,2	30,8/42,3	20,9/25,0	24,9
Мікротвердість, F _p , МН/м ²	сухі	3 год	314	312	365	381	–
		24 год	385	373	401	423	330
	гідратовані *	3 год	252	257	269	302	–
		24 год	253/320	276/349	312/338	338/357	308

* – гідратовані у фізрозчині; / в знаменнику – у воді

Водопоглинання досліджуваних ПКМ вивчалось при різних умовах і режимах гідратації. Спостерігається загальна тенденція збільшення водопоглинання при введенні цеоліту у полімерний композиційний матеріал.

При дослідженні адгезії ПКМ встановлено, що при введенні цеоліту 10 мас. ч. у гідратованих зразків адгезія зростає на 50 % при витримуванні їх у фізіологічному розчині. У не гідратованих зразків адгезія зростає на 40 %.

При дослідженні мікротвердості не гідратованих зразків ПКМ, наповнених цеолітом спостерігається збільшення показника зі збільшенням ступеня наповнення до 30 % через 24 год. При витримці у фізіологічному розчині і воді мікротвердість досліджуваних композитів з часом навіть дещо зростає.

У табл. 2 наведено результати досліджень ПКМ на основі акрилоксида, наповнених кварцом у кількості від 5 до 20 мас. ч.

Спостерігається загальна тенденція зменшення водопоглинання при введенні кварцу у полімерний композиційний матеріал. Збільшення температури і часу витримки приводить до збільшення водопоглинання, однак введення 20 мас. ч. кварцу знижує цей показник на 30 %.

При дослідженні адгезії ПКМ встановлено, що при введенні кварцу 5 мас. ч. не спостерігається значних змін адгезії. Максимальне зростання адгезії до 40 % спостерігається при введенні лише 15 мас. ч. кварцу в композицію.

Мікротвердість ПКМ збільшується до 20 % при збільшенні вмісту в ньому кварцу.

Таблиця 2 – Склади та експлуатаційні властивості ПКМ на основі акрилоксида, наповнених кварцом

Композиційні склади, умови проведення випробувань та експлуатаційні властивості ПКМ			Склади ПКМ на основі акрилоксида, мас. ч.				
			1	2	3	4	відомий
Рідка фракція			50	50	50	50	50
Порошкоподібна фракція			47,5	45	42,5	40	50
Кварц			2,5	5	7,5	10	–
Водопоглинання, W, %	T = 37 °C	24 год	2,3	2,15	1,83	1,71	2,45
		24 год	1,65	1,56	1,54	1,2	1,80
	T = 20 °C	14 діб	2,90	2,80	2,70	2,60	3,00
Адгезія, P, МН/м ²	сухі	3 год	30,0	32,5	46,3	41,3	–
		24 год	33,3	36,0	48,4	45,9	34,5
	гідратовані *	3 год	22,1	32,5	41,1	35,7	–
		24 год	24,6/24,8	30,8/31,8	37,1/38,9	26,3/33,3	24,9
Мікротвердість, F _p , МН/м ²	сухі	3 год	296	326	337	365	–
		24 год	338	355	361	392	330
	гідратовані *	3 год	266	299	313	315	–
		24 год	296/335	303/328	302/339	326/364	308

* – гідратовані у фізрозчині; / в знаменнику – у воді

Таким чином, додаткове введення у полімерний композиційний матеріал наповнювачів приводить до покращення їхніх експлуатаційних властивостей, зокрема підвищується адгезія, особливо для композицій з цеолітом; зростає мікротвердість, більше для композицій з кварцом, а також у випадку наповнених кварцом композицій зменшується їхнє водопоглинання, що дозволяє направлено регулювати експлуатаційні властивості виробів на основі розроблених ПКМ.

Проведені нами дослідження дозволили обґрунтувати технологічні параметри одержання наповнених полімерних композиційних матеріалів, у тому числі склади і співвідношення рецептурних компонентів для одержання ПКМ з покращеними експлуатаційними властивостями. Надалі це дозволить створювати ПКМ стоматологічного призначення з комплексом міцнісних та експлуатаційних характеристик при використанні біологічно-індиферентних вихідних матеріалів. Введення наповнювачів у ПКМ також знижує вартість композитів за рахунок економії полімерного зв'язного.

Література

1. Макаров К.А., Штейнгарт М.З. Сополимеры в стоматологии. - М.: Медицина. - 1982. - 248 с.
2. Литвиненко Е.И., Авраменко В.Л. Динамические и физико-механические свойства акрилоксида, наполненного алюмосиликатом с модифицированной поверхностью // Пластические массы. М.: - 2004. - №6. - С. 19-21.
3. Материаловедение в стоматологии. /Под ред. А. И. Рыбакова. М.: Медицина. - 1984. - 424 с.

Bibliography (transliterated)

1. Makarov K.A., Shteyngart M.Z. Sopolimeryi v stomatologii. M.: Meditsina. 1982. - 248 p.
2. Litvinenko E.I., Avramenko V.L. Dinamicheskie i fiziko-mekhanicheskie svoystva akriloksida, napolnennogo alyumosilikatom s modifitsirovannoy poverhnostyu Plasticheskie massyi. M.: - 2004. - #6. - p. 19-21.
3. Materialovedenie v stomatologii. Pod red. A. I. Rybakova. M.: Meditsina. 1984. 424 p.

УДК 615.014.8

Литвиненко Е.И., Мельник Ю.Я., Земке В.Н.

ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ НАПОЛНЕННОГО АКРИЛОКСИДА С УЛУЧШЕННЫМИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ

Проведенные исследования позволяют обосновать рецептурные соотношения компонентов для получения полимерных композиционных материалов с улучшенными эксплуатационными свойствами на основе акрилоксида. Определены оптимальные технологические параметры эксплуатации наполненных полимерных композиционных материалов в разных средах. В дальнейшем это обеспечит создание ПКМ стоматологического назначения с улучшенным комплексом прочностных и эксплуатационных свойств.

УДК 622.279.8

Євсєєв О.В., Світлицький В.М., Кисельова С.О., Левченко Ю.Ю.

АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ АБСОРБЦІЇ ДЛЯ ВИЛУЧЕННЯ ЦІЛЬОВИХ ВУГЛЕВОДНІВ З ПРИРОДНОГО ГАЗУ

Метод низькотемпературної конденсації (НТК) для вилучення цільових вуглеводнів з природного газу є найбільш розповсюдженим в світі в останні роки.

В світовій практиці для вилучення пропан-бутанової фракції методом НТК в якості сировини використовується газ з вмістом пропану не нижче 1,5 % об. На сьогоднішній день з доступних джерел інформації не відомо жодної установки (ГПЗ), що працює за методом НТК по вилученню тільки пропан-бутанової фракції із „сухого“ газу, який містить пропану – 0,8÷0,85 % об.

Холод на ізотермі мінус 80 °С та нижче використовується, як правило, для вилучення в якості товарного продукту етану та пропан-бутанової фракції, для чого потрібні кріогенні температури, відповідне обладнання та умови підготовки сировинного газу. Враховуючи відсутність попиту на товарний етан в Україні та підвищення потреби у пропан-бутановій фракції, єдиним методом який може бути придатним для переробки „сухого“ газу з метою отримання товарного пропан-бутану залишається абсорбційний метод.

На сьогоднішній день вилучення вуглеводнів C₃₊ на газових промислах України здійснюється двома методами:

- НТК при температурах мінус 60 °С;
- НТА при температурах не нижче мінус 30 °С.

Температура процесу абсорбції вагомо впливає на апаратурно-технологічне оформлення всієї установки поглибленого вилучення цільових вуглеводнів (УПВВ), оскільки потребує застосування різного типу вуглеводневого абсорбенту для запобігання термодинамічного виносу останнього. Так для установки ПВВ за методом НТА при температурі процесу мінус 30 °С (P = 3,5 МПа) необхідно застосовувати абсорбент з молекулярною масою 130–140 та температурою кипіння 150–200 °С. Застосування вуглеводневого абсорбенту з такими фізичними властивостями потребує наявності в технологічній схемі установки колони для його регенерації та окремої установки підготовки абсорбенту для первинного завантаження і підживлення абсорбенту внаслідок технологічних втрат в схемі УПВВ.

Робота установки ПВВ при температурі процесу мінус 60 °С (P = 3,5 МПа) дозволяє використовувати абсорбент з молекулярною масою 85–95 та температурою кипіння 35–100 °С. При таких характеристиках абсорбенту відпадає потреба в установці підготовки абсорбента та колони регенерації, оскільки в цьому випадку такими характеристиками володіє стабільний вуглеводневий конденсат – нижній продукт колони дебутанізатора.

Враховуючи відсутність в Україні установок, що працюють за методом НТА на ізотермі мінус 60 °С, в цій роботі наведені результати аналітичних досліджень і дано кількісну оцінку впливу питомої витрати абсорбенту на ступінь вилучення вуглеводнів з природного газу з низьким вмістом компонентів C₃₊ у початковому (сировинному) газі.

Аналітичні дослідження процесу НТА виконані при температурі мінус 60 °С і тиску 3,5 МПа для природного газу Хрестищенського газоконденсатного родовища (вміст вуглеводнів C_{3+} – 35 г/м³).

Характеристика сировинного газу наведена в табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристика сировинного газу

Компоненти	моль/моль
Азот	0,0155044
Метан	0,9280792
Діоксид вуглецю	0,0025208
Етан	0,0373284
Пропан	0,0085359
ізо-Бутан	0,0012479
н-Бутан	0,0017621
нео-Пентан	0,0000300
ізо-Пентан	0,0005990
н-Пентан	0,0004992
н-Гексан	0,0010483
н-Гептан	0,0007088
н-Октан	0,0003394
н-Нонан	0,0001498
Вода	0,0016468

На рисунку 1 наведені графіки, які характеризують ступінь вилучення вуглеводнів з сирого газу на установці НТА у залежності від кількості абсорбенту, що подається на зрошення в абсорбери. Як видно з наведених залежностей інтенсивність вилучення пропану з сирого газу повільно зменшується після позначки, що дорівнює кількості циркулюючого в схемі установки НТА абсорбенту більше 48 г/м³. На цій же позначці (48 г/м³) знаходиться точка інверсії кривої яка характеризує вилучення бутанів. Залежність вилучення пентанів та більш важких вуглеводнів стрімко зменшується з ростом кількості циркулюючого в системі абсорбенту. Такий характер кривих пов'язаний з підвищенням температури газу та абсорбенту в абсорберах внаслідок екзотермічності процесу абсорбції.

Динаміка вилучення етану є наростаючою в усьому діапазоні розглянутих значень кількості циркулюючого абсорбенту.

Залежності ступені вилучення компонентів на графіках побудовані по відношенню до кількості кожного із наведених компонентів у складі вхідного потоку і тому відображають лише характер процесу вилучення. Якщо розглядати кількісні показники по вилученню компонентів від наведених залежностей, то для газу зазначеного складу, що надходить до установки ПВВ у кількості 10 млн. м³/добу, зміна вилучення на 1 % для метану дорівнює близько 2,60 т/год по цьому компоненту, етану – 0,24 т/год, пропану – 0,05 т/год, бутанів – 0,01 т/год.

Так збільшення питомої витрати абсорбенту через абсорбери від 48 до 144 г/м³ (від 20 до 60 т/год при кількості газу 10 млн.м³/добу) дозволяє вилучити пропану від 5,39 до 5,92 т/год, бутанів від 2,94 до 2,82 т/год, пентанів та більш важких вуглеводнів

від 4,69 до 3,91 т/год, при цьому вилучення метану становить від 4,81 до 7,71 т/год, етану від 4,82 до 7,74 т/год.

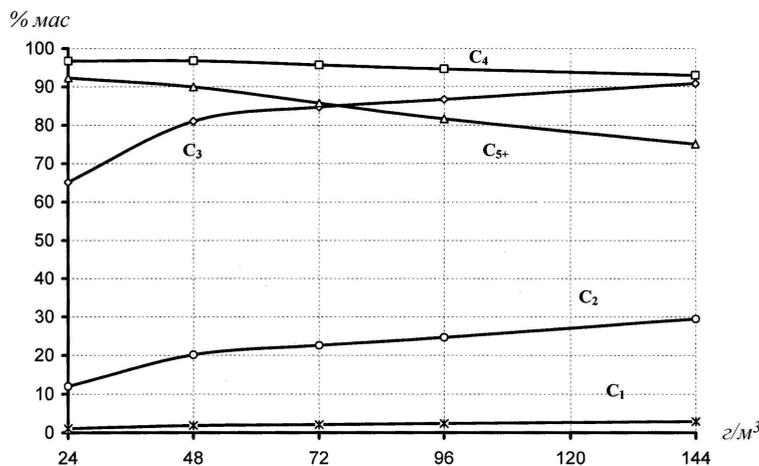


Рисунок 1 – Ступінь вилучення компонентів з газу в залежності від кількості абсорбенту

Таким чином, незначне підвищення вилучення пропану (0,53 т/год) при збільшенні витрати абсорбенту від 48 до 144 г/м³, призводить до втрат вуглеводнів C₄₊ у кількості 0,90 т/год. В той же час вилучення побічних вуглеводнів C₁, C₂ збільшиться на 5,82 т/год.

Абсолютна різниця у вилученні вуглеводнів при збільшенні витрати абсорбенту від 24 до 48 г/м³ становить: пропану додатково 1,14 т/год, метану та етану – 4,58 т/год, втрати вуглеводнів C₅₊ – 0,12 т/год.

Таким чином, результати аналітичних досліджень показують, що температура процесу НТА на рівні мінус 50 ÷ мінус 60 °С, дозволяє використовувати „легкий“ абсорбент з молекулярною масою 85–95. Використання такого абсорбенту, у свою чергу, дозволяє вести процес НТА з високою ступінню вилучення пропан-бутану з сирого газу при низьких питомих витратах абсорбенту. Це значно підвищує техніко-економічні показники установки за рахунок зниження металоємкості та енергетичних витрат порівняно з традиційними установками НТА при температурах процесу до мінус 30 °С.

УДК 622.279.8

Евсеев А.В., Светлицкий В.М., Киселева С.А., Левченко Ю.Ю.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ АБСОРБЦИИ ДЛЯ ИЗЪЯТИЯ ЦЕЛЕВЫХ УГЛЕВОДОРОДОВ ИЗ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Проведены аналитические исследования процесса низкотемпературной абсорбции (НТА) при изъятии целевых углеводородов из природного газа. Определено, что при температуре процесса НТА на уровне минус 50 ÷ минус 60 °С появляется возможность использовать "легкий" абсорбент с молекулярной массой 85–95, а это, в свою очередь, разрешает вести процесс с высокой степенью изъятия пропан-бутана из сырого газа при низких удельных затратах абсорбента.

«ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Ежеквартальный научно-практический журнал

Редколлегией к опубликованию принимаются статьи по следующим научным направлениям:

- ✓ *энергетика и энергосбережение; энерготехнология энергоемких отраслей промышленности; нетрадиционная энергетика; ресурсосбережение; энергетика и окружающая среда;*
- ✓ *теплоиспользующие установки; моделирование процессов промышленного оборудования; процессы и аппараты различных отраслей промышленности (химической, пищевой, мед. оборудования и проч.);*
- ✓ *применение ЭВМ в технологических процессах; автоматизированные системы управления и обработки информации;*
- ✓ *тепло- и массообменные процессы и оборудование специальной техники; тепловые процессы и криогенное оборудование медицинского назначения;*
- ✓ *электроэнергетика; оборудование электростанций и передача электроэнергии;*
- ✓ *экономические аспекты энергетики и промышленной экологии; коммерческий инжиниринг, реинжиниринг и технологический менеджмент,*
а также другим направлениям, на стыке различных отраслей знаний.

Материалы к опубликованию в каждый последующий номер принимаются до 20 числа последнего месяца предыдущего квартала. Рукописи авторам не возвращаются.

Материал должен быть подготовлен на IBM-совместимом компьютере и распечатан в 2-х экземплярах. К материалам должна прилагаться дискета 3,5" со статьей, набранной в редакторе текстов MS Word for Windows версий 97, XP, 2000 или 2003.

К статье необходимо приложить экспертное заключение о возможности опубликования материалов в открытой печати и рецензию доктора наук по профилю подаваемой статьи.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ:

Размер бумаги А4 (210x297 мм); левое и правое поля – 25 мм, верхнее и нижнее – 30 мм; рекомендуемый шрифт Times New Roman Суг; размер шрифта – 12; межстрочный интервал – 1.

ПОРЯДОК РАЗМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛА:

- непосредственно под верхней границей слева **БОЛЬШИМИ БУКВАМИ** печатается УДК статьи;
- пропустив одну строку, по центру печатаются инициалы и фамилии авторов;

- пропустив одну строку, по центру полужирным шрифтом **БОЛЬШИМИ БУКВАМИ** печатается название статьи;
- пропускается одна строка и с абзаца (1,25 см) печатается основной текст, отформатированный по ширине страницы;
- перед и после формул и уравнений должно быть расстояние в одну пустую строку до текста с интервалом 1;
- формулы и уравнения должны быть выровнены по центру;
- номера формул и уравнений выровнены по правому краю;
- размер шрифта формул и уравнений для основного текста – 12 пт.;
- рисунки, схемы и графики должны быть выполнены в черно-белом изображении;
- пропустив одну строку, следует список литературы, оформленный в соответствии с требованиями ДСТУ;
- в конце статьи на украинском (русском – для статьи на украинском языке), русском и английском языках должны быть напечатаны УДК, авторы, название и аннотация.

Статьи, рекомендуемые к опубликованию членами редколлегии, не проходят рецензирования. Остальные статьи рецензируются.

АДРЕС РЕДКОЛЛЕГИИ

Украина, 61002,
Харьков-2, ул. Фрунзе, 21,
НТУ «ХПИ», редколлегия журнала
«Интегрированные технологии и энергосбережение»,
секретарю редколлегии Горбунову К.А.

Тел. (057) 707-69-58.
(057) 707-61-99

Email: gorbunov@kpi.kharkov.ua

**СТАТЬИ, ОФОРМЛЕННЫЕ НЕ В СООТВЕТСТВИИ С ПРАВИЛАМИ,
РЕДКОЛЛЕГИЕЙ НЕ РАССМАТРИВАЮТСЯ**

**НА ЖУРНАЛ ОТКРЫТА ПОДПИСКА
В ПОЧТОВЫХ ОТДЕЛЕНИЯХ УКРАИНЫ**

ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 22786

АНОТАЦІЙНИЙ ЗМІСТ

G.V.Pakki

EXPERIMENTAL RESEARCHES of DEVICES With FLUOROPLASTIC FILTERPACKETS FOR CLEARING the LIQUID OF MECHANICAL IMPURITY

Influence local swirl of a stream of a liquid and recirculation of a stream of a liquid for interreclaiming term of operation fluoroplastic filterpacket type FEP in filters of clearing of a liquid is investigated.

Lavinsky V.I., Nazarenko S.A.

THE INTEGRATED TECHNOLOGIES OF PRODUCT LIFE-CYCLE

The complex of theoretical, calculable and applied questions of elements product lifecycle management are studied. Coupled-field analyses are useful for solving problems where the coupled interaction of phenomena from various disciplines of physical science is significant. There are basically 3 methods of coupling distinguished by the finite element formulation techniques used to develop the matrix equations.

УДК 615.014.8

Lytvynenko E.I. Melnik J.J., Zemke V.M.

THE PROCESS OF FILLED ACRYLOXIDE PRODUCTION WITH IMPROVED EXPLOITATION CHARACTERISTICS

The appropriate researches were carried out that gave the possibility to obtain the recommended ratios of components for polymer composed materials based on acryloxiide with improved exploitation characteristics. The optimal process parameters were defined for polymer compounds in different environment conditions. It will give the possibility to use the results for dental purposes taking into account improved hardness and exploitation reliability.

УДК 62-522

Cherkashenko M.V., Fateev A. N.

SYNTHESIS OF SCHEMES OF HYDROPNEUMOUNITS

The new structural organization of schemes of hydropneumounits of is discrete-analog of controls. The method of designing многотактных schemes with use of the discrete controls, and valves with unilateral management is given

Sivoraksha V.E., Markov V.L.

TECHICAL and ECONOMICAL ANALYSIS of WAYS of KEEPING the TEMPERATURE in HEAT STORAGE UNITS

Methods of technical and economical analysis of ways of keeping the temperature in heat storage units are suggested, the methods allowing estimating the influence of components of reduced annual expenses for heat protection of units and to determine an optimal thickness of a thermal insulating layer with a fixed value of the coefficient of thermal conductivity.