

ІТЕ ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Щоквартальний науково-практичний журнал

3'2017

Видання засновано Харківським державним політехнічним університетом у 1998 році
(з листопада 2000 р. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»)

Держвидання
Свідоцтво Міністерства інформації України
КВ № 3427 від 18.08.1998 р.

ЗАТВЕРДЖЕНО
постановою президії ВАК України
як наукове фахове видання
(протокол № 1-05/3 від 14.04.2010 р.)

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор
Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ,
член-кор. НАН України

Відповідальний секретар
К. О. ГОРБУНОВ,
канд. техн. наук, доц.

ЧЛЕНИ РЕДКОЛЕГІЇ:

В. П. Мешалкін, *д-р техн. наук, проф.*,
РХТУ Москва (Росія)
Д. Б. Ферст, *ВА, ген. директор*
F. Executive Co. (Великобританія)
Й. Клемеш, *PhD, DSc (Hon)*
ун-та «Паннонія» (м. Веспрем, Угорщина)
та ун-та Манчестера (Великобританія)
В. Плешу, *PhD, проф.*, *ун-т POLITEHNICA*
Бухарест (Румунія)
П. Стехлік, *PhD, проф.*, *VUT Брно (Чехія)*
О. Б. Аніпко, *д-р техн. наук, проф.*
Є. І. Сокіл, *член-кор. НАН України*
П. А. Качанов, *д-р техн. наук, проф.*
В. А. Малярєнко, *д-р техн. наук, проф.*
Д. Ф. Сімбірський, *д-р техн. наук, проф.*
В. П. Шапорєв, *д-р техн. наук, проф.*
Ю. Б. Данилов, *д-р техн. наук, проф.*
С. В. Яковлев, *д-р фіз.-мат. наук, проф.*
Ю. М. Мацевітій, *акад. НАН України*
В. Є. Ведь, *д-р техн. наук, проф.*
П. О. Капустєнко, *акад. Академії будівництва України*
О. П. Арсєнєва, *д-р техн. наук, доц.*

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:

61002, м. Харків, вул. Кирпичова, 2
Тел. 70-76-958

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Данилов Ю. Б., Быканов С. Н., Соловей В. Н.
Тепловая интеграция процесса ректификации
многокомпонентных смесей 3

Кривільова С. П.
Енергозберігаючий метод синтезу
нанокристалічного гідроксилапатиту
біомедичного призначення 10

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Бобух А. О., Переверзева А. М.
Розробка математичних моделей комп'ютерно-
інтегрованої технології насичення очищеного
розсолу газами, отриманими регенерацією розчинів
виробництва соди 17

Лукашев В. К., Романько С. Н., Тимофеев С. В.
Моделирование непрерывного процесса
концентрирования серной кислоты в емкостном
аппарате с протоком нейтрального газа 24

Бабак Т. Г., Демирский А. В., Хавин Г. Л.
Проектирование, расчет оборудования
и моделирование работы тепловых пунктов
системы отопления и ГВС 33

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Алексахин А. А., Ена С. В., Гордиенко Е. П.
Влияние места локализации
повышенных теплотерь
на подающем трубопроводе теплосети
на средние по длине значения 51

*Селихов Ю. А., Коцаренко В. А.,
Горбунов К. А., Рябова И. Б.*
Интеграция и оптимизация работы
системы отопления коттеджа 57

Збараз Л. И., Ганжа А. Н., Павлова В. Г.
Разработка алгоритма автоматического
проектирования и оптимизации
энергетического оборудования
отопительной котельной 65

*Краснокутский Е. В., Ведь В. Е.,
Кузнецова М. М.*
Универсальные многофункциональные
вторичные носители катализаторов
очистки газовых выбросов
теплоэнергетических установок 71

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

*Тихомирова Т. С., Филенко О. Н.,
Горбунова О. В., Шестопалов А. В.*
Использование метода мозгового
штурма при изучении специальных
экологических дисциплин 79

Затверджено Вченою радою НТУ «ХП» (протокол № 8 від 07.09.2017 р.)

Інтегровані технології та енергозбереження / Щоквартальний науково-практичний журнал. –
Харків : НТУ «ХП», 2017. – № 3. – 84 с.

Збірник наукових та науково-практичних статей з питань енергозбереження та сучасних технологій
різноманітних галузей промисловості.

УДК 66.048.05:665.6

Данилов Ю.Б., Быканов С.Н., Соловей В.Н.

ТЕПЛОВАЯ ИНТЕГРАЦИЯ ПРОЦЕССА РЕКТИФИКАЦИИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СМЕСЕЙ

Вступление. Процессы переработки многокомпонентных смесей посредством ректификации позволяют получать продукты высокой чистоты при этом являются весьма энергозатратными. Снижение энергозатрат актуальная проблема, решение её связано с совершенствованием технологии переработки, модернизации оборудования, интегрирование тепловых потоков с использование пинч- анализа.

Задачу анализа снижения энергозатрат можно рассматривать как непосредственно в самой ректификационной колонне за счет снижения флегмового числа, количества теоретических тарелок, эффективности контактных устройств так и за счет рекуперации тепла греющего пара, дистиллята и высоко кипящего остатка. А также за счет использования внешних тепловых потоков для подогрева исходной смеси перед подачей в ректификационную колонну и для других целей при помощи пинч-анализа.

Одним из путей снижения энергозатрат является использование тепловых насосов, преобразующих низкопотенциальную теплоту паров верхней части колонны в теплоту более высокой температуры для обогрева кипятильника. При этом нет необходимости в дефлегматоре и затрат охлаждающей воды на конденсацию.

В ректификационных установках непрерывного действия потоки разделяемой смеси и продуктов разделения показаны на рис. 1.

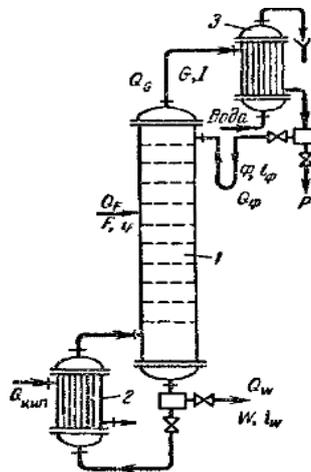


Рисунок 1 – Схема ректификационной колонны непрерывного действия:
1 – колонна; 2 – кипятильник; 3 – дефлегматор

Согласно схеме (рис. 1), в колонну поступает F кмоль исходной смеси, состав которой x_F мол. долей НК. Сверху из колонны удаляется G кмоль паров, образующих после конденсации флегму и дистиллят. Количество получаемого дистиллята P кмоль, его состав x_P мол. долей НК. На орошение колонны возвращается флегма в количестве

Φ кмоль, причеи ее состав равен составу дистиллята ($X_\Phi = x_P$ мол. долей). Снизу из колонны удаляется W кмоль остатка состава x_W мол. долей НК.

Определение минимального рабочего флегмового число обеспечивающего проведение процесса ректификации. Известно, что рациональный выбор действительного флегмового числа представляет собой сложную задачу. Это объясняется тем, что флегмовос число $R = \Phi / P$ определяет в конечном счете размеры аппарата и расходы теплоносителей (греющего агента в кипятильнике, охлаждающей воды в дефлегматоре). Следовательно, от величины R зависит капитальные затраты и эксплуатационные расходы на ректификацию.

Действительное (рабочее) флегмовое число R_d , при котором работает колонна, должно находиться в пределах $R_{\min} < R_d \leq \infty$. Исходной величиной R_{\min} для выбора действительного флегмового числа является, значение которого можно найти расчетом.

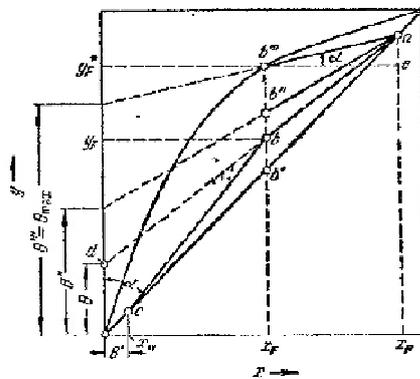


Рисунок 2 – Построение рабочих линий ректификационной колонны на $y - x$ диаграмме

Для определения R_{\min} проведем из точки b''' (см. рис. 1) горизонтальный отрезок $b''e$ до пересечения с ординатой точки a . Тангенс угла наклона рабочей линии укрепляющей части колонны при R_{\min} равен отношению катетов ae и $b'''e$ треугольника $ab'''e$, причеи катет $ae = y_P - y_F^* = x_P - y_F^*$ а катет $b'''e = x_P - x_F$.

Следовательно

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{x_P - y_F^*}{x_P - x_F}, \quad (1)$$

где x_P, x_F – концентрации жидкой фазы конечная и на исходной смеси на тарелке вводе, y_F^* – концентрация паровой фазы на равновесной линии над тарелкой ввода.

Уравнение рабочей линии для всех массообменных процессов имеет вид:

$$y = \frac{L}{G}x + \left(y_n - \frac{L}{G}x_k \right), \quad (2)$$

где L и G – расходы жидкой и паровой фаз; y, x, y_n и x_k – соответственно текущие концентрации паровой и жидкой фаз и их концентрации на верхнем конце колонны.

Согласно уравнению (2), при минимальном флегмовом числе

$$\operatorname{tg}\alpha = A = \frac{R_{\min}}{R_{\min} + 1}. \quad (3)$$

Сопоставляя выражения (1) и (3), получим

$$R_{\min} = \frac{x_P - y_F^*}{y_F^* - x_F} = \frac{y_P - y_F^*}{y_F^* - x_F}. \quad (4)$$

При этом флегмовое число имеет минимальное значение $R = R_{\min}$. рабочие линии (рис. 2) пересекаются с линией равновесия и в точке пересечения движущая сила равна нулю. Значит, для того чтобы достигнуть концентраций фаз, соответствующих их составам на питающей тарелке, потребовалась бы бесконечно большая поверхность контакта фаз, т.е. бесконечно большое число «ступенек» – теоретических ступеней разделения. Таким образом, при $R = R_{\min}$ разделение возможно только в и гипотетической ректификационной колонне *бесконечно большой высоты*. При этом расход греющего пара, который при прочих равных условиях пропорционален флегмовому числу, т.к. $G = P(R + 1)$ будет наименьший.

Если рабочая линия совпадает с диагональю диаграммы R стремится в бесконечность, т.е. колонна работает без отбора дистиллята. При $R = \infty$ потребовалась бы *наименьшая* рабочая высота колонны. Однако флегмовое число $R = \Phi/P$ может стать равным бесконечности только при $P = 0$. Это означает, что при $R = \infty$ отбора дистиллята нет, и вся жидкость, полученная в результате полной конденсации паров в дефлегматоре, возвращается в колонну в виде флегмы. В данном случае колонна работает «на себя», без выдачи продукта, что в нормальных производственных условиях, естественно, исключается. Подобный режим работы колонны удобен только для исследовательских целей.

С увеличением R возрастает количество жидкости, которое необходимо испарить в кипятильнике. При $R = \infty$ – требуется испарить максимально возможное количество жидкости. Следовательно, в этом случае расход греющего пара и энергозатраты наибольшие. Вместе с тем с увеличением R возрастает количество орошающей жидкости и диаметр аппарата (при прочих равных условиях) увеличивается.

Так как в указанных крайних точках положения рабочих линий работа ректификационной колонны не возможна, то на практике колонны работают интервале изменения флегмового числа $R_{\min} < R < \infty$.

Выбор действительного флегмового числа. Применяемый рациональный выбор действительного флегмового числа представляет собой сложную задачу от величины R зависят капитальные затраты и эксплуатационные расходы на ректификацию. В связи со сложностью технико-экономического расчета $R_{\text{опт}}$ выбор действительного флегмового числа R_d часто производят приближенно.

Так, при расчетах задаются отношением действительного флегмового числа к минимальному). Это отношение носит название *коэффициента избытка флегмы*:

$$\beta_R = \frac{R_d}{R_{\min}}. \quad (5)$$

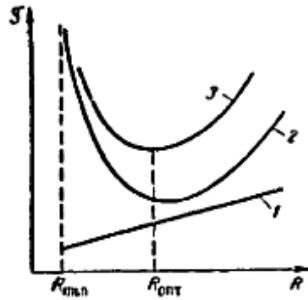


Рисунок 3 – К определению действительного флегмового числа:
 1 – эксплуатационные расходы; 2 – капитальные затраты;
 3 – общие расходы на ректификацию

В большинстве случаев значения этого коэффициента колеблются ориентировочно в пределах $\beta_R = 1,04 \div 1,5$. Однако если отсутствуют данные о величинах коэффициента избытка флегмы для систем, близких по свойствам к разделяемой, то выбор β_R определяется главным образом инженерной интуицией и является грубо приближенным.

Расчет минимально необходимого действительного флегмового числа. Авторами предлагается выполнить выбор действительного минимального флегмового числа исходя из необходимого минимального количества тепла для испарения на тарелке ввода из исходной смеси F состава x_F паров равновесной концентрации y_F^* в количестве $P + \Phi$, а также при этом дополнительно нужно учесть тепло необходимое для нагрева более холодных перетоков флегмы с верхних тарелок до тарелки ввода исходной смеси F и потерь в окружающую среду.

Количество паров на тарелке ввода равно

$$P + \Phi = P + PR. \quad (6)$$

Минимальное флегмовое число обеспечивающее отгонку смеси концентрации y_F^* при этом равно:

$$R = 1 - y_F^*. \quad (7)$$

Тогда

$$P + \Phi = P + PR = P + (1 - y_F^*)P = 2P - y_F^*P = (2 - y_F^*)P. \quad (8)$$

Если предположить, что на каждой тарелке происходит полная конденсация паров, поступающих с предыдущей тарелки теплота конденсации полностью используется для испарения паров с концентрацией согласно закону распределения $y_i^* = mx_i$, тогда поверхность контакта фаз достаточна для процессов теплопередачи. Это идеальный случай работы тарелки, регулярной насадки.

Однако на практике полная конденсации паров, поступающих с нижней тарелки, не достигается. При этом преимущественно конденсируются высоко кипящие компоненты паровой смеси, а остальная паровая смесь, имеющая температуру выше чем температура кипения раствора на тарелке, попадает в паровое пространство над тарелкой.

От потерь из-за гидравлического сопротивления тарелки (регулярной насадки) падает давление и соответственно, температура кипения смеси на тарелках. Температура кипения на выше расположенных тарелках снижается также за счет повышения концентрации низкокипящих компонентов. Выше приведенные факторы снижают КПД тарелки, а количество тарелок ректификации определяют с использованием кинетической линии вместо равновесной $y_K^* = mx_i$. При этом действительное минимальное флегмовое число определяется

$$R_{minK} = 1 - y_K^* \quad (9)$$

Действительное минимальное флегмовое число стало больше значит увеличатся энергетические затраты и количество тарелок колонны.

Соответственно действительный коэффициент избытка флегмы равен:

$$\beta_{RK} = R_D / R_{minK} \quad (10)$$

Исходя из выше сказанного при вводе на тарелку исходной смеси в количестве F , имеющую концентрацию x_F и температуру такую же как на тарелке, количество тепла можно определить по балансу тепла

$$\begin{aligned} Q_F &= Q_G + Q_{нагк} + Q_{номк} = (P + \Phi) r_G + \Phi c_F (t_F - t_G) + Q_{номк} = \\ &= (2 - y_F^*) P r_G + \Phi c_F (t_F - t_G) + Q_{номк}, \end{aligned} \quad (11)$$

где Q_F – тепло подводимое к тарелке ввода, Q_G – тепло паров с последней тарелки, $Q_{нагк}$ – затраты тепла на нагрев перетоков концентрирующей части колонны, $Q_{номк}$ – потери тепла концентрирующей части колонны, r_G – удельная теплота парообразования на последней тарелке, c_F – теплоемкость жидкости на тарелке ввода, t_F , t_G – температура жидкости на тарелке ввода и последней тарелке.

Тепловой баланс ректификационной колонны равен:

$$Q_K + Q_F + Q_\Phi = Q_G + Q_W + Q_{нагк} + Q_{наги} + Q_{номк} + Q_{ноту} \quad (12)$$

или

$$Q_K + Fi_F + \Phi i_\Phi = Gi_G + Wi_W + \Phi c_F (t_F - t_G) + (F - P - \Phi) c_w (t_w + t_F) + Q_{номк} + Q_{ноту}, \quad (13)$$

где i_G , i_F , i_W , i_Φ – энтальпия пара над последней тарелкой, исходной смеси, кубового остатка и флегмы соответственно.

Отсюда расход тепла в кипятильнике равен

$$Q_K = Gi_G + Wi_W - Fi_F - \Phi i_\Phi + \Phi c_F (t_F - t_G) + (F - P - \Phi) c_w (t_w + t_F) + Q_{номк} + Q_{ноту} \quad (14)$$

Учитывая, что $F = P + W$, $G = P(R+1)$ и $\Phi = RP$, последнее уравнение можно записать

$$\begin{aligned} Q_K &= P(R+1)i_G + Wi_W - Fi_F - RP i_\Phi + RP c_F (t_F - t_G) + \\ &+ (F - P - RP) c_w (t_w + t_F) + Q_{номк} + Q_{ноту}. \end{aligned} \quad (15)$$

Потери тепла в окружающую среду всей ректификационной колонны $Q_{пот} = Q_{потк} + Q_{потн}$ обычно выражают в долях тепла подводимого к кипятивильнику. При хорошей тепловой изоляции колонны потери составляют 3–5 %.

Если нагревание в кипятивильнике производится водяным паром, то его расход составит

$$D_{ГП} = Q_K / i_{гр} - c_{конд} t_{конд} , \quad (16)$$

где $D_{ГП}$, $i_{гр}$ – расход и энтальпия греющего пара, $c_{конд}$ и $t_{конд}$ – удельная теплоемкость и температура конденсата, соответственно.

В соответствии с технологической схемой в ректификационной установке непрерывного действия (рис. 1) одновременно производится подвод тепла в кипятивильник и подогреватель исходной смеси и отвод тепла в дефлегматоре и холодильниках для дистиллята и кубового остатка. Это дает принципиальную возможность рекуперации тепла. Так, тепло, необходимое для нагревания исходной смеси, может быть целиком или частично получено за счет использования тепла, отнимаемого при охлаждении дистиллята или кубового остатка, либо за счет тепла конденсации паров в дефлегматоре. При этом достигается экономия как греющего пара, так и охлаждающей воды. Экономии греющего пара можно получить также, используя в качестве теплоносителя паровой конденсат из кипятивильника для подогрева исходной смеси. Оптимальный вариант использования тепла выбирают на основе пинч-анализа и технико-экономического расчета.

Для снижения энергозатрат большой интерес представляет использование тепловых насосов, которые преобразуют низкопотенциальную теплоту более высокой температуры, пригодную для технологических нужд.

Известны различные типы тепловых насосов:

- компрессионные, сжимающие 1,7–2 раза пары сверху колонны и направляющие их с повышенной температурой для нагрева куба колонны в кипятивильнике;
- абсорбционные, использующие вторичный контур циркулирующей жидкости с изменением фазового состояния. Например, абсорбционные бромисто-литиевые холодильные машины предназначены для выработки одновременно холода в области положительных температур и теплоты.

Расчеты показывают, что применение компрессионного насоса снижает удельные эксплуатационные затраты на ректификацию в 2 раза, а использование холодильных машин более 3 раз.

Выводы. Предложенные решения по определению действительного минимального флегмового числа, применение в схемах ректификационных установок тепловых насосов, холодильных машин позволяют существенно для снизить энергетические затраты.

Литература

1. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., ГОТЛИНСКАЯ А.П. и др. Процессы и аппараты химической технологии. Учебник в двух частях. Под редакцией ТОВАЖНЯНСКОГО Л.Л. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2004. – 632 с.
2. Справочник нефтепереработчика: Справочник / Под ред. Г.И. Листовкина, Е.Д. Радченко, М.Г. Рудина. – Л.: Химия, 1986. – 648 с.

3. Бариненко А.В. Тимофеевский Л.С., Долотов А.Г.– Абсорбционные преобразователи теплоты. СПб.:ГУН и ПТ. 2005.– С. 338.
4. Фролов В.П., Шелинский А.Я.– Энергосбережение.– 2004.– №6.– С. 12–15.
5. Готлинская А.П. Основні масообмінні процеси та апарати хімічної технології. – Київ: ІСДО, 1995.– 212 с.

Bibliography (transliterated)

1. Tovazhnyanskiy L.L., Gotlinskaya A.P. i dr. Protsessyi i apparaty himicheskoy tehnologii. Uchebnik v dvuh chastyah. Pod redaktsiey Tovazhnyanskogo L.L.– Harkov: NTU «НПІ», 2004.– 632 p.
2. Spravochnik neftepererabotchika: Spravochnik / Pod red. G.I. Listovkina, E.D. Radchenko, M.G. Rudina. – L.:Himiya, 1986.– 648 p.
3. Barinenko A.V. Timofeevskiy L.S., Dolotov A.G.– Absorbtsionnyie preobrazovateli teploty. SPb.:GUN i PT. 2005.– P. 338.
4. Frolov V.P., Shelinskiy A.Ya.– Energoberezhenie.– 2004.– #6.– P. 12–15.
5. Gotlinskaya A.P. Osnovni masoobminni protsesi ta aparati himichnoyi tehnologii. – Kiyiv: ISDO, 1995.– 212 p.

УДК 66.048.05:665.6

Данилов Ю.Б., Биканов С.М., Соловей В.Н.

**ТЕПЛОВА ІНТЕГРАЦІЯ ПРОЦЕСУ РЕКТИФІКАЦІЇ
БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ СУМІШЕЙ**

У статті показані енергетичні витрати процесу переробки багатокомпонентних сумішей за допомогою ректифікації і деякі тенденції енергозбереження. Розглянуті варіанти зниження енергетических витрат як безпосередньо в самій ректифікації колоні за рахунок зниження флегмового числа, кількості теоретичних тарілок, ефективності контактних пристроїв так і за рахунок рекуперації тепла гріючої пари, дистилату і високо киплячого залишку, також за рахунок використання зовнішніх теплових потоків для підігрівання початкової суміші перед поданням в колону ректифікації і для іншої цілі із за допомогою пинч-аналіз.

Danilov Yu.B., Bykanov S.N., Solovej V.N.

**THERMAL INTEGRATION OF RECTIFICATION'S PROCESS
OF MULTICOMPONENT MIXTURES**

The power expenses of multicomponent mixtures by means of rectification and some tendencies of energy-savings are shown in the article. The variants of power expenses cost cutout are considered as directly in rectification colon due to the decline of phlegma number, amount of theoretical piattis, to efficiency of heat warming steam, distillate and highly boiling remain, also due to the use of external thermal streams for heating of initial mixture before a serve in a fractionator and for other aims with through a analysis.

УДК 666.842:666.333(07)

Кривільова С.П.

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИЙ МЕТОД СИНТЕЗУ НАНОКРИСТАЛІЧНОГО ГІДРОКСИЛАПАТИТУ БІОМЕДИЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Вступ

Проблема зниження енергоємності української економіки є однією з найактуальніших нині, оскільки реалії сьогоdnішнього дня такі, що Україні доводиться імпортувати не лише енергоносії, але і електроенергію. На це йде істотна доля бюджету, що збільшує бюджетний дефіцит з усіма витікаючими з цього наслідками.

Оскільки керамічна галузь традиційно споживає значну кількість енергоносіїв, енергозбереження в ній є важливим завданням. Але на відміну від виробництва вогнетривів і технічної кераміки, отримання спеціальної кераміки (у тому числі біомедичного призначення) вимагає не лише "тонкої" керамічної технології, але і споживання виключно електроенергії.

Сьогодні об'єм ринку біокерамічних матеріалів у світі оцінюється в 145 мільярдів доарів, і за оцінкою експертів, він безперервно зростатиме. І хоча сьогодні основна частина його припадає на країни "золотого мільярду", попит на цю продукцію, як очікується, зростатиме і в Україні (як і у всьому світі).

Збільшення обсягів виробництва кераміки спеціального призначення, у тому числі і штучних замінників тканин скелета, очікуване найближчими роками, обумовлює зростання попиту на електроенергію в умовах її дефіциту. У зв'язку з цим енергозбереження є важливим завданням, рішення якого може бути досягнуте шляхом розробки і використання енергозбережливих методів з одночасним удосконаленням широко розповсюджених класичних технологічних схем і використовуваного устаткування. Слід зазначити, що це в цілому відноситься до усіх галузей промисловості України без виключення, у тому числі і до виробництва спеціальної кераміки. Тому сьогодні слід приділити особливу увагу розробці нових методів синтезу керамічних матеріалів, що сприяють зменшенню споживання електроенергії і, як наслідок, зниженню питомих витрат на їх виробництво.

Мета роботи

Розробити енергосбережливий метод синтезу синтетичного нанокристалічного гідроксилапатиту $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ біомедичного призначення при отриманні його з розчинів (розчинним способом) для зниження енергетичних витрат (а саме для суттєвого зниження температури термообробки) і оцінити доцільність та ефективність використання для цього мікрохвильового випромінювання (СВЧ-випромінювання) на стадії витримання маточного розчину.

Основна частина

Для досягнення мети роботи насамперед були розглянуті існуючі методи отримання синтетичного гідроксилапатиту.

Гідроксилапатит $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ являється основою кристалічної фази і кісток скелету людини і тварин. Кристали $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ знаходяться в тісній фізико-хімічній і механічній взаємодії з органічним матриксом кісткової тканини. Для криста-

лів гідроксиапатита характерна впорядкованість розміщення в органічному матриці і структурованість [1].

Для заповнення дефектів кістково-суглобової системи людини використовується замітник пошкоджених кісткових тканин - біогенний гідроксиапатит, який отримують з кісток великої рогатої худоби, з яєчної шкаралупи і т.п. Але процес отримання $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ з кісток тварин складний, дуже енергозатратний і багатостадійний, потребує реагентів, бо дорого коштують. Не дивлячись на таку коштовну технологію, ці матеріали все одно не є абсолютно безпечними: вони мають у своєму складі патології і мутації, що характерні для живої матерії. Із-за цього у застосуванні біогенних матеріалів є певні спірні моменти. На сьогоднішній день найбільш перспективним вважається застосування [2] синтетичного аналога природнього гідроксиапатиту $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$. Синтез гідроксиапатиту здійснюється одним з наступних методів:

– **гідротермальним** – гідротермальний синтез включає реакції, що протікають при високих тисках і температурі. Гідротермальний синтез є енерговитратним, здійснюється на дорогому устаткуванні і вимагає значних матеріальних витрат. Особливістю цього методу є відповідність продукту синтезу заданому стехіометричному співвідношенню Ca/P [3,4];

– **синтезом у твердій фазі і механохімічним синтезом** в умовах механохімічної активації порошків. Синтез у твердій фазі здійснюється при протіканні дифузійних процесів при випалі при високих температурах реакційних сумішей заздалегідь подрібнених порошків. Потребує багато електроенергії і часу (є тривалим). Механохімічний синтез здійснюється зазвичай в планетарних млинах при одночасному змішуванні і інтенсивному подрібненні компонентів. При цьому в матеріалі протікають механохімічні реакції (формується механічна напруга, відбувається розрив хімічних зв'язків і формуються нові хімічні зв'язки). Синтез проводять у твердій фазі, іноді з подальшим додаванням води. Для продукту синтезу характерна неоднорідність фазового складу і структурних властивостей [5,6];

гідролізом – синтез гідроксиапатита відбувається в результаті взаємодії з водою фосфатів кальцію $\text{Ca}_4\text{P}_2\text{O}_9$ і CaHPO_4 . Процес синтезу тривалий, для продуктів синтезу характерна наявність домішок іонів, що були використані для переходу фосфатів кальцію в гідроксиапатит [7,8];

– **золь-гель методом** – для отримання гідроксиапатиту початкові реагенти переводять в колоїдний розчин, потім в гель, після чого видаляють розчинник і піддають продукт реакції термічного розкладання при відносно невисоких температурах. При високій вартості початкових реагентів цей метод дозволяє отримати досить однорідний продукт [9,10];

– **отриманням з водних розчинів** початкових реагентів, що містять іони кальцію і фосфат-іони, при збереженні рН вище 7 і при витримці осаду в спеціальних умовах. При синтезі гідроксиапатиту з водних розчинів при утворенні осаду послідовно протікають три процеси: утворення зародків кристалів - центрів кристалізації, зростання кристалів і агрегація хаотично орієнтованих дрібних кристалів. Усі ці три процеси в різних областях розчину протікають паралельно, оскільки виникнення центрів кристалізації відбувається одночасно. Продуктом синтезу є свіжеосаджений гідроксиапатит складу $\text{Ca}_{10-x}(\text{HPO}_4)_x(\text{PO}_4)_{6-x}(\text{OH})_{2-x}$ з широким (1,5÷1,67) діапазоном стехіометричного співвідношення іонів Ca/P. Продукт синтезу складається з субмікронних (нанорозмірних) часток, об'єднаних в м'які пористі конгломерати з високою поверхневою енергією і може містити аморфну фазу (таку, що погано закристалізувалася). Метод не вимагає дорогого устаткування і дорогих реагентів. Для нього характерна складність контролю

значної кількості параметрів синтезу, що управляють процесом, через що в структуру гідроксилапатиту можуть вбудовуватися іони побічних продуктів синтезу. Відтворюваність заданої морфології часток гідроксилапатиту так само викликає певні труднощі [11,12].

Сьогодні добре відомо, що мікрохвильове випромінювання багатократно інтенсифікує багато хімічних реакцій, бо викликає швидкий нагрів реакційних сумішей у всьому їх об'ємі [13]. При мікрохвильовому нагріві тепло не підводиться до реакційної суміші ззовні від зовнішнього джерела, а генерується у середині реакційної суміші в результаті взаємодії СВЧ-випромінювання з іонами в усьому об'ємі матеріалу, що опромінюється [14]. Мікрохвильове випромінювання у багатьох випадках має хорошу проникаючу здатність, оскільки нагрівання відбувається в усьому об'ємі зразка, що опромінюється.

З метою інтенсифікації процесу синтезу нанокристалічного гідроксилапатиту $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ біомедичного призначення і можливого зниження температури термообробки, а також для вивчення впливу методу та умов синтезу на характеристики отриманих високодисперсних (нано) порошків, синтез здійснювали за двома методами. Був вибраний метод співсаджень $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ з водних розчинів $\text{Ca}(\text{OH})_2$ і H_3PO_4 з витримкою у маточному розчині [15] за класичною технологією і з використанням СВЧ-випромінювання на стадії витримки отриманого осаду в маточному розчині, та проведено порівняння продуктів осадів та деяких фізико-хімічних характеристик.

В якості вихідних матеріалів для отримання гідроксилапатиту використовували $\text{Ca}(\text{OH})_2$ марок «ч.д.а» і «х.ч.», дистильовану воду, пентоксид фосфору у вигляді ортофосфорної кислоти марки «ч.д.а.». Подрібнення проводили у кульовому млині періодичної дії з корундовими тілами, що мелють, усереднення розрахункових складів робили розтиранням в корундових ступках, випалення – в корундових і цирконієвих кеглях. Рентгенофазовий аналіз проводили на установці «Drope-3». Розшифровка здійснювалась по довідкових таблицях ASTM на зразках препаратів у вигляді пігулок діаметром 10 мм і завтовшки 2 мм. Мінералогічний склад визначали за допомогою петрографічних досліджень на поляризаційному мікроскопі МІН-8 із застосуванням серії стандартних інверсійних препаратів (в яких порівняльним середовищем служить рідина з певною оптичною константою) та за допомогою електронно-мікроскопічних досліджень методами суспензій, реплік, електроннографії та мікродіфракції.

Реакційну суміш безперервно перемішували. Час перемішування реагентів варіювали від 0,5 до 6 годин.

Температуру реакційного середовища для старіння осаду, який не піддавали впливу СВЧ-випромінювання, варіювали від 0 до 80 °С (не доводили до кип'ятіння), а час старіння осаду варіювали від 40 до 180 годин.

Час опромінювання реакційної суміші під час синтезу підбирали експериментально таким чином, що б не допустити її швидкого закипання; час опромінювання складав від 10 до 30 хвилин. Потужність СВЧ-опромінювання (як і час опромінювання), яка складала від 20 до 120 Вт, підбирати експериментально. При використанні меншої за 20 Вт потужності опромінювання реакційна суміш закипає дуже повільно, що призводить до неоправданого збільшення тривалості синтезу $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$. Збільшення потужності більш 120 Вт призводить до бурхливого закипання реакційної суміші і її різкого винесення за межі посудини.

Для завершення процесів кристалізації та видалення адсорбованої води з отриманого осаду перед формуванням порошки, які не піддавали СВЧ-випромінюванню, прожарювали при температурі від 400 до 1000 °С.

Для визначення впливу стадії відстоювання осаду в маточному розчині на фазовий склад продуктів синтезу відразу після відстоювання (для синтезу за 1 методом) і мікрохвильової обробки реакційної суміші (для синтезу за 2 методом) їх відфільтрували і висушували. Синтезовані з використанням стадії мікрохвильового опромінювання реакційної суміші (2 метод) порошки гідроксилапатиту за фазовим та елементним складом порівнювали із складом гідроксилапатиту, отриманим згідно методики, викладені в [15] (1 метод), згідно якої реагенти при постійному підігріванні і інтенсивному перемішуванні повільно по краплях (на протязі 1–2 годин) змішували, а суміш неперервно перемішували впродовж 3–6 годин, після чого відстоювали на протязі 40–180 годин. Осад фільтрували і висушували. Отримані порошки подрібнювали на млині із швидкістю помелу до 800 обертів на хвилину і просіювали через сито з розміром ячейки 40 мкм. Отримані порошки є речовинами білого кольору. Перед рентгенографуванням усі зразки препаратів були піддані прожарюванню на протязі 1 години при 800 °С.

Рентгенографування проб зразків, отриманих за двома методами, підтвердило, що фазовий склад матеріалів є однофазним продуктом класичного синтезу $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$. Всі препарати (синтезовані як з використанням стадії мікрохвильового випромінювання, так і з розчинів без мікрохвильової обробки суміші) мають мономінеральний склад. На рисунку 1 наведені рентгенограми проб зразків, синтезованих методами співосадження з водних розчинів $\text{Ca}(\text{OH})_2$ і H_3PO_4 з витримкою у маточному розчині і з використанням СВЧ-випромінювання на стадії витримки отриманого осаду в маточному розчині. Результати хімічного аналізу продуктів синтезу гідроксилапатиту показали, що співвідношення Ca/P в пробах близькі до стехіометричного.

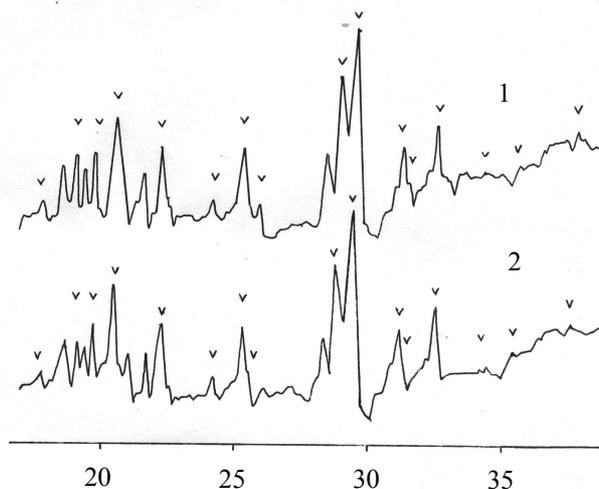


Рисунок 1 – Рентгенограми проб зразків $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$

1 – синтезованих методом співосадження з водних розчинів $\text{Ca}(\text{OH})_2$ і H_3PO_4 з витримкою у маточному розчині;

2 – синтезованих з використанням СВЧ-випромінювання на стадії витримки отриманого осаду в маточному розчині;

v – $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$

Аналіз параметрів мікроструктури, що описує морфологію і розмір часток гідроксилапатиту, показує, що використання СВЧ-випромінювання в ході синтезу сприяє зниженню розмірів часток гідроксилапатиту і кристалічності зразків. Одночасно при цьому збільшується однорідність форм кристалів і їх питома поверхня.

Очевидно, що зменшення розмірів часток пов'язане переважанням в реакційній суміші процесів зародкоутворення над процесами їх зростання, що пояснюється прискореним рухом диполів води під впливом СВЧ-опромінювання, що в свою чергу призводить до прискореного руху гідратованих іонів кальцію і фосфору в реакційній суміші.

Аналіз мікроструктур отриманих продуктів синтезу показав, що мікрохвильова обробка препаратів на стадії витримки реакційної суміші дозволяє отримати зразки з ідентичними структурними властивостями при значно нижчих температурах випалення (при 800 °С) у порівнянні з гідроксилапатитом, що отримується з розчинів за класичною технологією (при 1200 °С).

Висновок

В результаті проведених досліджень розроблено енергозберігаючий метод синтезу нанокристалічного гідроксилапатиту біомедичного призначення. Встановлено, додаткова мікрохвильова обробка порошку гідроксилапатита, синтезованого розчинним методом на стадії витримки отриманого осаду, дозволяє знизити температуру його випалення на 400 °С: з 1200 °С до 700–800 °С, тобто на 30 %.

Все існуюче обладнання, що входить в технологічну схему отримання нанокристалічного гідроксилапатиту за класичною технологією «з розчинів» при цьому способі його синтезу, увійде і до технологічної схеми отримання нанорозмірного гідроксилапатиту з використанням стадії мікрохвильового опромінювання (тобто в технологічну схему необхідно буде додати лише СВЧ-піч). Впровадження розробленої технології буде сприяти зниженню не тільки енергетичних витрат при виробництві, а й с питомих витрат.

Література

1. Hideki S. Hydroxyapatite of great promise for biomaterials / S. Hideki // *Trans. J.W.R.J.* – 1982. – Vol.17, N. 1. – P. 107–112.
2. Hench L.L. Bioceramics: From concept to clinic / L.L.Hench // *J.Amer.Ceram.Soc.* – 1991. – Vol.74. – P. 1487–1510.
3. Zhang X. Hydrothermal synthesis of hydroxyapatite rods / X.Zhang, K.S.Vecchio // *J. of Cryst. Growth.* – 2007. – Vol. 308. – P. 133–140.
4. Hao L. The growth process of hierarchical porous hydroxyapatite microspheres precipitates by propionamide and citrate through hydrothermal synthesis / L. Hao, H. Yang, S. Duatalle // *J. Mater. Lett.* – 2014. – Vol. 131. – P. 252–254.
5. Mochalesa C. Dry mechanochemical synthesis of hydroxyapatite from PCPD and CaO / C. Mochalesa, H.E. Briak-Benabdeslamb, M. Ginebraa // *Biomaterials.* – 2004. – Vol. 25. – P. 1151–1158.
6. Yeond K.C.B. Mechanochemical synthesis of nanocrystalline hydroxyapatite from CaO and CaHPO₄ / K.C.B. Yeond, J. Wang, S.C. Ng // *Biomaterials.* – 2001. – Vol. 22. – P. 2705–2712.
7. Wanda M.C. Crystalline size, microstructure and biocompatibility of hydroxyapatite nanopowders by hydrolysis of calcium hydrogen phosphate dehydrate (DCPD) / M.C.Wanda, H.-T. Chen, W.-J. Shish et al. // *Ceram. Int.* – 2015. – Vol. 41. – P. 2999–3008.
8. Shish W.-J. A study on the phase transformation of the nanosized hydroxyapatite synthesized by hydrolysis using in situ high temperature X-ray diffraction / W.- J. Shish, J.-W. Wang, M.- C.Wang et al. // *Mater. Sci. and Eng.* – 2006. – Vol. 26. – P. 1434–1438.

9. Bakan F. A novel low temperature sol-gel synthesis process for thermally stable nano crystalline hydroxyapatite / F. Bakan, O. Lacin, H. Sarac // Powder Technology. – 2013. – Vol. 233. – P. 295–302.
10. Hsieh M.F. Phase purity of sol-gel-derived hydroxyapatite ceramic / M.-F. Hsieh, L.-H. Per kg, T.- S. Chin st al. // Biomaterials. – 2001. – Vol. 22. – P. 2601–2607.
11. Kramer E. Control of hydroxyapatite nanoparticle morphology using wet synthesis techniquis / E. Kramer, J. Podurgiel., M. Wei // J. Mater. Lett. – 2014. – Vol. 131. – P.145–147.
12. Abidi S.A.Synthesis and characterization of nano-hydroxyapatitepowder using wet chemical precipitation reaction / S.A. Abidi, Q. Mustafa // J. Mater. Sci. Technol. – 2013. – Vol. 30. – P. 307–310.
13. Kingston H.M. Introduction to Microware Saple Preparation: Theory and Practice / H.M.Kingston, L.B. Jassie // American Chemical Society, Washington: DC, 1988. – 263 p.
14. Бердоносков С.С. Микроволновая химия / С.С. Бердоносков // Соросовский образовательный журнал. – 2001. – Т.7, N. 2 – С. 32–38.
15. Кривилева С.П. Исследование возможности синтеза гидроксилатапата био медицинского назначения из растворов и гидротермальным методом / С.П. Кривилева // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – N 50 (1159). – (Серія: X). – С. 41–47.

Bibliography (transliterated)

1. Hideki S. Hydroxyapatite of great promise for biomaterials / S. Hideki // Trans. J.W.R.J. – 1982. – Vol.17, N. 1. – P. 107–112.
2. Hench L.L. Bioceramics: From concept to clinic / L.L.Hench // J.Amer.Ceram.Soc.– 1991. – Vol.74. – P. 1487–1510.
3. Zhang X. Hydrothermal synthesis of hydroxyapatite rods / X.Zhang, K.S.Vecchio // J. of Cryst. Growth. – 2007. – Vol. 308. – P. 133–140.
4. Hao L. The growth process of hierarchical porous hydroxyapatite microspheres precipitates by propionamide and citrate through hydrothermal synthesis / L. Hao, H. Yang, S. Duatalle // J. Mater. Lett. – 2014. – Vol. 131. – P. 252–254.
5. Mochalesa C. Dry mechanochemical synthesis of hydroxyapatite from PCPD and CaO / C. Mochalesa, H.E. Briak-Benabdeslamb, M. Ginebraa // Biomaterials. – 2004. – Vol. 25. – P. 1151–1158.
6. Yeond K.C.B. Mechanochemical synthesis of nanocrystalline hydroxyapatite from CaO and CaHPO₄ / K.C.B. Yeond, J. Wang, S.C. Ng // Biomaterials. – 2001. – Vol. 22. – P. 2705–2712.
7. Wanda M.C. Cristalline size, microstructure and biocompatibility of hydroxyapatite nanopowders by hydrolysis of calcium hydrogen phosphate dehydrate (DCPD) / M.C.Wanda, H.-T. Chen, W.-J. Shish et al. // Ceram. Int. – 2015. – Vol. 41. – P. 2999–3008.
8. Shish W.-J. A study on the phase transformation of the nanosized hydroxyapatite synthesized by hydrolysis using in situ high temperature X-ray diffraction / W.- J. Shish, J.-W. Wang, M.- C.Wang et al. // Mater. Sci. and Eng. – 2006. – Vol. 26. – P. 1434–1438.
9. Bakan F. A novel low temperature sol-gel synthesis process for thermally stable nano crystalline hydroxyapatite / F. Bakan, O. Lacin, H. Sarac // Powder Technology. – 2013. – Vol. 233. – P. 295–302.
10. Hsieh M.F. Phase purity of sol-gel-derived hydroxyapatite ceramic / M.-F. Hsieh, L.-H. Per kg, T.- S. Chin st al. // Biomaterials. – 2001. – Vol. 22. – P. 2601–2607.

11. Kramer E. Control of hydroxyapatite nanoparticle morphology using wet synthesis techniques / E. Kramer, J. Podurgiel., M. Wei // *J. Mater. Lett.* – 2014. – Vol. 131. – P.145–147.
12. Abidi S.A. Synthesis and characterization of nano-hydroxyapatite powder using wet chemical precipitation reaction / S.A. Abidi, Q. Mustafa // *J. Mater. Sci. Technol.* – 2013. – Vol. 30. – P. 307–310.
13. Kingston H.M. Introduction to Microwave Sample Preparation: Theory and Practice / H.M. Kingston, L.B. Jassie // American Chemical Society, Washington: DC, 1988. – 263 p.
14. Berdonosov C.C. Mikrovolnovaya himiya / S.S. Berdonosov // *Sorosovskiy obrazovatelnyiy zhurnal.* – 2001. – T.7, N. 2 – P. 32–38.
15. Krivileva S.P. Issledovanie vozmozhnosti sinteza gidroksilapatita bio meditsinskogo naznacheniya iz rastvorov i gidrotermalnym metodom / S.P. Krivileva // *Vicnik NTU «ХPI».* Seriya: Himiya, himichna tehnologiya ta ekologiya. – H.: NTU «HPI», 2015. – # 50 (1159). – (Seriya: H). – P. 41–47.

УДК 666.842:666.333(07)

Кривилева С.П.

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ МЕТОД СИНТЕЗА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ГИДРОКСИЛАПАТИТА БИМЕДИЦИНСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

В статье рассмотрены различные методы получения синтетического нанокристаллического гидроксилапатита биомедицинского назначения. Выполнена оценка целесообразности синтеза $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ высокой чистоты «мокрым» способом из растворов $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и H_3PO_4 с дополнительной микроволновой обработкой полученных продуктов синтеза на стадии их выдержки в маточном растворе. Определено, что СВЧ-облучение на этой стадии позволяет снизить температуру обжига конечных продуктов на 30 %. Определены режимы термообработки, мощность и время микроволновой обработки, время выдержки в исходных растворах.

Krivileva S.P.

ENERGY-SAVING SYNTHESIS OF NANOCRYSTAL HYDROXIAPATITE FOR BIOMEDICAL APPLICATION

In the article describes on various methods for producing a synthetic nanocrystalline $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ of the biomedical use. The evaluation of the feasibility of synthesis of the nanocrystalline hydroxyapatite of high purity is made of solutions. The optimal concentration and time of components mixing, the power and time of the microwave irradiation, the environment of pH and parameters of endurance in the unitalsolution for receiving materials of the set composition and structure are defined.

УДК 681.511.4:661.333(057)

Бобух А.О., Переверзева А.М.

**РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНОЇ
ТЕХНОЛОГІЇ НАСИЧЕННЯ ОЧИЩЕНОГО РОЗСОЛУ ГАЗАМИ,
ОТРИМАНИМИ РЕГЕНЕРАЦІЄЮ РОЗЧИНІВ ВИРОБНИЦТВА СОДИ**

Вступ

Комп'ютерно-інтегрована технологія (КІТ) виробництва кальцинованої соди за аміачним способом (ВКС) має в своєму складі основні і допоміжні комп'ютерно-інтегровані технології зі складними технологічними процесами та апаратами і замкненими циклами за матеріальними потоками [1,2]. Особливість зазначених технологій полягає в змінюванні характеристик в часі із-за непередбачених порушень технологічного режиму за рахунок наявності агресивних та абразивних середовищ, які кристалізуються. Окрім того, для цих технологій характерними являються: складні залежності між вхідними та вихідними параметрами, значні запізнення за основними каналами керування тощо.

Однією із основних КІТ ВКС є комп'ютерно-інтегрована технологія насичення очищеного розсолу газами, отриманими регенерацією розчинів ВКС. Наявність замкнених циклів аміаку та вуглекислого газу значно ускладнює розробку математичних моделей цієї технології та комп'ютерно-інтегрованого керування нею.

Аналіз виконаних досліджень різних методів розробки математичних моделей комп'ютерно-інтегрованих технологій спонукає зробити висновок, що застосування методу рекурсивної регресії [3–5] серед інших дозволяє отримувати високу точність математичних моделей, які сприяють скороченню об'єму пам'яті мікропроцесорних контролерів.

Мета роботи

Розглянути теоретичні підстави та алгоритм розробки математичних моделей комп'ютерно-інтегрованої технології насичення очищеного розсолу газами, отриманими регенерацією розчинів ВКС з використанням методу рекурсивної регресії, який сприяє суттєвому скороченню об'єму пам'яті мікропроцесорних контролерів, порівнюючи з вирішенням такої ж задачі методом найменших квадратів.

Основна частина

Різноманітність методів вирішення проблеми розробки математичних моделей КІТ обумовлена, з одного боку, особливостями постановки задачі, а з другого – неоднаковістю властивостей цих технологій. Можливість використання кожного методу залежить від технологічної готовності КІТ до застосування конкретного методу, який сприяв би покращанню її ефективності функціонування за основними техніко-економічними показниками.

Під технологічною готовністю реальної технології розуміють насичення її технологічним обладнанням, для якого за допомогою сучасних засобів автоматизації, зокрема мікропроцесорних контролерів, можна отримати всю необхідну інформацію для вирішення задач керування. Для вирішення таких задач необхідно мати попередні технічні рішення по опису реальної КІТ та провести статистичний аналіз параметрів для віднесення їх до конкретного класу випадкових процесів [3–5].

Призначенням основної комп'ютерно-інтегрованої технології насичення очищеного розсолу газами, отриманими регенерацією розчинів (КІТ НОРГ, ОРГ) ВКС, являється практично повна регенерація аміаку та вуглекислого газу із фільтрової рідини і конденсатів, формування неперервного потоку парагазової суміші, що спрямовується на технологію насичення газами очищеного розсолу для отримання регламентної кількості та якості неперервного потоку амонізованого розсолу, який подається на КІТ насичення його потоками вуглекислого газу.

Складовими частинами основної КІТ НОРГ, ОРГ ВКС є наступні три технології із відповідними апаратами:

КІТ регенерації аміаку та вуглекислого газу із фільтрової рідини ВКС у складі конденсатора-холодильника газу дистиляції (КХДС), теплообмінника дистиляції (ТДС), дистилера (ДС), які являють собою дистиляційну колону, а також змішувача (реактора із мішалкою) (ЗМ), двох випарників рідини (ВІР) і параструйного ежектора (ПСЕ) (kit_1).

КІТ регенерації аміаку та вуглекислого газу із конденсатів ВКС у складі конденсатора-холодильника дистиляції слабких рідин (КХДСР), дистилера слабких рідин (ДСР) і збірника дегазованої рідини (ЗДР), які являють собою колону дистиляції слабких рідин (kit_2). Усі апарати цих двох КІТ називають елементом КІТ регенерації газів із розчинів (РГ із Р) ВКС (s_1), а самі ці КІТ представлені чотирма такими елементами $s_1 = \overline{1,4}$.

КІТ насичення очищеного розсолу зазначеними газами ВКС у складі промивача повітря вакуум-фільтрів (ПВФ), другого промивача газу карбонізаційних колон (ПГКЛ-2), промивача газу абсорбції (ПГАБ), абсорбера (АБ), які являють собою абсорбційну колону, а також пластинчатого холодильника (ПХ) і збірника амонізованого розсолу (ЗАР) (kit_3). Усі апарати цієї КІТ називають елементом КІТ ТНОРГ ВКС (s_2), а сама ця КІТ представлена також чотирма такими елементами $s_2 = \overline{1,4}$ [1].

Розглянуті три КІТ мають відомі вихідні (залежні, керовані) параметри (i) та вхідні (незалежні, керуючі, корегуючі) параметри (j). Вирішення задач розробки основних математичних моделей розглянутих КІТ за відомими вихідними $i = \overline{1,m}$ та вхідними $j = \overline{1,n}$ параметрами являє собою дуже складну математичну задачу.

Спочатку коротко опишемо застосування на практиці методу рекурсивної регресії [3–5] та алгоритм його використання при порівнянні з методом найменших квадратів [6,7].

Основою методу рекурсивної регресії є залежності:

$$\vec{\alpha}_{k+1} = \vec{\alpha}_k + \frac{(Y_{k+1} - \vec{\alpha}_k \cdot \vec{X}_{k+1}) \cdot \vec{X}_{k+1}^T \cdot P_k}{1 + \vec{X}_{k+1}^T \cdot P_k \cdot \vec{X}_{k+1}}, \quad (1)$$

$$P_k = P_{k-1} - \frac{P_{k-1} \cdot \vec{X}_k \cdot \vec{X}_k^T \cdot P_{k-1}}{1 + \vec{X}_k \cdot P_{k-1} \cdot \vec{X}_k}, \quad (2)$$

де $\vec{\alpha}_{k+1}, \vec{\alpha}_k$ – вектори оцінок параметрів математичної моделі конкретної КІТ на $(k+1)$ та (k) кроках; Y_{k+1} – значення виходу конкретної КІТ на $(k+1)$ кроці; $\vec{X}_{k+1}, \vec{X}_k^T$ – век-

тор входів та транспонований вектор входів конкретної КІТ на $(k+1)$ кроці; P_k – матриця початкових умов (діагональна матриця визначної величини).

Застосовуючи формули (1) та (2), треба провести послідовно (крок за кроком) обробку інформації про вхідні та вихідні параметри конкретної КІТ із використанням апіорної інформації та поступовим наближенням параметрів математичної моделі до реальних параметрів досліджуваних КІТ, що надає можливість суттєво скоротити об'єм пам'яті мікропроцесорного контролера (МПК), порівнюючи з вирішенням такої задачі методом найменших квадратів (МНК) [6, 7].

Для перевірки працездатності цих методів та отримання оцінки, що дозволяє виконати порівняльний аналіз їх за точністю ідентифікації і об'ємом машинної пам'яті, необхідно виконати дослідження на МПК. При цьому міру точності ідентифікації ξ (в процентах) доцільно оцінювати за відношенням їх середньоквадратичних відхилень:

$$\xi = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{h+1} (\alpha_j - \hat{\alpha}_j)^2}{\sum_{j=1}^{h+1} \alpha_j^2}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де α_j – коефіцієнти моделі конкретної КІТ, отримані за МНК; $\hat{\alpha}_j$ – коефіцієнти такої ж моделі, отримані за методом рекурсивної регресії; h – кількість параметрів моделі, яка досліджується.

З урахуванням вищенаведеного за даними експериментальних досліджень одного елементу (тобто $s_1 = 1$; $s_2 = 1$;) кожної із трьох КІТ були вибрані по одному (тобто $i = 1$) із важливих вихідних (Y_{si}) параметрів, який залежить від конкретної кількості (тобто $j = \overline{1, n}$) вхідних (X_{sj}) параметрів. За МНК були розраховані коефіцієнти (a_{sj}) математичних моделей та прості середні арифметичні значення параметрів ($\overline{Y_{si}}, \overline{X_{sj}}$) у загальному вигляді:

$$\text{для } (kit_1) \quad Y_{11} = a_{11} \cdot X_{11} + a_{12} \cdot X_{12} + a_{13} \cdot X_{13} + a_{14} \cdot X_{14} + a_{15} \cdot X_{15} + a_{16} \cdot X_{16} + C_1, \quad (4)$$

$$\text{для } (kit_2) \quad Y_{12} = a_{17} \cdot X_{17} + a_{18} \cdot X_{18} + a_{19} \cdot X_{19} + C_2, \quad (5)$$

$$\text{для } (kit_3) \quad Y_{21} = a_{21} \cdot X_{21} + a_{22} \cdot X_{22} + a_{23} \cdot X_{23} + a_{24} \cdot X_{24} + a_{25} \cdot X_{25} + C_3, \quad (6)$$

де Y_{11} – температура пара-газової суміші із КХДС (kit_1) в нижню частину АБ (kit_3), $\overline{Y_{11}} = 59$ °С; X_{11} – витрати холодної води в холодильну частину КХДС, $\overline{X_{11}} = 143$ м³/год.; X_{12} – витрати фільтрової рідини в конденсаторну частину КХДС, $\overline{X_{12}} = 120$ м³/год.; X_{13} – витрати пари в нижню частину ДС, $\overline{X_{13}} = 35$ т/год.; X_{14} – витрати вапняної суспензії в верхню частину ЗМ, $\overline{X_{14}} = 43$ м³/год.; X_{15} – температура рідини із КХДС в ТДС, $\overline{X_{15}} = 74$ °С; X_{16} – температура газу із ТДС в КХДС, $\overline{X_{16}} = 90$ °С; $a_{11}, a_{12}, a_{13}, a_{14}, a_{15}, a_{16}$ – коефіцієнти при відповідних параметрах математичної моделі для (kit_1); Y_{12} – температура пара-газової суміші із КХДСР (kit_2) в нижню частину АБ

(kit_3), $\bar{Y}_{12} = 59$ °C; X_{17} – витрати холодної води в холодильну частину КХДСР, $\bar{X}_{17} = 70$ м³/год.; X_{18} – витрати слабкої рідини в конденсаторну частину КХДСР, $\bar{X}_{18} = 43$ м³/год.; X_{19} – температура рідини в верхній частині ДСР, $\bar{X}_{19} = 75$ м³/год.; a_{17}, a_{18}, a_{19} – коефіцієнти при відповідних параметрах математичної моделі для (kit_2); Y_{21} – температура амонізованого розсолу із ПХ (kit_3), який спрямовується на КІТ насичення його вуглекислими газом, $\bar{Y}_{21} = 30$ °C; X_{21} – витрати холодної води в ПХ, $\bar{X}_{21} = 164$ м³/год.; X_{22} – витрати холодної води в нижню частину АБ, $\bar{X}_{22} = 94$ м³/год.; X_{23} – витрати очищеного розсолу в ПГКЛ-2, $\bar{X}_{23} = 84$ м³/год.; X_{24} – температура парагазової суміші із АБ в ПГАБ, $\bar{X}_{24} = 68$ °C; X_{25} – температура амонізованого розсолу із АБ в ПХ, $\bar{X}_{25} = 62$ °C; $a_{21}, a_{22}, a_{23}, a_{24}, a_{25}$ – коефіцієнти при відповідних параметрах математичної моделі для (kit_3); C_1, C_2, C_3 – вільні члени в формулах (4), (5) і (6) відповідно.

За цими ж експериментальними даними коефіцієнти залежностей (4), (5) і (6) були визначені методом рекурсивної регресії. При цьому для ліквідації впливу абсолютних величин вхідних та вихідних параметрів на збіжність оцінок, експериментальні дані попередньо нормувались за формулою:

$$X_{kl} = \frac{\bar{X}_{kl} - \bar{X}_k}{\sigma_{X_k}}, \quad (7)$$

де σ_{X_k} – середньоквадратичне відхилення k -го параметру; $k = \overline{1, h}$ – кількість параметрів, що нормувались; $l = \overline{1, N}$ – кількість опитів в експериментальній вибірці.

В табл. 1 показані результати розрахунків, отриманих з урахуванням вище наведених формул (1), (2), (3), що характеризують залежність відносної помилки (точності) ідентифікації ξ від величин діагональних елементів матриці P_k при обробці масивів експериментальних даних для kit_1, kit_2, kit_3 за методом рекурсивної регресії.

Таблиця 1 – Залежність помилки ідентифікації ξ від величин діагональних елементів матриці P_k при обробці масивів експериментальних даних для kit_1, kit_2, kit_3

kit_1	P_k	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
	ξ	0,284	0,028	0	0,039	0,953	1,765	2,536
kit_2	P_k	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
	ξ	0,347	0,048	0,003	0,835	1,291	2,934	5,113
kit_3	P_k	10^1	10^2	10^3	10^4	10^5	10^6	10^7
	ξ	0,271	0,039	0,001	0,054	0,984	1,879	2,761

Аналіз даних табл. 1 свідчить, що оптимальним значенням діагональної матриці визначної величини для kit_1, kit_2, kit_3 отримана величина $P_0 = 10^3$.

За методами найменших квадратів (НК), а також рекурсивної регресії (РР) (з урахуванням оптимального значення діагональної матриці) крок за кроком були розраховані та приведені в табл. 2, 3 та 4 значення коефіцієнтів та вільних членів математичних моделей за формулами 4, 5, 6 (відповідно) для отриманих відносних помилок ξ .

Таблиця 2 – Розраховані за методами найменших квадратів (НК) і рекурсивної регресії (РР) значення коефіцієнтів і вільних членів математичних моделей для kit_1

Методи	a_{11}	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}	C_1	ξ
НК	0,2072	0,1932	0.3247	0,1325	-0,1068	-0,0879	5,1357	-
РР при $P_0=10^3$	0,2072	0,1932	0.3247	0,1325	-0,1068	-0,0879	5,1357	0

Таблиця 3 – Розраховані за методами найменших квадратів (НК) і рекурсивної регресії (РР) значення коефіцієнтів і вільних членів математичних моделей для kit_2

Методи	a_{17}	a_{18}	a_{19}	C_2	ξ
НК	0,5234	0,6172	-0,1315	5,7084	-
РР при $P_0=10^3$	0,5228	0,6153	-0,1319	5,6913	0,003

Таблиця 4 – Розраховані за методами найменших квадратів (НК) і рекурсивної регресії (РР) значення коефіцієнтів і вільних членів математичних моделей для kit_3

Методи	a_{21}	a_{22}	a_{23}	a_{24}	a_{25}	C_3	ξ
НК	0,1416	0,0997	0,2017	-0,2743	-0,0526	2,9835	-
РР при $P_0=10^3$	0,1415	0,0996	0.2015	-0,2746	-0,0527	2,9806	0,001

Аналіз даних табл. 2, 3, 4 показує, що за методом рекурсивної регресії отримані значення коефіцієнтів усіх трьох математичних моделей із використанням апріорної інформації та поступовим (крок за кроком) наближенням параметрів математичної моделі до реальних параметрів досліджуваних КІТ, що надає суттєве скорочення об'єму пам'яті сучасних багатофункціональних мікропроцесорних контролерів, порівнюючи з вирішенням такої ж задачі методом найменших квадратів.

Висновок

В результаті досліджень розглянуті теоретичні підстави та алгоритм розробки математичних моделей комп'ютерно-інтегрованої технології насичення очищеного розсолу газами, отриманими регенерацією розчинів ВКС із використанням методу рекурсивної регресії, який сприяє значному скороченню об'єму пам'яті сучасних контролерів, порівнюючи з вирішенням такої ж задачі методом найменших квадратів.

Література

1. Зайцев И.Д. Производство соды [Текст] / И.Д. Зайцев, Г.А. Ткач, Н.Д. Стоев. – М.: Химия. – 1984. – 312 с.
2. Бобух А.А. Автоматизированная система управления технологическими процессами содового производства: Обзорная информация [Текст] / А.А. Бобух, В.М. Момот, Л.А. Байбакова. – М.: НИИТЭХИМ. – 1981. – 36 с.
3. Kushner H.J. Stochastic Approximation and Recursive Algorithms and Applications [Tekst] / H.J. Kushner, G.G. Yin. – New-York: Springer-Verlag-New-York—Inc., 2003. – 498 p.
4. Мальцев А.И. Алгоритмы и рекурсивные функции [Текст] / А.И. Мальцев. – М.: Наука, 1986. – 367 с.
5. Бобух А.А. Оценка некоторых параметров объектов производства соды рекурсивными методами [Текст] / А.А. Бобух, Д.А. Ковалев, М.А. Подустов, А.Н. Переверзева // Вісник НТУ "ХПІ". – Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – 2014. № 51 (1093). – С. 11–15.
6. Дорф Р. Современные системы управления [Текст] / Р. Дорф, Р. Бишоп, пер. с англ.: Б.И. Копылова. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2004. – 832 с.
7. Трегуб В.Г. Основы комп'ютерно-інтегрованого керування [Текст] / В.Г. Трегуб. – К. : НУХТ. – 2005. – 191 с.

Bibliographi (transliterated)

1. Zaytsev I. D. Proizvodstvo sodyi [Tekst] / I. D. Zaytsev, G. A. Tkach, N. D. Stoev. – Moskow: Himiya. 1984. – 264 p.
2. Bobukh A. A. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya tehnologicheskimi protsessami sodovogo proizvodstva: Obzornaya informatsiya [Tekst] / A. A. Bobukh, V. M. Momot, L. A. Baybakova. – M.: NIITEKHIM. 1981. – 36 p.
3. Kushner H. J. Stochastic Approximation and Recursive Algorithms and Applications [Tekst] / H.J. Kushner, G.G. Yin. – New-York: Springer-Verlag-New-York—Inc., 2003. – 498 p.
4. Mal'cev A.I. Algoritmy i rekurzivnye funktsii (Algorithms and recursive functions) [Tekst] / A.I. Mal'cev. – Moskow: Nauka, 1986. – 367 p.
5. Bobukh A. A. Otsenka nekotorykh parametrov ob'ektov proizvodstva sody rekurzivnymi metodami [Tekst] / A. A. Bobukh, D. A. Kovalov, M. A. Podustov, A. M. Per-everzieva A. M. // Visnik NTU «KHPI». – 2014. № 51 (1093). – P. 11–15.
6. Dorf R. C. Sovremennye sistemy upravleniya. [Tekst] / R C.Dorf, R. H. Bishop – Moskow: Laboratoriua Basovykh Snaniy Publ., 2004. – 832 p.
7. Tregub V. G. Osnovi komp'yuterno-integrovanogo keruvannya [Tekst] / V. G. Tregub. – K. : NUHT. – 2005.– 191 p.

УДК 681.511.4:661.333(057)

Бобух А.А., Переверзева А.Н.

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КОМПЬЮТЕРНО-ИНТЕГРИРОВАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ НАСЫЩЕНИЯ ОЧИЩЕННОГО РАССОЛА ГАЗАМИ, ПОЛУЧЕННЫХ РЕГЕНЕРАЦИЕЙ РАСТВОРОВ ПРОИЗВОДСТВА СОДЫ

В результате исследований рассмотрены теоретические основы и алгоритм разработки математических моделей компьютерно-интегрированной технологии насыщения очищенного рассола газами, полученными регенерацией растворов ПКС с использованием метода рекурсивной регрессии, который способствует значительному сокращению объема памяти современных контроллеров, сравнительно с решенем такой же задачи методом наименьших квадратов.

Bobukh A.O., Pereverzieva A.M.

DEVELOPMENT OF MATHEMATICAL MODELS OF COMPUTER-INTEGRATED TECHNOLOGY OF SATURATION OF THE CLEANED DISSOLE WITH GASES OBTAINED BY REGENERATION OF SODIUM SOLUTIONS

As a result of the research, the theoretical foundations and the algorithm for developing mathematical models of computer-integrated saturation technology for purified brine by gases obtained by regenerating production of soda ash solutions using the recursive regression method are considered, which contributes to a significant reduction in the memory capacity of modern controllers, compared with the solution of the same problem by least squares.

Лукашев В.К., Романько С.Н., Тимофеев С.В.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО ПРОЦЕССА КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ В ЕМКОСТНОМ АППАРАТЕ С ПРОТОКОМ НЕЙТРАЛЬНОГО ГАЗА

Введение. В ряде отраслей химической промышленности (производство взрывчатых веществ, анилиноокрасочная отрасль и др.) образуется большое количество разбавленной серной кислоты, которая подлежит концентрированию. Концентрирование заключается в удалении из кислоты воды, что достигается ее нагреванием через стенку аппарата или непосредственным контактом с теплоносителем. Наибольшее распространение получил второй способ с барботированием через кислоту высокотемпературных (600–800 °С) топочных газов, получаемых сжиганием природного газа или мазута [1]. В данном случае топочные газы можно рассматривать не только как теплоноситель, но и как дополнительный компонент, аналогично перегонке в токе инертного газа [2].

Используя эффект инертного (нейтрального по отношению к компонентам кислоты) газа процесс концентрирования серной кислоты было предложено организовать следующим образом: нагревание кислоты осуществлять через стенку аппарата, а через кислоту барботировать нейтральный (инертный) газ, например, воздух [3]. Такой способ имеет ряд преимуществ, к которым в первую очередь относится возможность использования теплоносителей с более низкой температурой (100–200 °С), а соответственно позволяет отказаться от сжигания дефицитных видов топлива. Это связано с тем, что, согласно закона Дальтона, наличие в аппарате нейтрального газа приводит к эффекту, который аналогичен снижению давления, что и объясняет возможность вести процесс концентрирования при температуре ниже температуры кипения кислоты [4].

Целью данной работы является разработка математической модели и проведение на ее основе исследования непрерывного процесса концентрирования серной кислоты в емкостном аппарате при испарении компонентов кислоты в поток нейтрального газа в случае подвода теплоты через стенку аппарата.

Разработка математической модели. При разработке математической модели концентрирования кислоты примем следующие допущения и условия моделирования:

- кислоту будем рассматривать как смесь воды с моногидратом H_2SO_4 (гидратом серного ангидрида $SO_3 \cdot H_2O$), а ее концентрирование – как процесс испарения этих компонентов, имеющих разную летучесть;
- сопротивление массопереносу со стороны жидкой фазы не учитываем, что возможно при достаточно интенсивном ее перемешивании;
- температуру образовавшихся при испарении паров принимаем равной температуре жидкой кислоты;
- считаем, что образовавшиеся пары достаточно быстро смешиваются с нейтральным газом;

Для математического описания используем расчетную схему, приведенную на рисунке 1.

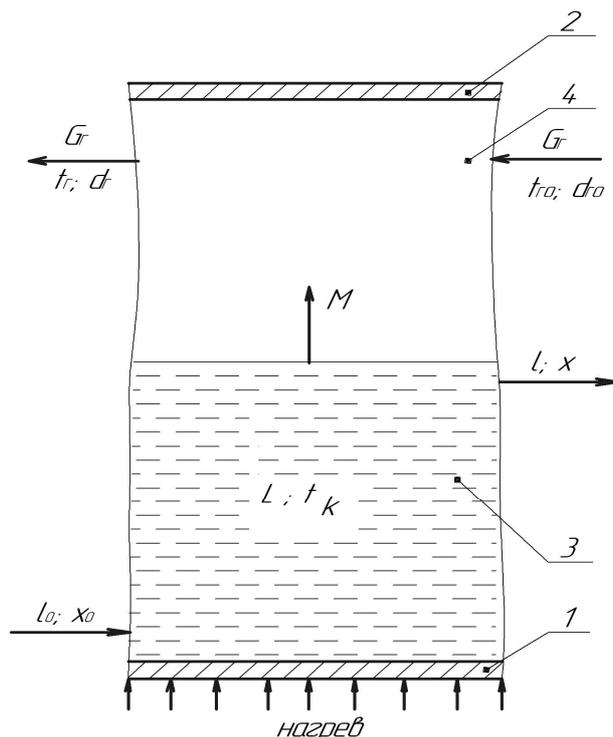


Рисунок 1 – Расчетная схема концентрирования серной кислоты с протоком нейтрального газа:
1 – дно аппарата; 2 – крышка; 3 – жидкая кислота; 4 – свободное пространство

Согласно этой схеме кислота, находящаяся в количестве L (кг) в емкостном аппарате, нагревается через его дно 1 до заданной температуры t_k (°C), которая затем поддерживается постоянной за счет регулирования величины подводимой теплоты. В аппарат непрерывно вводится поток кислоты l_0 (кг/с) с массовой долей воды x_0 и выводится поток l (кг/с) с массовой долей воды x так, что количество кислоты в аппарате остается постоянным ($L = \text{const}$). В результате нагревания кислота испаряется в свободное пространство аппарата, ограниченное крышкой 2, образуя поток паров M (кг/с). В свободное пространство вводится также поток нейтрального газа G_r (кг/с), который захватывает пары кислоты и в виде парогазовой смеси выходит из аппарата. За ключевой компонент кислоты в данном случае принимаем воду, соответственно поток нейтрального газа будем характеризовать начальным влагосодержанием d_{r0} (кг воды/кг сухого газа) и температурой t_{r0} (°C) на входе в аппарат, а также влагосодержанием d_r (кг воды/кг сухого газа) и температурой t_r (°C) на выходе из аппарата. Будем рассматривать процесс концентрирования кислоты после его выхода на установившийся режим, когда все его параметры постоянны во времени (стационарный процесс).

На основании таких представлений о процессе концентрирования установим зависимость массовой доли воды в кислоте x на выходе из аппарата от величины потока l_0 на входе в аппарат. Для этого запишем следующие уравнения:

– уравнение материального баланса в целом по кислоте

$$l_0 - l = M, \quad (1)$$

– уравнение материального баланс по воде

$$l_0 x_0 - lx = yM, \quad (2)$$

где y – массовая доля воды в парах кислоты;
– уравнение массоотдачи воды в газовую фазу

$$\beta(P_{BH} - P_B)F = yM, \quad (3)$$

где β – коэффициент массоотдачи воды в газовую фазу, $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{Па}$; P_{BH} – давление насыщенного водяного пара при температуре газовой фазы, Па; P_B – парциальное давление водяного пара в газовой фазе, Па; F – площадь поверхности испарения, м^2 .
– уравнение материального баланса по воде для нейтрального газа

$$G_r(d_r - d_{r0}) = yM, \quad (4)$$

где G_r – массовый поток (расход) абсолютно сухого нейтрального газа, кг/с ;
– уравнения относительного содержания компонента кислоты в газовой фазе:
для воды

$$\frac{yM}{G_r} = \frac{\mu_B P_B}{\mu_r P_r}, \quad (5)$$

– для моногидрата H_2SO_4

$$\frac{y_H M}{G_r} = \frac{\mu_H P_H}{\mu_r P_r}, \quad (6)$$

где P_r, P_H , – парциальные давления соответственно нейтрального газа и пара моногидрата H_2SO_4 в газовой фазе, Па; y_H – массовая доля моногидрата H_2SO_4 в парах кислоты; μ_B, μ_r, μ_H , – масса одного киломоля соответственно воды, нейтрального газа и моногидрата H_2SO_4 , кг/кмоль .

Для получения расчетных зависимостей проведем преобразование приведенных уравнений.

Выразив поток паров кислоты через скорость ее испарения (удельный поток) w ($\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$) как

$$M = wF, \quad (7)$$

подставим полученное выражение (7) в уравнения (1) и (2). Совместное решение этих уравнений дает зависимости, связывающие входной и выходной поток кислоты с ее составом на выходе из аппарата

$$l_0 = wF \frac{y - x}{x_0 - x}, \quad (8)$$

$$l = wF \left(\frac{y-x}{x_0-x} - 1 \right). \quad (9)$$

Используя выражение (7), из уравнения (3) выразим массовую долю воды в парах кислоты, входящую в зависимости (8) и (9)

$$y = \frac{\beta}{w} (P_{BH} - P_B). \quad (10)$$

Величину парциального давления пара воды в газовой фазе P_B , входящую в уравнение (10), найдем из уравнений (5) и (6), применив закон Дальтона, который в данном случае имеет вид

$$P - P_\Gamma = P_B + P_H, \quad (11)$$

где P – общее давление в газовой фазе, Па.

Для этого из уравнений (5) и (6), с учетом того, что $y_H = 1 - y$, выразим парциальное давление моногидрата H_2SO_4

$$P_H = \frac{(1-y)\mu_B P_B}{y\mu_H}$$

и подставив его в уравнение (11), запишем последнее в следующем виде

$$P_\Gamma = P - aP_B \quad (12)$$

где $a = 1 + \frac{(1-y)\mu_B}{y\mu_H}$.

Ввиду малой летучести моногидрата H_2SO_4 содержание воды значительно превышает его содержание в парах кислоты (для 90 %-ной кислоты $y_H \approx 0,1$ [1]). Это позволяет в практических расчетах принимать $a = 1$.

Учитывая, что левая часть уравнения (5) представляет собой составляющую влажосодержания нейтрального газа, которая образуется за счет испарения воды из кислоты, данное уравнение запишем в следующем виде

$$d_\Gamma - d_{\Gamma 0} = \frac{\mu_B P_B}{\mu_\Gamma P_\Gamma}. \quad (13)$$

Тогда, исходя из уравнений (12) и (13) получим

$$P_B = \frac{(d_\Gamma - d_{\Gamma 0})\mu_\Gamma P}{\mu_B + a(d_\Gamma - d_{\Gamma 0})\mu_\Gamma}. \quad (14)$$

Величина общего давления в газовой фазе, входящего в формулу (14), выражается как алгебраическая сумма давлений $P = B \pm P_{изб}$, где B – атмосферное давление, Па; $P_{изб}$ – избыточное давление внутри аппарата, которое в зависимости от того как будет организована подача нейтрального газа в аппарат принимают со знаком «+» при нагнетании нейтрального газа или со знаком «-» при отсасывании (разряжении). При небольших значениях $P_{изб}$ можно принимать $P = B$.

Составляющую влагосодержания нейтрального газа, образующуюся за счет испарения воды из кислоты, которая входит в формулу (14), найдем используя эту формулу и уравнения (3) и (4). В результате соответствующих преобразований получим квадратное уравнение вида

$$(d_{Г} - d_{Г0})^2 + \rho(d_{Г} - d_{Г0}) - q = 0, \quad (15)$$

где $\rho = \frac{\mu_B}{a\mu_{Г}} + \frac{\beta F}{G_{Г}} \left(\frac{P - aP_{ВН}}{a} \right)$, $q = \beta F P_{ВН} \mu_B$.

За величину этой составляющей влагосодержания принимаем действительный положительный корень уравнения (15).

Необходимые для расчета процесса концентрирования значения скорости испарения кислоты w и коэффициента массоотдачи воды в газовую фазу β , при использовании в качестве нейтрального газа воздуха, могут быть определены из эмпирических уравнений полученных в работах [5, 6]. Эти уравнения имеют вид

$$w = w_0 e^{k_w x}, \quad (16)$$

$$Nu_{Д} = Nu_{Д0} e^{k_{\beta} x}, \quad \beta = \frac{Nu_{Д} D}{\delta} \frac{\mu_B}{RT_{Г}}, \quad (17)$$

где w_0 , $Nu_{Д0}$, k_w , k_{β} – экспериментально определяемые коэффициенты; R – газовая постоянная, Дж/кмоль·гр; $T_{Г}$ – температура газовой фазы, К; δ – диаметр аппарата (свободной поверхности кислоты), м; D – коэффициент диффузии пара воды в воздухе, м²/с.

Расчет зависимости состава кислоты от ее потока на входе в аппарат для конкретных режимов проведения процесса концентрирования, задаваемых параметрами $t_{К}$; v ; $t_{Г0}$; $d_{Г0}$; x_0 ; F ; δ проводится в нижеописанной последовательности.

Для конкретного набора указанных параметров на основании ранее полученных экспериментальных данных [5,6] определяем значения коэффициентов в уравнениях (16) и (17): w_0 , $Nu_{Д0}$, k_w , k_{β} . При этом необходимо учитывать возможность перехода через критическое значение массовой доли воды в кислоте $x_k \approx 0,2$ [5]. Далее, задаваясь значениями массовой доли воды в кислоте на выходе из аппарата x для каждого ее значения проводим расчеты.

1. Используя уравнения (16) и (17) рассчитываем значение скорости испарения кислоты w и коэффициента массоотдачи воды в газовую фазу β .

2. Принимая за температуру газовой фазы (парогазовой смеси) $t_r = (t_k + t_{r0})/2$, из справочных таблиц определяем значение давления насыщенного водяного пара $P_{вн}$ и, считая, что $a = 1$, вычисляем коэффициент p и свободный член q уравнения (15). В результате его решения находим величину $(d_r - d_{r0})$.

3. Вычисляем по формуле (14) значение парциального давления пара воды в газовой фазе P_v .

4. Используя уравнение (10) рассчитываем значение массовой доли воды в парах кислоты y . При этом, учитывая условие $y \leq 1$, при расчетном значении $y > 1$, принимаем $y = 1$.

5. Рассчитываем входной поток кислоты l_0 по зависимости (8) и, при необходимости, выходной поток l по зависимости (9).

По результатам проведенных расчетов для разных значений массовой доли воды в выходном потоке кислоты x строим зависимости $x = f(l_0)$ при заданных параметрах процесса концентрирования.

Результаты исследования. Моделирование непрерывного процесса концентрирования серной кислоты проводили для аппарата диаметром $\delta = 0,1$ м при использовании воздуха в качестве нейтрального газа. Полученные, при этом, графики зависимостей массовой доли воды в концентрированной кислоте от величины потока исходной кислоты при разных параметрах процесса концентрирования приведены на рисунке 2.

Анализ полученных данных показывает, что с увеличением потока исходной кислоты массовая доля воды на выходе из аппарата повышается, приближаясь к ее содержанию в исходной кислоте. Это можно объяснить уменьшением времени концентрирования кислоты с увеличением ее расхода, которое в непрерывном процессе связано со средним временем пребывания кислоты в аппарате.

С увеличением количества подаваемого в аппарат воздуха, выраженного через его условную скорость [5], и температуры нагревания кислоты массовая доля воды в ней снижается (кислота становится более концентрированной) (рис. 2а, б). Это вызвано увеличением скорости испарения компонентов кислоты, из которых вода имеет более низкую температуру кипения.

Температура подаваемого в аппарат воздуха практически не влияет на зависимость массовой доли воды в кислоте от подачи исходной кислоты (рис. 2в). Некоторое расслоение кривых в данном случае очевидно связано с разбросом экспериментальных данных при определении коэффициентов в уравнениях (15) и (17). Такое влияние температуры воздуха объясняется тем, что в рассмотренных температурных режимах процесса концентрирования тепловой поток за счет теплообмена между поверхностью кислоты и воздухом незначителен по сравнению с тепловым потоком, выносимым в воздух парами кислоты. Причем в данном случае, при температуре воздуха ниже температуры кислоты $t_{r0} < 142^\circ C$ (зависимости 1,2,3), теплоотдача идет от поверхности кислоты к воздуху, при $t_{r0} > 142^\circ C$ (зависимость 5) – от воздуха к поверхности кислоты, что еще в большей степени нивелирует влияние температуры воздуха на указанную зависимость.

Как следует из рисунка 2г, влияние содержания воды в исходной кислоте (начальной концентрации кислоты) на зависимость массовой доли воды от подачи кислоты на графиках проявляется слабо.

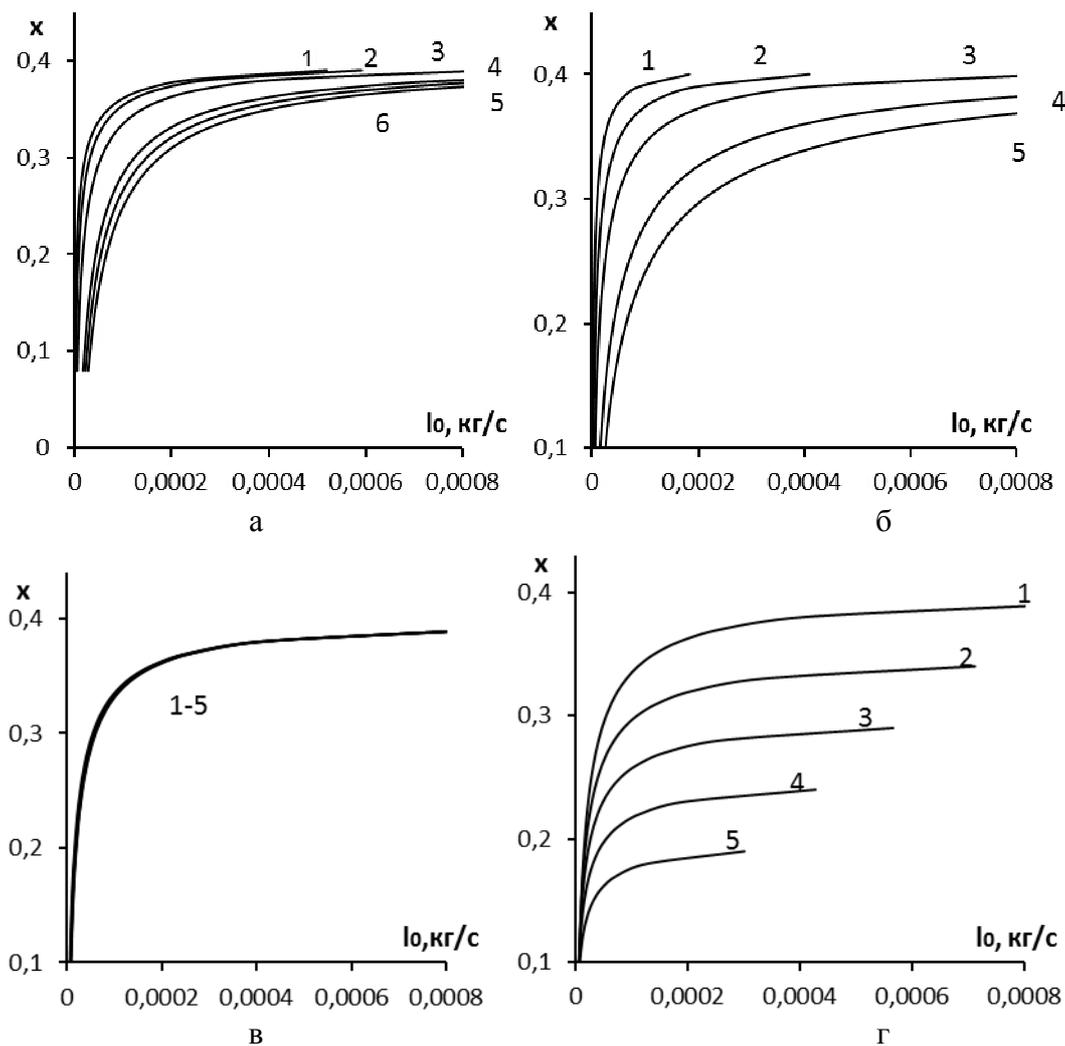


Рисунок 2 – Влияние параметров процесса концентрирования на зависимость массовой доли воды в кислоте от ее потока на входе в аппарат:

а) скорости нейтрального газа в аппарате при $t_{Г0} = 20^{\circ}C$; $x_0 = 0,4$; $t_{Г0} = 20^{\circ}C$
 (1 – $v = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$; 2 – $v = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$; 3 – $v = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$; 4 – $v = 7,8 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$;
 5 – $v = 8,8 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$; 6 – $v = 10,0 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$);

б) температуры кислоты при $x_0 = 0,4$; $v = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$; $t_{Г0} = 20^{\circ}C$
 (1 – $t_k = 100^{\circ}C$ $t_k = 100^{\circ}C$; 2 – $t_k = 120^{\circ}C$; 3 – $t_k = 142^{\circ}C$;
 4 – $t_k = 180^{\circ}C$; 5 – $t_k = 200^{\circ}C$);

в) температуры нейтрального газа при $t_k = 142^{\circ}C$; $x_0 = 0,4$; $v = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$
 (1 – $t_{Г0} = 20^{\circ}C$; 2 – $t_{Г0} = 50^{\circ}C$; 3 – $t_{Г0} = 100^{\circ}C$; 4 – $t_{Г0} = 142^{\circ}C$; 5 – $t_{Г0} = 200^{\circ}C$);

г) начальной массовой доли воды в кислоте при $t_k = 142^{\circ}C$; $v = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$; $t_{Г0} = 20^{\circ}C$
 (1 – $x_0 = 0,4$; 2 – $x_0 = 0,35$; 3 – $x_0 = 0,3$; 4 – $x_0 = 0,25$; 5 – $x_0 = 0,2$)

Это связано с тем, что указанные зависимости находятся в разных диапазонах изменения массовой доли воды в кислоте и их кривые на первый взгляд подобны друг другу. Однако при использовании в качестве одной из координат относительной массо-

вой доли (отнесенной к начальной массовой доле) показывает, что имеет место определенное расслоение этих кривых и свидетельствует, что с уменьшением содержания воды в исходной кислоте интенсивность процесса концентрирования в диапазоне изменения начальной массовой доли воды до $x = 0,2$ явно снижается (рис. 3).

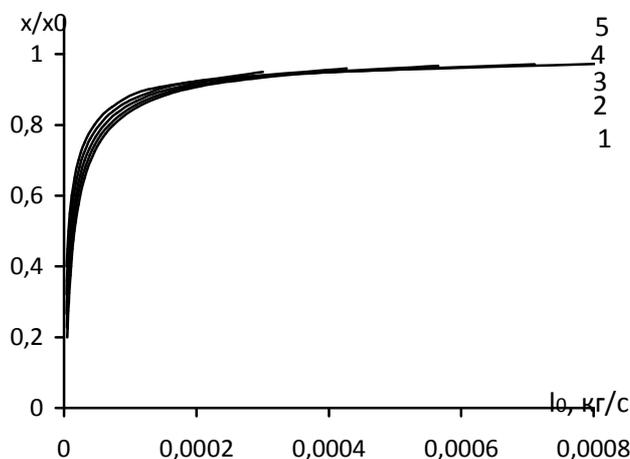


Рисунок 3 – Зависимость относительной массовой доли воды в кислоте от ее потока на входе в аппарат при разном содержании воды в исходной кислоте:

$$1 - x_0 = 0,4; 2 - x_0 = 0,35; 3 - x_0 = 0,3; 4 - x_0 = 0,25; 5 - x_0 = 0,2$$

$$(\text{при } t_K = 142^{\circ}C; v = 3,9 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}; t_{r0} = 20^{\circ}C)$$

Выводы. Разработана математическая модель непрерывного процесса концентрирования серной кислоты испарением в поток нейтрального газа в условиях ее нагревания через стенку аппарата. Модель основана на предложенных физических представлениях о таком процессе и математическом описании, включающем уравнения материального баланса, уравнение массоотдачи в газовую фазу при испарении, уравнения относительного содержания компонентов кислоты в газовой фазе, а также эмпирические уравнения, полученные на основании ранее проведенных экспериментальных исследований. Результаты исследования на разработанной модели позволили установить закономерности изменения состава концентрируемой кислоты от параметров процесса. Алгоритм расчета, основанный на разработанной модели, может быть использован для обоснования режимов концентрирования кислоты.

Литература

1. Лебедев А.Я. Установки для денитрации и концентрирования серной кислоты. / А.Я. Лебедев. М.: Химия. 1972. – 240 с.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. / А.Г. Касаткин. М.: Химия. 1971. – 784 с.
3. Лукашов В.К. Спосіб концентрування сірчаної кислоти / В.К. Лукашов, С.М. Романько, С.В. Тимофіїв, А.М. Гудзовський // Патент 97392 Україна, МРК С01В17/88, Заявл. 13.10.2014; Опубл. 10.03.2015. Бюл. №5.
4. Серафимов Л.А. Соблюдение первого закона Коновалова в процессе ректификации с инертным газом / Л.А. Серафимов, А.В. Фролкова // Вестник МИТХТ. – 2008. – №2. – С. 45–52.

5. Lukashov V. Rate of components evaporation from sulfuric acid solution during its concentrating in air flow / V. Lukashov, S. Romanko, S. Timofeev, A. Protsenko // Chemistry and Chemical technology. – 2017. – V. 11. – No. 3. – P. 344–348.

6. Лукашев В.К. Массоперенос при концентрировании серной кислоты испарением в поток воздуха / В.К. Лукашев, С.Н. Романько, С.В. Тимофеев // Журнал инженерных наук. – 2016. – №2. – С. В1–В7.

Bibliography (transliterated)

1. Lebedev A.M. Ustanovky dlya denitratsiyi i kontsentrirovaniya sernoy kisloty / A.M. Lebedev. M.: Khimiya, 1972. – 240 p.

2. Kasatkin A.G. Osnovnie protsessy i apparaty khimicheskoy tehnologii / A.G. Kasatkin. M.: Khimiya, 1971. – 784 p.

3. Lukashev V.K. Sposib kontsentruvannya sirchanoyi kisloty / V.K. Lukashev, S.N. Romanko, S.V. Timofeev, A.N. Gudzovskiy A.N. // Patent 97392 Ukraine, MPK C01B17/88, 2015, Bul. №5.

4. Serafimov L.A. Sobludenie pervogo zakona Konovalova v protsesse rektifikatsii s inertnym gazom / L.A. Serafimov, A.V. Frolkova // Vestnik MITHT. – 2008. – №2. – P. 45–52.

5. Lukashov V. Rate of components evaporation from sulfuric acid solution during its concentrating in air flow / V. Lukashov, S. Romanko, S. Timofeev, A. Protsenko // Chemistry and Chemical technology. – 2017. – V. 11. – No. 3. – P. 344–348.

6. Lukashov V.K. Massoperenos pri kontsentrirovaniyi sernoy kisloty isparenem v potok vozduha / V.K. Lukashev, S.N. Romanko, S.V. Timofeev // Journal Of Engineering Sciences. – 2016. – №2. – P. B1–B7.

УДК 661.25

Лукашов В.К., Романько С.М., Тимофіїв С.В.

МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗПЕРЕРВНОГО ПРОЦЕСУ КОНЦЕНТРУВАННЯ СУЛЬФАТНОЇ КИСЛОТИ В ЄМНІСНОМУ АПАРАТІ З ПРОТОКОЮ НЕЙТРАЛЬНОГО ГАЗУ

Розроблено математичну модель безперервного процесу концентрування сульфатної кислоти в ємнісному апараті з протокою нейтрального газу. В результаті досліджень, проведених на цій моделі, були встановлені закономірності зміни складу кислоти від величини її потоку на вході в апарат при різних параметрах процесу концентрування.

Lukashov V.K., Romanko S.M., Timofeev S.V.

MODELING OF A CONTINUOUS PROCESS OF SULFURIC ACID CONCENTRATION IN A CAPACITIVE APPARATUS WITH A NEUTRAL GAS FLOW

A mathematical model of a continuous process of sulfuric acid concentration in a capacitive apparatus with a neutral gas flow path was developed. As a result of studies performed on the model, changing regularities acid composition from the value of its flow at input to the apparatus were established at different concentration process parameters.

УДК 66.045.1

Бабак Т.Г., Демирский А.В., Хавин Г.Л.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ ОБОРУДОВАНИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТЕПЛОВЫХ ПУНКТОВ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ И ГВС

1. Актуальность и практическая ценность разработки программного обеспечения для автоматизированного проектирования тепловых пунктов

Вступление. Основное внимание в государственной политике Украины в области коммунального теплоснабжения уделяется экономии энергетических ресурсов. Последнее невозможно без реконструкции всей городской системы центрального теплоснабжения и, в первую очередь, районных групповых и индивидуальных тепловых пунктов, замену устаревшего оборудования на новое современное. Такая модернизация и внедрение новых тепловых пунктов позволяет, по некоторым оценкам [1], за счет экономии в области распределения и потребления тепла обеспечить высвобождение средств, достаточных для решения проблем коммунальной энергетики без увеличения тарифов.

Имеющиеся в ряде крупных городов системы упрощенных тепловых пунктов обеспечивают теплоснабжение больших групп зданий. Такие узловое системы обуславливают значительные потери тепла при подаче воды отопления и горячего водоснабжения (ГВС). Кроме того износ подающих сетей не позволяет существенным образом повысить температуру сетевого теплоносителя, что приводит к существенному снижению температуры воздуха в помещениях и температуры воды ГВС. Внедрение современных тепловых пунктов позволяет более гибко и эффективно проводить регулировку по наружной температуре.

В ряде стран Западной Европы, которые имеют довольно крупные системы тепловых сетей, характерно размещение на вводах зданий индивидуальных тепловых пунктов (ИТП), оснащенных пластинчатыми подогревателями для отопления и ГВС, средствами автоматического регулирования и насосным оборудованием. Это позволило снизить нагрузки на тепловые сети, эксплуатационные затраты на ремонт коммуникаций и обеспечить эффективное регулирование отпуска тепла. По данным [2], при реконструкции систем теплоснабжения применение компактных ИТП позволяет значительно увеличить степень рекуперации тепла. При этом наибольший эффект достигается за счет реконструкции периферийных точек системы потребителей.

Особенно эффективным в системах теплоснабжения является использование компактных пластинчатых теплообменников фирмы "Альфа-Лаваль" (Швеция). ИТП на базе таких теплообменников с нагрузкой 0,5-1,5 Гкал/ч размещается на площади в несколько квадратных метров, при этом сохранив все требования стандартов, применяемых к тепловым пунктам. Такой индивидуальный тепловой пункт можно установить в небольшой комнате предприятия, жилого дома либо в технологических помещениях.

Как отмечено в [3], наибольший экономический эффект достигается в научно обоснованном применении пластинчатых теплообменных аппаратов при энергоэффективной реконструкции открытых систем тепло- и горячего водоснабжения. В практике проектирования, строительства и эксплуатации теплоснабжающих систем имеются известные недостатки, приводящие к перерасходу тепловой энергии. К ним относятся:

перегрев в теплый период отопительного сезона зданий, присоединенных к централизованному теплоснабжению; большие тепловые потери в наружных тепловых сетях. В целях более рационального использования тепловой энергии при централизованном теплоснабжении и особенно теплофикации на первый план выходит вопрос о практической реализации, которая, в первую очередь, должна опираться на качественное и достоверное проектирование. Общая стратегия снижения энергозатрат, в том числе снижение расхода энергоресурсов, снижение потребления воды, снижение вредных выбросов, включает в себя [3]:

- интеграция и оптимизация производственных процессов, в которых имеются теплоиспользующие технологические схемы;
- создание, разработка и внедрение пластинчатых теплообменных аппаратов, и создание на их базе оптимальных теплообменных комплексов;
- разработка и создание программного продукта, а именно пакетов прикладных программ по расчету и оптимизации пластинчатых теплообменников любого типа, синтезу теплообменной поверхности, расчету и синтезу оптимальных систем теплообменных аппаратов; оптимальному расчету и проектированию индивидуальных и местных тепловых пунктов;
- подготовка кадров и научные контакты.

Таким образом, важнейшей задачей при проектировании тепловых пунктов (ТП) является обеспечение возможности быстрых многовариантных расчетов теплообменных аппаратов и другого оборудования для различных схем ТП, с определением стоимости капитальных вложений и последующих эксплуатационных расходов. Последнее обстоятельство позволяет на стадии проектирования выбрать оптимальный вариант из соотношения капитальные затраты – эксплуатационные расходы для различных сочетаний тепловых нагрузок горячего водоснабжения (ГВС) и отопления, смоделировать работу теплового пункта на рабочих режимах и в нештатной ситуации.

Для реализации задачи оптимального проектирования индивидуальных тепловых пунктов и проведения многовариантных расчетов было разработано математическое обеспечение, позволяющее автоматизировать процесс проектирования теплового пункта системы отопления и горячего водоснабжения. Подбор теплообменников отопления и ГВС осуществляется по параллельной, двухступенчатой смешанной и последовательной схемам. В качестве теплообменных аппаратов в расчетах используется номенклатура разборных теплообменников «Альфа Лаваль». Описание модулей «Расчет теплообменника и насосов отопления», «Расчет теплообменников и насоса ГВС» и общей структуры программы приведено в отчете WP3 «The description of IHM software».

2. Проектирования теплового пункта системы отопления жилых зданий

2.1 Схемы тепловых пунктов систем теплоснабжения

Тепловая нагрузка коммунального теплоснабжения имеет сложную структуру, состоящую из нагрузки отопления, горячего водоснабжения, вентиляции и кондиционирования. Эти виды нагрузки изменяются по различным сезонным и суточным графикам. Расход тепла зависит от схемы присоединения к тепловой сети и метода центрального регулирования.

График тепловой нагрузки отопления имеет сезонную неравномерность при близком к постоянному суточному значению. В течение отопительного сезона тепловая

нагрузка здания пропорциональна разности принятой внутренней температуры отапливаемых помещений и наружной температуры воздуха.

Регулирование отпуска тепла в систему отопления осуществляется изменением температуры сетевого теплоносителя в зависимости от температуры наружного воздуха (качественное регулирование) и путем изменения расхода сетевого теплоносителя (количественное регулирование). В зависимости от количества присоединенных зданий тепловые пункты делятся на центральные тепловые пункты для присоединения к тепловой сети групп зданий и для присоединения одного здания или его части – индивидуальные тепловые пункты. В зависимости от числа присоединенных потребителей условно принято различать групповые тепловые пункты (ГТП) и районные (РТП). Групповые или микрорайонные тепловые пункты обслуживают группу жилых зданий или все здания в пределах микрорайона. Районные тепловые пункты обслуживают все здания в пределах жилого района.

В качестве основного вида регулирования применяется центральное регулирование на источнике отпуска тепла (ТЭЦ, котельные). В настоящее время повсеместно развивается дополнительное регулирование отпуска тепловой энергии на групповых, районных, микрорайонных и индивидуальных тепловых пунктах. При этом для каждого вида регулирования имеется своя область эффективного действия: центральное регулирование по замыслу должно ориентироваться на некоторую стандартную нагрузку района и гарантировать обеспечение теплом любого потребителя из этого района. Если система теплофикации имеет достаточное количество разнородных потребителей, тогда целесообразно сочетание центрального качественного регулирования по совмещенной нагрузке отопления и ГВС с групповым, местным или индивидуальным количественным регулированием.

Для местных и индивидуальных тепловых пунктов в случае независимой системы отопления и горячего водоснабжения наиболее эффективными являются присоединение системы отопления через теплообменник отопления и двухступенчатая смешанная схема горячего водоснабжения, рис. 1. Блочные или индивидуальные тепловые пункты (модульные тепловые установки) производительностью от 20 кВт до 10 МВт, рис. 2, используются как тепловые пункты отдельных жилых или производственных зданий, а также при реконструкции центральных тепловых пунктов, теплораспределительных станций и котельных.

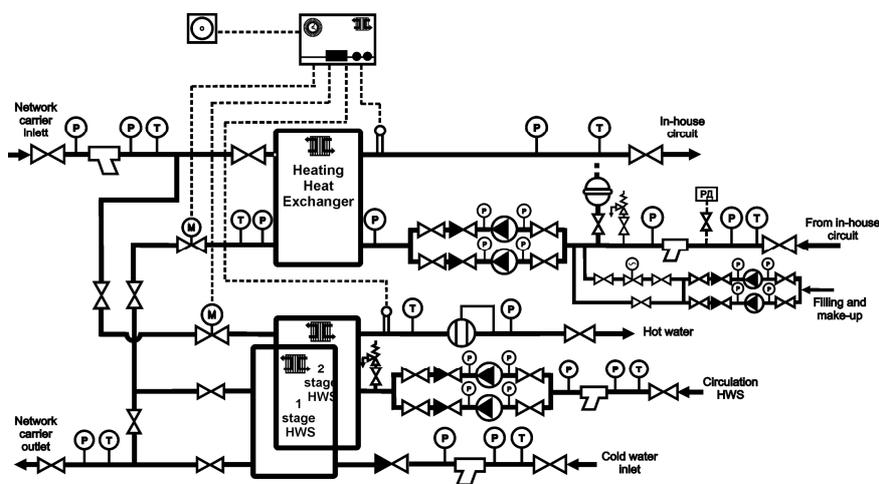


Рисунок 1 – Принципиальная схема индивидуального теплового пункта системы отопления и ГВС (двухступенчатая смешанная схема)

Тепловые модули базируются на пластинчатых теплообменниках разборной и неразборной конструкции, комплектуются насосным оборудованием, автоматикой и другими средствами регулирования. В стандартной комплектации ИТП состоит из двух модулей – системы отопления и системы горячего водоснабжения.

Практика эксплуатации ИТП на базе пластинчатых теплообменных аппаратов показывает, что теплообменники могут устанавливаться без резервирования. Для повышения надежности (в больницах, родильных домах и других потребителей с высокой ответственностью) могут устанавливаться два и более аппарата. Расчет их производится на нагрузку в пределах 50-100% мощности отопления, что определяется степенью задаваемой надежности работы системы отопления.



Рисунок 2 – Общий вид теплового пункта «АО «Содружество-Т» системы отопления здания и ГВС на базе пластинчатых теплообменников

2.2 Система отопления и проектирование ИТП с пластинчатыми теплообменниками

Согласно нормативным требованиям и стандартам подбор теплообменника отопления производится по зимней температуре наружного воздуха, равной средней температуре наиболее холодной пятидневки по климатологическим данным или по карте расчетных температур [4,5]. Работа теплового пункта во многом определяется значениями наружной температуры. Для стабильной работы существуют таблицы рабочих температур ТП, в зависимости от температуры наружного воздуха.

Тепловой пункт с независимой схемой присоединения системы отопления, оснащенный циркуляционным и подпитывающим насосом представлен на рис. 3. Для данной схемы характерно поддержание давления во внутреннем контуре и установка регулятора подпитки. При остановке циркуляционных насосов существует опасность попадания неохлажденной воды из подающей магистрали в обратную магистраль тепловой сети [6]. Во избежание этого явления, на подающей магистрали тепловой сети устанавливается клапан отсечки, который срабатывает при остановке насосов. Посто-

предусмотрена подача аварийного сигнала, если регулируемое давление выходит за заданные пределы. Применение такой схемы реализуется обычно при выполнении следующих условий: отсутствие непосредственного водоразбора из тепловой сети; давление перед исполнительным органом регулятора всегда выше регулируемого давления; часовой расход подпиточной воды G (кг/ч) не превышает величины, рассчитанной по формуле $G \leq 1,4\sqrt{\Delta p}$ [6], где Δp – разность давлений до и после регулятора, кПа.

Местное регулирование отпуска теплоты в системе отопления выполняет регулятор отопления (электроприводной клапан), который поддерживает постоянную температуру в подающей магистрали системы отопления здания (после теплообменника отопления). Необходимая температура в подающей магистрали определяется и постоянно корректируется по показаниям датчика наружного воздуха. Регулирование по показаниям датчика наружного воздуха обычно осуществляется для полусистем отопления, связанных с фасадами здания. Такой подход обеспечивает возможность дифференцированного распределения теплоносителя с учетом влияния солнечной энергии, ветра и ориентации здания на тепловую потребность помещений, расположенных на противоположных фасадах. В данном случае отпуск тепла в ИТП регулируется отдельно по полусистемам отопления фасадов.

Иногда применяются схемы, которые предусматривают установку датчиков непосредственно в квартирах и, таким образом, поддерживают заданную внутреннюю температуру помещений, осуществляя этим количественное регулирование отпуска тепла. В любом случае схема, предусматривающая изменение количества поступающего в теплообменник отопления сетевого теплоносителя, должна базироваться на корректном выборе теплообменника с точки зрения его реагирования на изменение внешних условий. Таким требованиям полностью отвечают пластинчатые теплообменные аппараты.

Если давление в обратной магистрали достаточно велико, то подпиточный насос на подпитку и заполнение разводящей сети и местных систем потребителей не устанавливают. Тогда независимая схема присоединения отопления принимает вид, представленный на рис. 4. В этом случае на обратной магистрали разводящей тепловой сети устанавливают предохранительный и обратный клапаны.

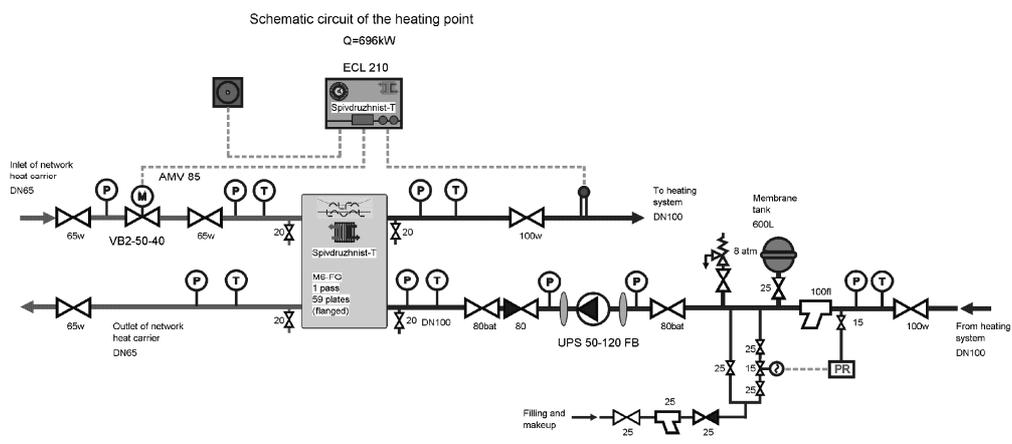


Рисунок 4 – Схема теплового пункта при независимом присоединении системы отопления с обратным клапаном на линии подпитки

В случае если по каким-либо обстоятельствам необходимость в автоматической подпитке системы отопления отсутствует, то общая схема ТП может не содержать подпиточной магистрали, что представлено на рис. 5.

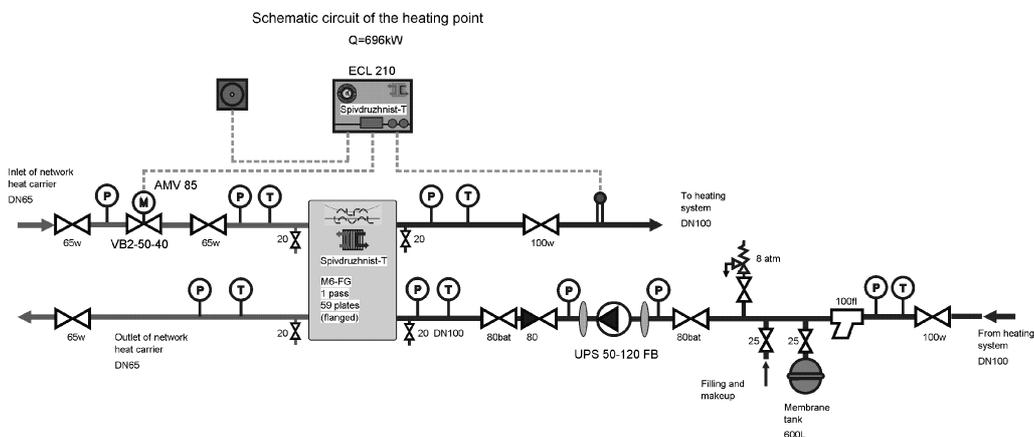


Рисунок 5 – Схема теплового пункта при независимом присоединении системы отопления без автоматической системы подпитки

Если провести классификацию по установленному оборудованию теплового пункта с независимым присоединением системы отопления, то можно предложить следующие варианты компоновки теплового пункта.

Классификация по линии подпитки:

- схема теплового пункта системы отопления с насосным блоком на линии подпитки;
- схема теплового пункта системы отопления с обратным клапаном на линии подпитки;
- схема теплового пункта системы отопления без автоматической подпитки.

Классификация по установленному оборудованию на сетевой магистрали:

- схема теплового пункта системы отопления с электроприводным клапаном на подающем трубопроводе сетевого теплоносителя;
- схема теплового пункта системы отопления с электроприводным клапаном на обратном трубопроводе сетевого теплоносителя;
- схема теплового пункта системы отопления с трехходовым краном на обратном трубопроводе сетевого теплоносителя (постоянство расхода).

Классификация по установленному оборудованию в контуре отопления:

- схема теплового пункта системы отопления с циркуляционным насосным блоком на обратном трубопроводе внутреннего контура отопления;
- схема теплового пункта системы отопления с циркуляционным насосным блоком на подающем трубопроводе внутреннего контура отопления.

Таким образом, число вариантов исполнения теплового пункта ограничено, и, как следствие, комплектация теплового пункта имеет достаточно ограниченное количество наименований. Последнее обстоятельство позволяет в значительной степени стандартизировать выпуск оборудования и унифицировать изготовление таких тепловых пунктов.

В разработанном математическом обеспечении в настоящее время реализованы три схемы тепловых пунктов, которые классифицированы по наличию или отсутствию автоматической подпитки, рис. 6–8. Для всех этих схем принята установка электроприводного клапана на подающем трубопроводе сетевого теплоносителя и циркуляционного насосного блока на обратном трубопроводе внутреннего контура отопления. Кроме того предусмотрено использование мембранного бака, предохранительного клапана, фильтров и другого дополнительного оборудования. Для обеспечения функционирования теплового пункта устанавливается система управления двух типов: только для модуля отопления и для модуля отопления и ГВС.

2.3 Система ГВС и особенности выбора теплообменников для различных схем присоединения к тепловым сетям

Одним из основных критериев при выборе присоединения водонагревательных установок горячего водоснабжения (теплообменников ГВС) к централизованным сетям является минимум приведенных затрат на тепловые сети и тепловые пункты. При равных условиях: тепловых нагрузках горячего водоснабжения (ГВС) и отопления; одинаковых расчетных температурах воды в тепловой сети для закрытых систем централизованного теплоснабжения наиболее простой является параллельная схема. Она характеризуется наименьшей поверхностью нагрева теплообменного аппарата и наибольшим расходом сетевой воды на тепловом пункте (ТП). Последовательная двухступенчатая схема и смешанная схема с ограничением максимального расхода сетевой воды характеризуются наименьшим расчетным расходом сетевой воды на ТП, но максимальной поверхностью теплообменников ГВС [7]. Наименьший расчетный расход сетевой воды, близкий к расчетному отопительному расходу, обеспечивается в этом случае выравниванием тепловой нагрузки ТП, благодаря использованию аккумулирующей способности отапливаемых зданий путем применения связанного регулирования установок отопления и горячего водоснабжения [8]. Двухступенчатая смешанная схема по расчетным расходам сетевой воды и поверхности нагрева водонагревателя горячего водоснабжения занимает промежуточное положение.

Основными схемами присоединения подогревателей горячего водоснабжения к тепловым сетям в настоящее время приняты двухступенчатая смешанная (рис. 6,7) и параллельная схема, рис. 8.

Двухступенчатые схемы присоединения теплообменников ГВС при отсутствии бака-аккумулятора имеют преимущества перед другими схемами в широком диапазоне отношения $0,2 \leq k^{\max} \leq 1$, характерном для подавляющего большинства жилых зданий, где k^{\max} – отношение максимальной нагрузки горячего водоснабжения к максимальной нагрузке отопления. Следуя [9], если отношение k^{\max} находится за пределами указанного диапазона, то регламентируется применение параллельной схемы. Для малых k^{\max} усложнение схем, по сравнению с параллельной, не компенсируется снижением расхода сетевой воды, а для больших k^{\max} резко возрастает поверхность нагрева теплообменников ГВС.

С учетом указанных критериев и ограничений, требований СНиП [4,5] и рекомендаций [7–9] ниже приведены рациональные области применения схем присоединения теплообменников ГВС при проектировании ТП с регулированием отпуска теплоты на отопление.

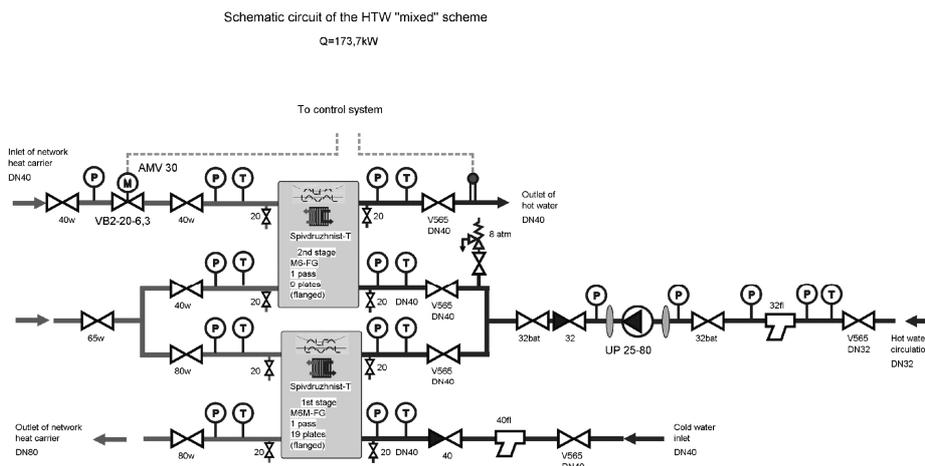


Рисунок 6 – Двухступенчатая смешанная схема присоединения теплообменника ГВС с циркуляционным насосом

Для закрытых систем теплоснабжения от ТЭЦ, а также от котельных мощностью более 35 МВт, для принятия в качестве расчетного повышенного температурного графика центрального регулирования по совмещенной нагрузке отопления и горячего водоснабжения, выбирают следующие схемы присоединения:

- смешанную с ограничением максимального расхода сетевой воды на ТП или двухступенчатую последовательную при отсутствии указанных выше ограничивающих условий – в ЦТП и ИТП при $0,2 \leq k^{\max} \leq 1$ и отсутствии бака-аккумулятора системы горячего водоснабжения;
- в ИТП с элеватором – смешанную схему;
- смешанную схему – в ЦТП и ИТП при $0,2 \leq k^{\max} \leq 1$ и наличии бака-аккумулятора системы ГВС;
- параллельную схему – в ЦТП и ИТП при $k^{\max} < 0,2$ и $k^{\max} > 1$, а также в ТП при прерывистом характере водопотребления.

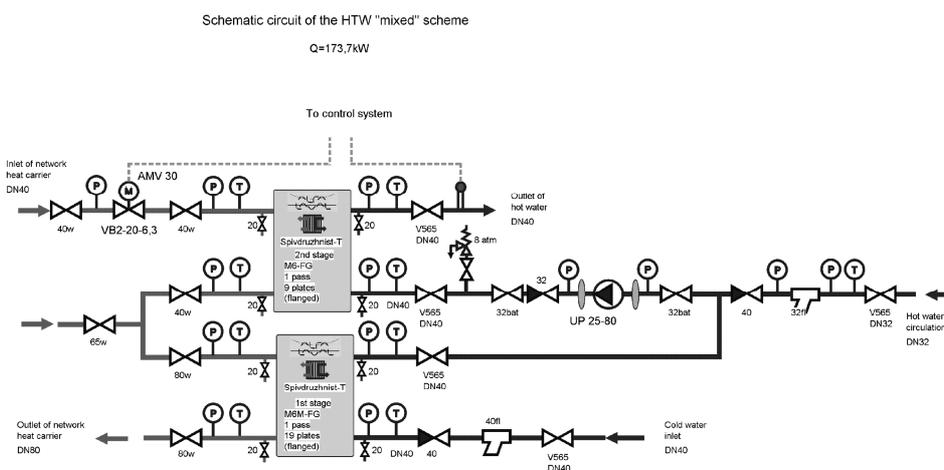


Рисунок 7 – Смешанная схема присоединения теплообменника ГВС с циркуляционно-повысительным насосом

Для закрытых систем теплоснабжения от ТЭЦ, а также от котельных мощностью более 35 МВт, в которых в качестве расчетного принят температурный график центрального регулирования по нагрузке отопления, выбирают следующие схемы присоединения:

- смешанную схему – в ЦТП и ИТП, если $0,2 \leq k^{\max} \leq 1$;
- параллельную схему – в ЦТП и ИТП при $k^{\max} < 0,2$ и $k^{\max} > 1$, а также в ТП при прерывистом характере водопотребления.

Для закрытых систем теплоснабжения от котельных мощностью 35 МВт и менее во всех ТП выбирают параллельную схему. По диапазону отношений нагрузок k^{\max} , на которые рассчитаны теплообменники ГВС в закрытых системах, типовые проекты ЦТП могут применяться в широком интервале расчетных температур наружного воздуха для отопления.

Расчет теплообменных аппаратов горячего водоснабжения выполняют на максимальный часовой расход тепла на горячее водоснабжение. Определение этого расхода включает в себя собственно максимальную нагрузку горячего водоснабжения, потери тепла трубопроводами системы и расход тепла на нагрев циркуляционной воды.

Теплообменники ГВС рассчитывают на минимальную температуру воды в подающем трубопроводе теплосети. Значение минимальной температуры воды обусловлено наличием систем горячего водоснабжения как потребителя теплоты в централизованном теплоснабжении. Согласно СНиП она составляет для закрытых систем теплоснабжения не менее 70 °С, для открытых систем теплоснабжения – 60 °С. Для закрытых систем теплоснабжения, на которые ориентирована установка индивидуальных тепловых пунктов, работающих по графику регулирования совместной нагрузки отопления и горячего водоснабжения («повышенный» график), т.е. когда нагрузка горячего водоснабжения компенсируется не увеличением расхода сетевой воды, а повышением температурного графика, минимальная температура воды в подающем трубопроводе теплосети должна быть выше 70 °С.

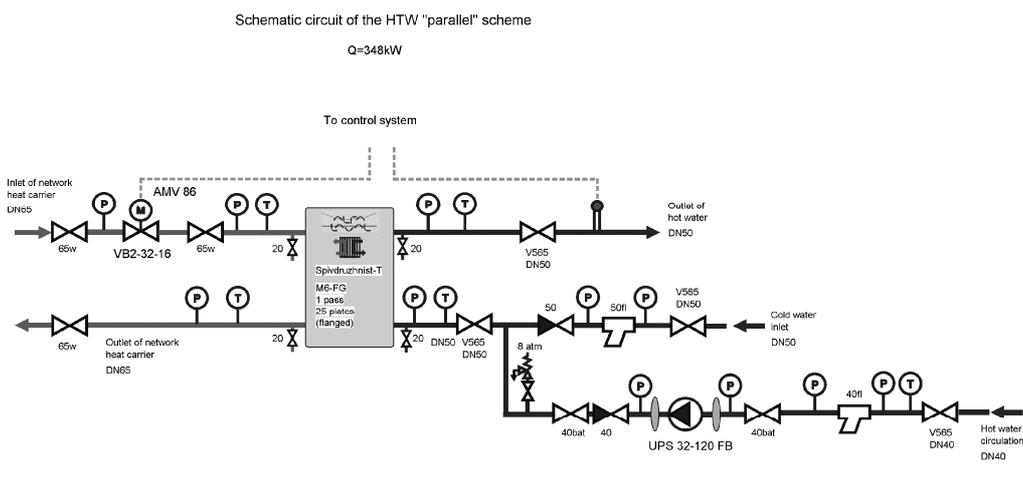


Рисунок 8 – Параллельная схема присоединения теплообменника ГВС

Таким образом, одной из наиболее актуальных задач при проектировании ТП является выбор схемы присоединения теплообменников ГВС к централизованным се-

тям и расчет аппаратов системы ГВС. При этом важнейшей задачей является обеспечение возможности быстрых многовариантных расчетов теплообменных аппаратов и другого оборудования ТП для различных схем, с определением стоимости капитальных вложений в ТП и последующих эксплуатационных расходов. Последнее обстоятельство позволяет на стадии проектирования выбрать оптимальный вариант из соотношения капитальные затраты – эксплуатационные расходы для различных сочетаний тепловых нагрузок ГВС и отопления, смоделировать работу теплового пункта на рабочих режимах и в нештатной ситуации.

Учитывая, что график потребления горячей воды резко неравномерный, то обязательным условием подключения теплообменников ГВС является оборудование их регуляторами температуры горячей воды. При этом параллельную и двухступенчатую смешанную схемы применяют при независимом регулировании нагрузок отопления и ГВС.

Для последовательной двухступенчатой схемы присоединения водонагревателей, в качестве расчетного расхода горячей воды принимают «балансовый» расход, по которому определяют расход сетевого теплоносителя. Обычно «балансовый» расход на 20–25 % больше среднечасового расхода на ГВС.

Двухступенчатая смешанная схема чаще всего применяется с ограничением максимального расхода сетевого теплоносителя, что также дает возможность использовать теплоаккумулирующую способность здания для компенсации суточной неравномерности потребления теплоты системой ГВС. По сравнению с традиционной двухступенчатой смешанной схемой, в схеме с ограничением максимального расхода регулятор расхода устанавливается не перед системой отопления, а на вводе до места отбора сетевого теплоносителя на теплообменник 2-й ступени. Регулятор настроен на заданный расход. По сигналу датчика, с увеличением разбора горячей воды, регулятор температуры увеличит расход сетевого теплоносителя через теплообменник второй ступени, но так как общий расход ограничен, то это увеличение произойдет за счет уменьшения расхода сетевого теплоносителя на отопление. Практически применение такой схемы по расходу сетевого теплоносителя равноценно применению последовательной схемы. Постоянный расход воды в системе отопления обеспечивается работой циркуляционного насоса и регулятора давления.

В реальных системах водоснабжения, особенно больших микрорайонов, имеет место низкое давление холодной воды, поступающей на подогрев в теплообменник. В этом случае из-за наличия гидравлического сопротивления в теплообменнике и здании подать горячую воду не удастся. Для преодоления такой ситуации устанавливают повысительный насос, чаще всего на трубопроводе, подающем холодную воду.

Если провести классификацию по установленному оборудованию теплового пункта ГВС, то можно предложить следующие варианты компоновки теплового пункта.

Классификация по установленному оборудованию на сетевой магистрали:

- схема теплового пункта системы ГВС с электроприводным клапаном на подающем трубопроводе сетевого теплоносителя;
- схема теплового пункта системы ГВС с электроприводным клапаном на обратном трубопроводе сетевого теплоносителя;
- схема теплового пункта системы отопления с трехходовым краном на обратном трубопроводе сетевого теплоносителя (постоянство расхода).

Классификация по установленному оборудованию в контуре холодного теплоносителя ГВС (по наличию или отсутствию повысительного насоса):

- схема теплового пункта системы ГВС без повысительного насосного блока;
- схема теплового пункта системы ГВС с повысительным насосным блоком на трубопроводе, подающем холодную воду;
- схема теплового пункта системы ГВС с повысительным насосным блоком на трубопроводе, подающем горячую воду.

Число вариантов исполнения теплового пункта ГВС имеет достаточно ограниченное количество наименований, что также как и для тепловых пунктов системы отопления, позволяет в значительной степени унифицировать изготовление таких тепловых пунктов в массовом порядке.

В разработанном математическом обеспечении предусмотрено проектирование теплового пункта горячего водоснабжения по двум основным схемам: смешанной двухступенчатой и параллельной. При проектировании предусмотрена установка циркуляционного насоса или циркуляционно-повысительного насоса, как варианта реализации для смешанной двухступенчатой схемы.

3. Расчет трубопроводов, оборудования систем управления и обеспечения, обвязка насосов тепловых пунктов

После произведенного расчета теплообменников и насосов системы отопления и (или) ГВС, при выборе из меню «IHM Cost» производится по умолчанию выбор основного и вспомогательного оборудования, и расчет диаметров трубопроводов. При выборе «IHM Cost» на экране появляется меню, рис. 9.

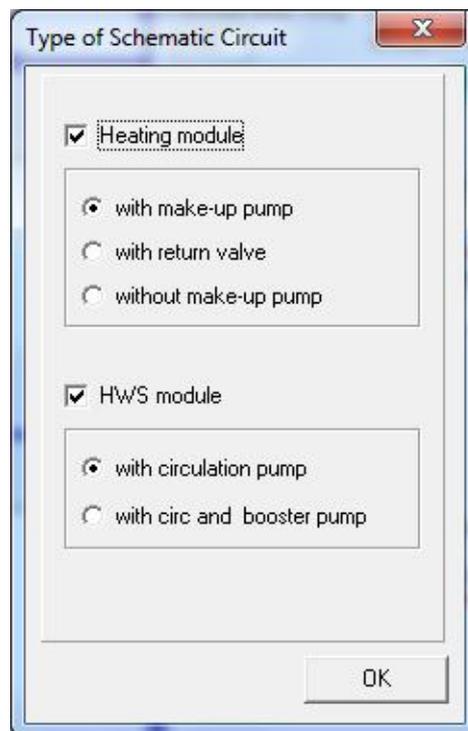


Рисунок 9 – Выбор принципиальной схемы устройства теплового пункта

После выбора принципиальной схемы устройства теплового пункта по нажатию «ОК» появляются страницы для непосредственного расчета оборудования теплового пункта, для отопления – «Heating», рис. 10 и для ГВС – «HWS», представленные на

рис. 11–13.

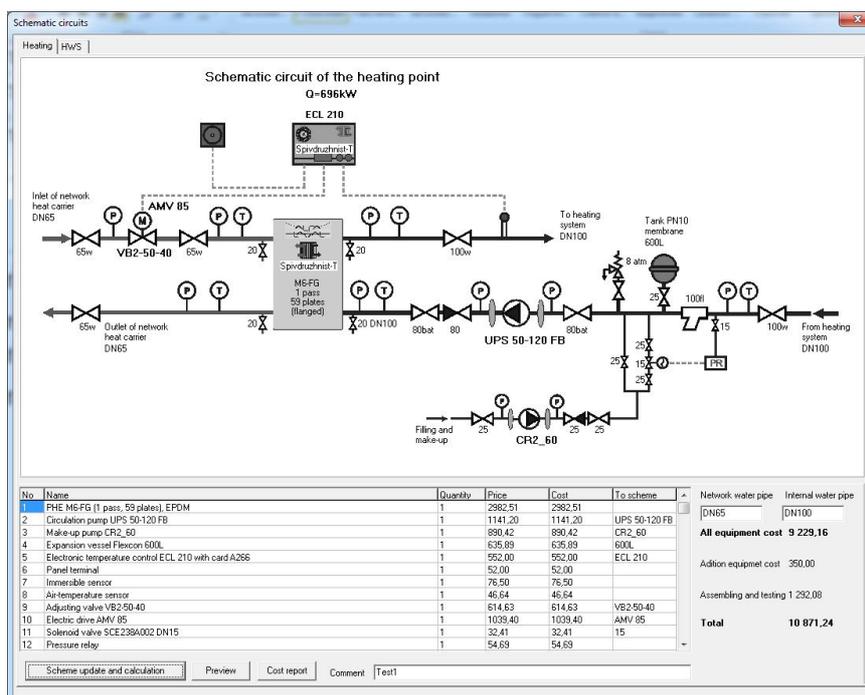


Рисунок 10 – Общий вид принципиальной схемы и номенклатуры установленного оборудования для системы отопления

3.1 Система регулирования и управления

В качестве оборудования системы управления и контроля по умолчанию используется оборудование фирмы «Danfoss», в состав которого входит:

- электронные регуляторы серии ECL Comfort 210 с дисплеем и поворотной кнопкой, с картой A266 – регулирование температуры в контуре отопления и ГВС или с картой A368 – регулирование температуры в контуре отопления и ГВС, управление и защита циркуляционных насосов, управления подпиткой;
- регулятор температуры для системы отопления или ГВС;
- ECL Comfort клеммная панель;
- ECL Comfort 110 с комплектом монтажа (клеммная панель в комплекте) – регулятор одноконтурный — управление клапаном и насосом системы ГВС со скоростным водоподогревателем;
- датчик температуры наружного воздуха (-50 ... +50 °C) марки ESMT;
- датчик погружной медный (l = 100 мм, 0 ... +140 °C) марки ESMU;
- реле давления КР 35;
- клапаны регулирующие седельные фланцевые марки VB2 для диаметров подающих трубопроводов до Ду50 включительно и VFM2 для диаметров с Ду 65 и более;
- электроприводы редукторные с импульсным управлением (трехпозиционные) серии AMV 20 и AMV 30 для Ду50 включительно, AMV 55 и AMV 56 для 65 ≤ Ду ≤ 80 и AME 655 для Ду > 80;

В качестве соленоидного клапана используется соленоидный электромагнитный клапан производства фирмы ASCO Numatics SCE238 A002 Ду15 или TORC.

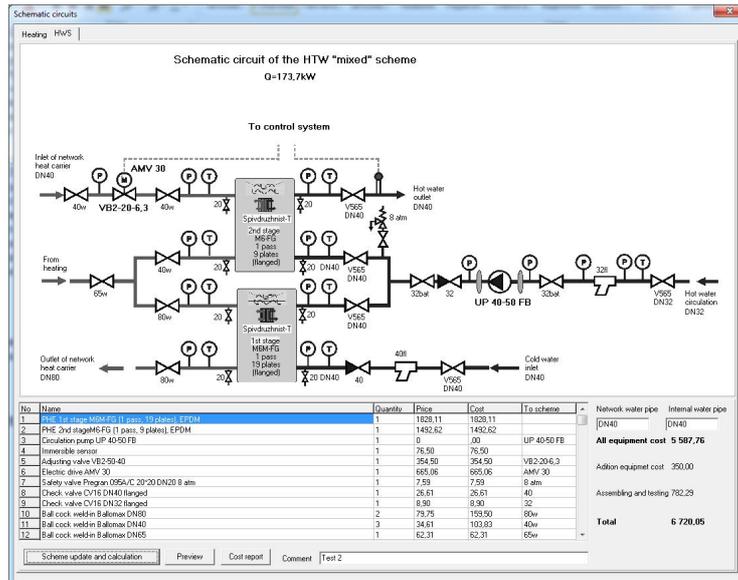


Рисунок 11 – Общий вид принципиальной схемы и номенклатуры установленного оборудования для двухступенчатой смешанной схемы ГВС с циркуляционным насосом

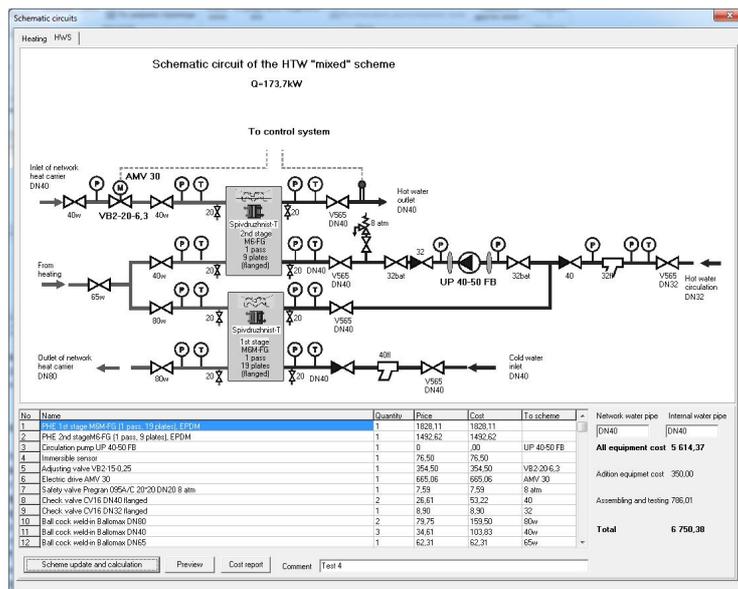


Рисунок 12 – Общий вид принципиальной схемы и номенклатуры установленного оборудования для двухступенчатой смешанной схемы ГВС с циркуляционно-повысительным насосом

3.2 Вспомогательное оборудование

В качестве вспомогательного оборудования системы обеспечения работы теплового пункта, по умолчанию используется оборудование различных фирм, в состав которого входит:

- предохранительные клапаны Pregran 095 A/C;
- обратные клапаны фланцевые ГРАНЛОК серии CV 16;
- обратные клапаны резьбовые ГРАНЛОК серии CV 16 до Ду 32 включительно;

- мембранні розширювальні баки Flamco Flexcon CE високого тиску PN6 і PN10;
- крани шарові фланцеві приварні Broen Ballomax;
- крани шарові муфтові «Boston» і «New York»;
- крани шарові Zetkama V565;
- фільтр фланцевий Zetkama V871 або IS 16M з магнітної вставкою;
- термометри і манометри з краном «Boston» і спускником.

3.3 Обв'язка насосів

Діаметр трубопроводів обв'язки вибирається на один порядок менше, ніж діаметр відповідного трубопровода, де встановлено насосний блок. В комплект насосного блоку входять:

- задвижки Sigeval типу «Баттерфляй» ЗПВЛ-FLN-5-MN-E фланцеві;
- обратні клапани фланцеві ГРАНЛОК серії CV 16 або обратні клапани різьбові ГРАНЛОК серії CV 16 до Ду 32 включительно;
- компенсатори трубопроводні резинові (гнучкі вставки) фланцеві і муфтові серії FC ООО «АДЛ продакшн»;
- крани шарові «New York».

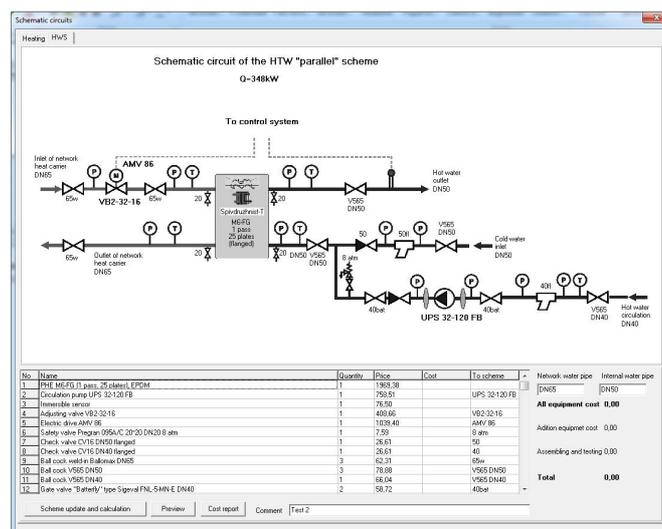


Рисунок 13 – Общий вид принципиальной схемы и номенклатуры установленного оборудования для параллельной схемы системы

3.4 Расчет трубопроводов

Выбор диаметров трубопроводов как на подающих, так и на обратных магистралях осуществляется из удовлетворения условия по скорости теплоносителя, которая не должна превышать значения 1 м/с при максимальном расходе.

4. Расчет стоимости установленного оборудования

Проектирование оборудования теплового пункта и расчет его стоимости оборудования осуществляется по вызову опции «INMCost», в результате чего появляется ок-

но, где предлагается выбор типа теплового пункта отопления и ГВС. После выбора комплектации теплового пункта предлагаются принципиальные схемы и таблицы со списком выбранного оборудования для отопления и ГВС, рис. 10–13.

По нажатию клавиши «Scheme update and calculation» происходит расчет стоимости установленного оборудования, который заносится в колонку «Cost». После этого можно осуществить предварительный просмотр принципиальной схемы и осуществить ее печать «Print», и, если необходимо, предварительная настройка принтера, используя «Print Setup». При необходимости можно сохранить рисунок принципиальной схемы, используя «Save as».

Данные полученные в таблице расчета стоимости можно распечатать, используя «Cost report», рис. 14, задав предварительно название протокола в «Comment».

Schematic circuit of the heating point
Test1
Spivdruzhnist-T

Nb	Name	Quantity	Price	Cost
1	PHE-M8-FG (1 pass, 59 plates), EPDM	1	2882.51	2882.51
2	Circulation pump UPS 55-120 FB	1	1141.20	1141.20
3	Make-up pump CPC_80	1	890.42	890.42
4	Expansion vessel Flexcon 800L	1	635.89	635.89
5	Electronic temperature control ECL 210 with card A.266	1	552.00	552.00
6	Panel terminal	1	52.00	52.00
7	Immersible sensor	1	78.50	78.50
8	Air-temperature sensor	1	46.64	46.64
9	Adjusting valve VBC-20-40	1	614.63	614.63
10	Electric drive AMV 85	1	1039.40	1039.40
11	Solenoid valve SCE238A002 DN15	1	32.41	32.41
12	Pressure relay	1	54.89	54.89
13	Safety valve Phegran 085A/C 20°20 DN20 8 atm	1	7.59	7.59
14	Check valve CV 16 DN60 flanged	1	39.45	39.45
15	Check valve DN25 coupling	1	5.71	5.71
16	Ball cock/weld-in Ballmax DN65	3	62.31	186.93
17	Ball cock/weld-in Ballmax DN100	2	105.85	211.70
18	Gate valve "Butterfly" type Sigval FNL-5-MVE DN60	2	68.87	137.74
19	Ball cock coupling Boston inside thread DN15	1	3.27	3.27
20	Ball cock coupling Boston inside thread DN25	3	7.21	57.88
21	Ball cock coupling Boston inside thread DN20	4	4.81	19.24
22	Flexible connector anti-vibration 1" DN60	2	46.32	92.64
23	Flexible connector anti-vibration 1/2" DN20	2	13.24	26.48
24	Riser flanged DN100	1	121.84	121.84
25	Bimetallic thermometer 0-160	5	10.00	50.00
26	Manometer w ith tap	10	15.08	150.80
All equipment cost				9 229.16
Addition equipment cost				350.00
Assembling and testing				1 292.08
Total				10 871.24

Рисунок 14 – Общий вид протокола стоимости оборудования теплового пункта

Редактирование или внесение изменений в номенклатуру оборудования ТП осуществляется в колонке «To scheme». После этого можно изменить название редактируемого оборудования на новое в колонке «Name», его количество в «Quantity», стоимость в «Price» и пересчитать новую полную стоимость. Все внесенные изменения найдут свое отражение на схеме теплового пункта и в протоколе его стоимости.

Расчетные диаметры трубопроводов представлены на панели справа внизу экрана. Там же приведены данные об общей стоимости оборудования и стоимости теплового пункта с учетом соединительной арматуры и услуг по монтажу.

Заключение

Представленное описание системы программ для оптимального выбора схемы теплового пункта и его оборудования позволяет, прежде всего, осуществлять корректный выбор пластинчатых теплообменников системы отопления и ГВС (по смешанной и параллельной схеме) и циркуляционных насосов по заданному критерию выбора. Рас-

чет основного оборудования проводится по критерию приведенных затрат с учетом прогнозируемого загрязнения поверхности теплообмена. Представленное математическое обеспечение позволяет оптимизировать расчет теплообменников при присоединении по смешанной двухступенчатой схеме, запроектировать общую схему ТП, подобрать и рассчитать оборудование ТП, редактировать конфигурацию модуля в целом, оценить стоимость предложенной конфигурации теплового пункта, быстро вводить изменения и дополнения, получить полную техническую документацию, экономический расчет и техническое сопровождение проекта.

Литература

1. Костенко Ю.Т. Энергетическая стратегия Украины – энергосбережение / Ю.Т. Костенко, Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П.А. Капустенко // Интегрированные технологии и энергосбережение, 1999. – N1. – С. 3–7.
2. Magnel L. District Heating is profitable / L. Magnel // SweHeat, 1996. – N1. – P. 8–20.
3. Энергосберегающие мероприятия с применением пластинчатых теплообменников в системах теплоснабжения /Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П.А. Капустенко, А.Ю. Перевертайленко, Л.С. Яремчук // Интегрированные технологии и энергосбережение, 1999. – N1. – С. 28–30.
4. СНиП 2.04.05-91 «Отопление, вентиляция, кондиционирование» // Госкомитет по строительству, архитектуре и жилищной политике Украины. – Киев, 1992. – 36 с.
5. Изменения №1 к СНиП 2.04.05-91 «Отопление, вентиляция, кондиционирование» // Госкомитет по строительству, архитектуре и жилищной политике Украины. – Киев, 1998. – 36 с.
6. Наладка и эксплуатация водяных тепловых сетей: Справочник / В.И. Манюк, Я.И. Каплинский, Э.Б. Хиж, А.И. Манюк, В.К. Ильин. – М.: Стройиздат, 1988. – 432 с.
7. Повышение эффективности работы систем горячего водоснабжения / Н.Н.Чистяков, М.М. Грудзинский, В.И.Ливчак, И.Б. Покровская, Е.И.Прохоров. – М.: Стройиздат, 1988. – 314 с.
8. Водяные тепловые сети: Справочное пособие по проектированию / Под ред. Н.К. Громова, Е.П. Шубина.- М.: Энергоатомиздат, 1988.– 376 с.
9. Павлов И.И. Котельные установки и тепловые сети / И.И. Павлов, М.Н. Федоров. – М.: Стройиздат, 1986. – 232 с.

Bibliography (transliterated)

1. Kostenko Yu.T. Energeticheskaya strategiya Ukrainyi – energosberezhenie / Yu.T. Kostenko, L.L. Tovazhnyanskiy, P.A. Kapustenko // Integrirovannyye tehnologii i energosberezhenie, 1999. – N1. – P. 3–7.
2. Magnel L. District Heating is profitable / L. Magnel // SweHeat, 1996. – N1. – P. 8–20.
3. Energosberegayuschie meropriyatiya s primeneniem plastinchatyih teploobmennikov v sistemah teplosnabzheniya /L.L. Tovazhnyanskiy, P.A. Kapustenko, A.Yu. Perevertaylenko, L.S. Yaremchuk // Integrirovannyye tehnologii i energosberezhenie, 1999. – N1. – P. 28–30.
4. SNiP 2.04.05-91 «Otoplenie, ventilyatsiya, konditsionirovanie» // Goskomitet po stroitelstvu, arhitekture i zhilischnoy politike Ukrainyi. – Kiev, 1992. – 36 p.

5. Izmeneniya #1 k SNiP 2.04.05-91 «Otoplenie, ventilyatsiya, konditsionirovanie» // Goskomitet po stroitelstvu, arhitekture i zhilischnoy politike Ukrainyi. – Kiev, 1998. – 36 p.
6. Naladka i ekspluatatsiya vodyanyih teplovyih setey: Spravochnik / V.I. Manyuk, Ya.I. Kaplinskiy, E.B. Hizh, A.I. Manyuk, V.K. Ilin. – M.: Stroyizdat, 1988. – 432 p.
7. Povyishenie effektivnosti raboty sistem goryachego vodosnabzheniya / N.N.Chistyakov, M.M. Grudzinskiy, V I.Livchak, I.B. Pokrovskaya, E.I.Prohorov. – M.: Stroyizdat, 1988. – 314 p.
8. Vodyanyie teplovyie seti: Spravochnoe posobie po proektirovaniyu / Pod red. N.K. Gromova, E P. Shubina.- M.: Energoatomizdat, 1988.– 376 p.
9. Pavlov I.I. Kotelnyie ustanovki i teplovyie seti / I.I. Pavlov, M.N. Fedorov. – M.: Stroyizdat, 1986. – 232 p.

УДК 66.045.1

Бабак Т.Г., Демірський А.В., Хавін Г.Л.

ПРОЕКТУВАННЯ, РОЗРАХУНОК ОБЛАДНАННЯ І МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ТЕПЛОВИХ ПУНКТИВ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ ТА ГВП

Надано опис, конструктивні особливості і порядок роботи автоматизованої системи проектування теплових пунктів комунального теплопостачання на основі пластинчастого теплообмінного обладнання. Розрахунок теплообмінників здійснюється за критерієм приведених витрат з урахуванням забруднення поверхні теплообміну в процесі експлуатації. Подано класифікацію теплових пунктів за призначенням і характером встановленого устаткування. Представлена опрацьована система управління і регулювання роботою теплового пункту та номенклатура додаткового обладнання.

Babak T.G., Demirskyu A.V., Khavin G.L.

DESIGN, CALCULATE OF EQUIPMENT AND OPERATION MODELLING THE HEAT POINT OF HEATING SYSTEM AND HTW

The automated system of designing heating points based on plate heat exchangers is developed. Their classification according to the installed basic equipment is submitted. The nomenclature of the operation control system and substation accessories is adduced.

The description, design features and operation of the automated system for designing heat supply points for district heat supply based on plate heat exchanging equipment are presented. Calculation of heat exchangers is carried out by the criterion of the reduced costs taking into account the fouling of the surface of heat exchange during operation. Classification of heat points according to purpose and installed equipment is presented. Presented tried-and-true control system and regulation of the operation for the heat point and the nomenclature of additional equipment.

УДК 658.264

Алексахин А.А., Ена С.В., Гордиенко Е.П.

**ВЛИЯНИЕ МЕСТА ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОВЫШЕННЫХ ТЕПЛОПОТЕРЬ
НА ПОДАЮЩЕМ ТРУБОПРОВОДЕ ТЕПЛОСЕТИ НА СРЕДНИЕ ПО ДЛИНЕ
ЗНАЧЕНИЯ**

Вследствие изношенности тепловых сетей фактические потери теплоты в них существенно выше допустимых значений. По данным [1] реальные тепловые потери в сетях теплоснабжения г. Харькова примерно на четверть превышают нормативные значения, поэтому одним из направлений энергосбережения в коммунальной теплоэнергетике является уменьшение потерь теплоты при ее транспортировке за счет поддержания функционирующих трубопроводов в должном состоянии путем внедрения современных материалов при сооружении и ремонте тепловых сетей. В связи с этим мониторинг теплового состояния трубопроводов магистральных и распределительных сетей приобретает особую важность. В [2] предложены формулы, пригодные для создания методик постоянного экспресс-анализа тепловых потерь разветвленными сетями. Формулы получены из решения дифференциального уравнения, описывающего охлаждение теплоносителя в пределах элементарного участка подающего трубопровода теплосети

$$G(x) \cdot dt = -Q_{\Pi} / C, \quad (1)$$

где $G(x)$ – закон изменения расхода теплоносителя по длине теплопровода; dt – изменение температуры в пределах элементарного участка теплопровода; Q_{Π} – потери теплоты через изоляцию; C – удельная теплоемкость теплоносителя.

Результаты решения уравнения (1) в виде зависимости средних удельных потерь теплоты по длине участка подающего трубопровода сети представлены в табл.1. Для удобства сравнения получаемых результатов расчетов формулы (2)–(4) приведены к тем же температурным условиям, для которых предложены нормативные значения тепловых потерь [3].

Для проведения натурных испытаний в микрорайонных системах можно воспользоваться получающими все большее распространение счетчиками тепловой энергии, которые устанавливаются на тепловых вводах зданий. Применяемые теплосчетчики позволяют выполнять замеры расхода теплоносителя и температуры сетевой воды в подающем и обратном трубопроводах теплосети на вводе в здание. В результате испытаний могут быть найдены средние по длине сети (или отдельного фрагмента) для дальнейшего их сопоставления с допускаемыми. Превышение уровня нормативных тепловых потерь может быть равномерным по длине испытываемого фрагмента сети либо локализовано на каких-то участках, что может заметно сказываться на точности нахождения средних по длине теплопровода потерь.

Целью данной работы является анализ влияния места локализации повышенных потерь теплоты на точность определения усредненных по длине значений.

Расчетные исследования выполнены для приведенных на рис.1 схем теплоснабжения идеализированных групп зданий. Принято, что трубопроводы проложены в непроходных каналах. Расчеты выполнены при средней за отопительный период температуре наружного воздуха (температура воды на входе в микрорайонную сеть принята

$\tau_1 = 90^\circ\text{C}$), температура ґрунта на глибині заложення теплопроводов $t_{окр} = 5^\circ\text{C}$. Нормативные удельные теплотери приняты по [3]. Предварительно для каждой из схем рассчитано охлаждение воды на участках и ветви в целом. Найденные значения перепадов температур на ветви ($\tau_1 - \tau_K$) использованы затем для определения тепловых потерь по формулам (2)–(4). Расчеты выполнены при условии, что общие теплотери на ветви превышают нормативные на 10 %, 20 %, 30 %. Проведенное сопоставление результатов (табл. 2) свидетельствует о достаточной «чувствительности» метода к наличию равномерно распределенных по длине сверхнормативных потерь. Максимальное расхождение исходных значений удельных потерь теплоты и найденных по формулам (2)–(4), равное около 5 %, зафиксировано для схемы (б).

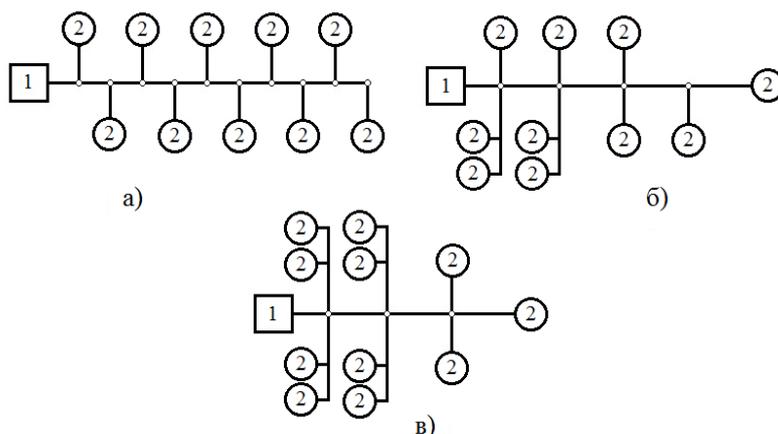


Рисунок 1 – Варианты исполнения распределительной тепловой сети
1 – теплораспределительная станция; 2 – здания

Таблица 1 – Расчетные зависимости для определения тепловых потерь трубопроводами [2]

Вариант сети (рис. 1)	Закон изменения расхода теплоносителя по длине ветви	Теплотери	Номер формулы
а	$\bar{G} = 1 + ax_0,$ $\bar{G} = G(x_0)/G_{\max}$	$q = \frac{(\tau_1 - \tau_K) B \times a \times \Delta t_H}{[0,5(\tau_1 + \tau_K) - t_{окр}] \ln 1 + a }$	(2)
б	$\bar{G} = (1 + bx_0^2)^{-1}$	$q = \frac{(\tau_1 - \tau_K) B \times \Delta t_H}{[0,5(\tau_1 + \tau_K) - t_{окр}] \left(1 + \frac{b}{3}\right)}$	(3)
в	$\bar{G} = (1 + cx_0)^{-1}$	$q = \frac{(\tau_1 - \tau_K) B \times \Delta t_H}{[0,5(\tau_1 + \tau_K) - t_{окр}] \left(1 + \frac{c}{2}\right)}$	(4)

x_0 – координата по длине трубопровода.

Поскольку в реальных условиях более вероятен случай локального ухудшения состояния теплопроводов сети (износ изоляции, дефекты каналов и т.п.), рассмотрены

варианты в которых превышение нормативных потерь имеет место либо на начальных, либо на конечных, либо на центральных участках ветви. Общее увеличение теплопотерь при этом, как и в предыдущем случае принято 10 %, 20 %, 30 %.

Результаты нахождения тепловых потерь для указанных случаев показаны на рис. 2, из которого видно, что место локализации повышенных теплопотерь существенно влияет на результат нахождения средних по длине значений. Повышенный уровень потерь на конечных участках ветви, для которых характерно меньшее значение расхода теплоносителя, обуславливает более интенсивное его охлаждение и, как следствие, завышение результатов расчетов с использованием формул (2)–(4). При повышенных теплопотерях на участках сети с большими значениями расхода (начальные участки) следует ожидать занижение расчетных значений. Причем, как видно из приведенных данных, на погрешность расчетов при использовании формул (2)–(4) существенно влияет характер изменения расхода сетевой воды вдоль ветви, определяемый конфигурацией сети, и точность аппроксимации реального закона изменения расхода.

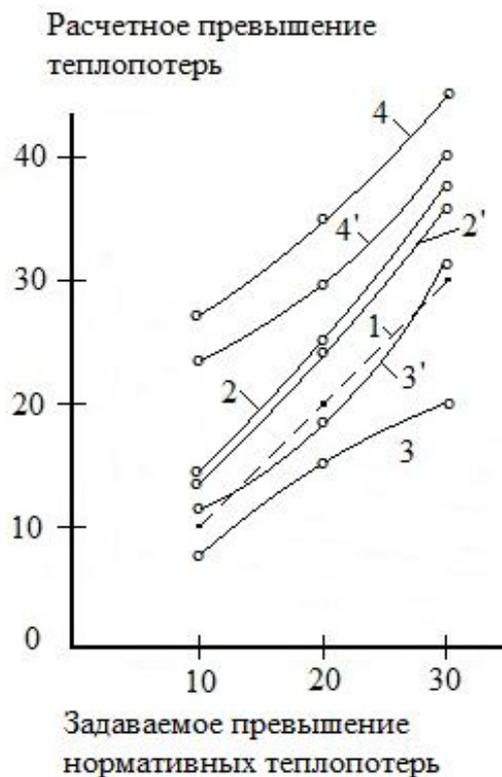


Рисунок 2 – Результаты определения тепловых потерь трубопроводами отопительной сети (расчетная схема №3)

1 – точное решение; 2, 2' – равномерное распределение сверхнормативных потерь по длине; 3, 3' – сосредоточение потерь на начальных участках ветви; 4, 4' – сосредоточение потерь на конечных участках; 1, 2, 3 – расчеты без деления ветви на фрагменты; 2', 3', 4' – расчеты при делении ветви на две части

Для повышения достоверности определения удельных потерь на участке представляется целесообразным сопоставить результаты, полученные по замерам охлаждения воды на всей длине ветви, с результатами для отдельных частей этой ветви. При

выборе длин частей ветви необходимо учитывать выводы работы [4] относительно минимально возможной длины расчетного участка. Для определения тепловых потерь по измерениям температуры теплоносителя в точке ветви, отстоящей от входа в теплопровод на расстоянии L_1 , можно воспользоваться предложенными в [5] уравнениями, описывающими изменение температуры теплоносителя по длине. Полученные после преобразований расчетные уравнения приведены в табл.3 и табл.4

Таблица 2 – Результаты определения теплотерь при равномерном распределении превышения нормативных значений по длине ветвей

Расчетная схема	Рост потерь сверх нормы (исходный),%	Охлаждение воды на ветви, °C	Средние по длине потери теплоты, Вт/м		Рост потерь сверх нормы (расчетный),%
			Нормативные	Расчет по (1)-(3).	
а	0	2,74	69,25	70,5	1,8
	10	2,85		73,39	4,0
	20	3,29		84,61	22,2
	30	3,56		91,66	32,40
б	0	3,66	67,70	70,43	4,04
	10	4,03		77,48	14,45
	20	4,49		84,52	24,8
	30	4,76		91,56	35,2
в	0	6,4	60,45	60,6	0,25
	10	7,02		66,49	10
	20	7,66		72,5	20
	30	8,3		78,7	30,2

Таблица 3 – Расчетные формулы для удельных потерь теплоты трубопроводами фрагмента ветви $0 \leq X_0 \leq L_1/L$

Вариант исполнения сети	Формула	Номер формулы
а	$q_1 = \left(\frac{a A_3}{L} \right) * \ln \left(\frac{t_3 - t_{окр}}{\tau_1 - t_{окр}} \right) / \ln \left(1 - \frac{a L_1}{L} \right),$ $A_3 = (G_0 * C_1 * \Delta t_n) / \beta$	(5)
б	$q_1 = -A_3 \ln \left(\frac{t_3 - t_{окр}}{\tau_1 - t_{окр}} \right) / \left[L_1 \left(1 + 0,33 b \left(\frac{L_1}{L} \right)^2 \right) \right]$	(6)
в	$q_1 = -A_3 \ln \left(\frac{t_3 - t_{окр}}{\tau_1 - t_{окр}} \right) / \left[L_1 \left(1 + 0,5 c L_1/L \right) \right]$	(7)

Таблица 4 – Расчетные формулы для удельных потерь теплоты трубопроводами фрагмента ветви $L_1/L \leq X_0 \leq 1$

Вариант исполнения сети	Формула	Номер формулы
а	$q_1 = \left(\frac{a A_3}{L} \right) * \ln \left(\frac{t_3 - t_{окр}}{\tau_1 - t_{окр}} \right) / \ln \left(\frac{1 - a}{1 - a L_1/L} \right)$	(8)
б	$q_1 = -A_3 \ln \left(\frac{t_3 - t_{окр}}{\tau_1 - t_{окр}} \right) / \left[L_1 \left(1 + 0,33 b \left(\frac{L_1}{L} \right)^2 \right) - L(1 + 0,33 b) \right]$	(9)
в	$q_1 = -A_3 \ln \left(\frac{t_3 - t_{окр}}{\tau_1 - t_{окр}} \right) / \left[L_1 (1 + 0,5 c L_1/L) - L(1 + 0,5 c) \right]$	(10)

На рис. 2 приведены результаты вычислений с использованием предложенных формул для расчетной схемы (в), из которого видно, что наличие сверхнормативных теплотерь на начальных участках ветви, расположенных ближе к входу в трубопровод ветви обуславливает занижение результатов определения средних по длине трубопровода потерь (расхождение составляет 20–30 %). Сосредоточение участков с повышенными потерями на концевых участках при использовании формул (2)–(4) приводит к существенному завышению результатов расчетов. На рис. 2 приведены результаты вычислений по формулам (5)–(10). Деление ветви сети на две расчетные части позволило заметно уменьшить расхождение между расчетными данными и точным решением (линия 1). Для других вариантов исполнения тепловой сети получены качественно похожие результаты.

Выводы

1. Предложены формулы для определения потерь теплоты подающими трубопроводами разветвленных тепловых сетей.
2. Показано, что место локализации превышающих допустимые значения теплотерь заметно влияет на точность определения средних по длине потерь.
3. Повышения точности вычислений можно достичь делением ветви на расчетные фрагменты

Литература

1. Андреев С.Ю., Голованов А.П., Репин А.П. Энергосбережение в коммунальной теплоэнергетике [Текст]. / Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит, №3, 2007, с. 62–68.
2. Алексахин А.А., Ена С.В., Гордиенко Е.П. Расчет теплотерь подающими трубопроводами разветвленных тепловых сетей [Текст]. / Інтегровані технології та енергозбереження, № 1, 2016, Харків, с. 45–50.
3. Тепловая изоляция. Справочник строителя [Текст]. / под ред. Г.Ф. Кузнецова. – М.: Стройиздат, 1982. – 336 с.

4. Алексахин А.А., Ена С.В., Гордиенко Е.П. Оценка точности определения тепловых потерь трубопроводами разветвленных тепловых сетей [Текст]. / Інтегровані технології та енергозбереження, №1, 2017, Харків, с. 41–45.

5. Алексахин О.О. Теплові розрахунки мікрорайонних систем теплопостачання [Текст]. / ХНАМГ, 2010, с. 164.

Bibliography (transliterated)

1. Andreyev S.YU., Golovanov A.P., Repin A.P. Energoberezheniye v kommunal'noy teploenergetike [Tekst]. / Energoberezheniye. Energetika. Energoaudit, №3, 2007, p. 62–68.

2. Aleksakhin A.A., Yena S.V., Gordiyenko O.P. Raschet teplopoter' podayushchimi truboprovodami razvetvlennykh teplovykh setey [Tekst]. / Інтегровані технології та енергозбереження, № 1, 2016, Kharkiv, p. 45–50.

3. Teplovaya izolyatsiya. Spravochnik stroitelya [Tekst]. / pod red. G.F. Kuznetsova. – M.: Stroyizdat, 1982. – 336 p.

4. Aleksakhin A.A., Yena S.V., Gordiyenko O.P. Otsenka tochnosti opredeleniya teplovykh poter' truboprovodami razvetvlennykh teplovykh setey [Tekst]. / Інтегровані технології та енергозбереження, №1, 2017, Kharkiv, p. 41–45.

5. Aleksakhin O.O. Teplovi rozrakhunky mikrorayonnykh system teplopostachannya [Tekst]. / ХНАМГ, 2010, p. 164.

УДК 658.264

Алексахін О.О., Ена С.В., Гордієнко О.П.

**ВПЛИВ МІСЦЯ ЛОКАЛІЗАЦІЇ ПІДВИЩЕНИХ ТЕПЛОВИТРАТ
НА ПОДАЮЧОМУ ТРУБОПРОВОДІ ТЕПЛОМЕРЕЖІ
НА СЕРЕДНІ ПО ДОВЖИНІ ЗНАЧЕННЯ**

На підставі розв'язання диференційного рівняння, що описує охолодження теплоносія у межах елементарної ділянки подавального трубопроводу теплової мережі, отримано формули для обчислення теплових витрат розгалуженими теплопроводами. Показано, що величина середніх по довжині трубопроводу витрат теплоти залежить від місця локалізації ділянок мережі з підвищеними тепловими витратами.

Aleksakhin O.O., Yena S.V., Gordiyenko O.P.

**THE INFLUENCE OF THE INCREASED HEAT LOSSES LOCALIZATION ALONG
SUPPLYING HEAT PIPELINE ON LENGTH AVERAGE LOSSES**

Formulas were obtained for the calculation of branched pipelines heat losses. The differential equation was solved for heat carrier cooling within the elementary section of the supplying pipeline of the heat network. It was shown that pipeline average length heat losses depends on the localization of the network sections with increased thermal losses.

УДК 662.997

Селихов Ю.А., Коцаренко В.А., Горбунов К.А., Рябова И.Б.

ИНТЕГРАЦИЯ И ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ КОТТЕДЖА

Постановка проблемы. В условиях роста цен на энергоносители поиск новых эффективных энергосберегающих технологий для получения теплоты и использование нетрадиционных возобновляемых источников энергии (НВИЭ) актуален для всех отраслей промышленности и народного хозяйства. Особенно остро проблема обозначилась в теплоснабжении объектов жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ), где затраты топлива на производство теплоты, превосходят в 1,7 раза затраты на электроснабжение. Основными недостатками децентрализованных источников теплоснабжения являются низкая энергетическая, экономическая и экологическая эффективность. А высокие транспортные тарифы на доставку энергоносителей и частые аварии на теплотрассах усугубляют негативные факторы, присущие традиционному централизованному теплоснабжению. Одним из эффективных энергосберегающих способов, дающих возможность экономить органическое топливо, снижать загрязнение окружающей среды, удовлетворять нужды потребителей в технологическом тепле, является применение теплонасосных технологий производства теплоты [1].

Анализ последних исследований и публикаций. Энергетическая целесообразность применения тепловых насосов в качестве энергоисточников убедительно доказана результатами большого числа научных исследований и опытом эксплуатации миллионов теплонасосных установок (ТНУ) в промышленно развитых странах мира [2]. Сегодня в мире успешно эксплуатируется более 130 млн. теплонасосных установок различного функционального назначения. Общий объём продажи выпускаемых за рубежом тепловых насосов (ТН) составляет 125 млрд. долларов США, что превышает мировой объём продажи вооружений в 3 раза. Согласно данным Международного Энергетического Агентства (IEA) к 2020 г. в развитых странах мира доля отопления и горячего водоснабжения с помощью тепловых насосов должна составить 75 %. Однако решение вопросов выбора типа ТН, масштабов и областей их рационального использования в разных странах является далеко не однозначными. Производство ТНУ в каждой стране ориентировано, прежде всего, на удовлетворение потребностей внутреннего рынка.

В Украине, к сожалению, сегодня трудно указать какое-либо другое направление развития новой техники и технологии, которое бы находилось в таком разительном противоречии, как со своими потенциальными возможностями, так и с уровнем развития в других странах мира. Если в развитых и развивающихся странах счёт работающих ТНУ различного функционального направления ведётся на миллионы или сотни тысяч единиц, в Украине работают единичные установки, созданные, в основном на элементной базе холодильного оборудования, ввозимого из стран Западной Европы от специализированных фирм производителей. Разительное отставание Украины от стран успешно использующих теплонасосную технологию можно объяснить как объективными факторами – развитие энергетики в государстве осуществлялось в основном по пути централизованного теплоснабжения и теплофикации, так и субъективными – недостаточным вниманием конкретных предприятий к экономии топливно-энергетических ресурсов. К главным причинам относятся также отсутствие demonstra-

ционного парка работающих ТНУ различного функционального назначения и рекламы их достоинств и отсутствие государственной поддержки при разработке, исследованиях и внедрении данного типа оборудования. Например, на государственном уровне должен решаться вопрос о создании у отечественного потребителя заинтересованности в применении вместо традиционного энергорасточительного индивидуального отопления энергетически более эффективного энергосберегающего, хотя и относительно дорогого отопления на базе теплонасосной технологии. Согласно «Концепции развития топливно-энергетического комплекса Украины на 2006–2030 годы» предусматривается увеличение объема производства тепловой энергии за счёт термотрансформаторов, тепловых насосов и аккумуляционных электронагревателей с 1,7 млн. Гкал/год в 2005 г. до 180 млн. Гкал/год в 2030 г., т.е. больше, чем в 100 раз. Несомненно, что при соответствующей поддержке со стороны государства это могло бы быть большим стимулом в реальном, а не декларируемом внедрении энергосберегающих технологий. Но сегодня в правительстве обсуждается Закон о едином тарифе на электроэнергию для всех промышленных предприятий, что наряду с единым тарифом на тепловую энергию, сводит к нулю эффект от применения энергосберегающих технологий. Уместно заметить, что внедрение теплонасосных технологий во всех странах мира проходило и происходит при существенной государственной поддержке в виде двухставочного тарифа на покупку электроэнергии, субсидий покупателям ТН техники, субсидий и грантов производителям теплонасосного оборудования и фирмам, внедряющим теплонасосную технологию, налоговых или кредитных льгот. В Украине создание и внедрение ТНУ базируется в основном на энтузиазме исполнителей.

Тепловой насос представляет собой установку, преобразующую низкопотенциальную возобновляемую энергию естественных источников теплоты и/или низкотемпературных ВЭР в энергию более высокого потенциала, пригодную для практического использования [3]. На сегодняшний день тепловые насосы, без сомнения, являются наиболее перспективными среди источников «нетрадиционной энергетики» для решения проблем энергосбережения, благодаря возможности «черпать» возобновляемую энергию из окружающей среды. Поэтому, применение тепловых насосов в качестве теплоснабжающих установок, экономия органического топлива, снижение загрязнения окружающей среды, удовлетворение нужд потребителей в технологическом тепле, являются актуальными задачами.

Цель статьи. В данной работе авторами предлагается теплоэнергетическая система снабжения горячей водой и отоплением, которая была разработана, изготовлена и смонтирована на одном частном дворе в Харьковской области при реконструкции коттеджа. Ранее в системе отопления коттеджа применялся котел с мазутной горелкой [4]. Стоимость мазута с доставкой и перекачкой в емкость по месту расположения и использования круглый год составляет порядка ста тысяч гривен за год. Далее, подача мазута в котел осуществляется самотеком. Однако, возгорание мазута в котле осуществляется при температуре 90 °С. Поэтому, мазут необходимо подогреть до подачи в котел. Сгорание мазута в котле приводит к выбросам в атмосферу вредных веществ, а количество батарей отопления в доме к увеличению металлоемкости установки отопления. После рассмотрения недостатков этой системы, нами было принято решение о замене котла с мазутной горелкой на теплоэнергетическую систему: обеспечивающую частное домовладение горячей водой с помощью электрического водонагревателя и отоплением с помощью геотермального грунтового теплового насоса «грунт-вода» [5].

Нами была разработана новая технологическая схема теплоэнергетической системы горячего водоснабжения и отопления коттеджа, которая представлена на рис. 1.

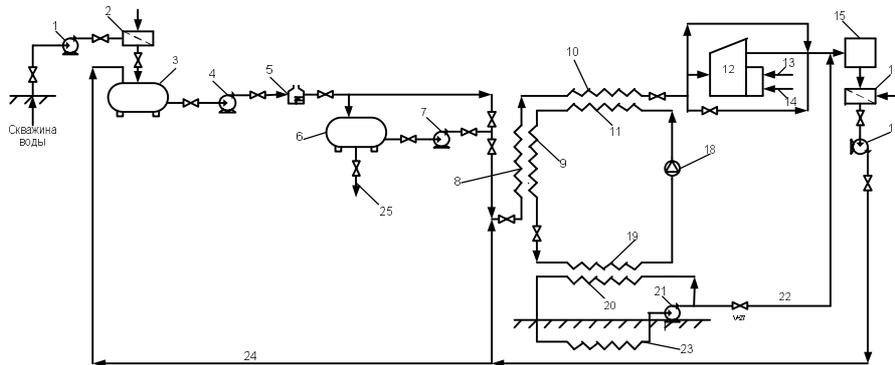


Рисунок 1 – Технологическая схема теплоэнергетической системы горячего водоснабжения и отопления коттеджа 1 – циркуляционный насос; 2 – аппарат химводоочистки;

3 – бак-аккумулятор; 4 – циркуляционный насос; 5 – электрический водонагреватель; 6 – бак-аккумулятор; 7 – циркуляционный насос; 8 – второй контур охладителя теплового насоса; 9 – первый контур охладителя теплового насоса; 10 – второй контур конденсатора теплового насоса; 11 – первый контур конденсатора теплового насоса; 12 – универсальный котел с мазутной горелкой; 13 – подача мазута; 14 – подача воздуха; 15 – пользователь; 16 – аппарат химводоочистки; 17 – циркуляционный насос; 18 – компрессор теплового насоса; 19 – первый контур испарителя теплового насоса; 20 – второй контур испарителя теплового насоса; 21 – циркуляционный насос; 22 – подача теплоносителя в режиме кондиционирования; 23 – грунтовый тепловой коллектор; 24 – обратная вода; 25 – слив воды

Новая теплоэнергетическая система может работать как сезонно, так и целый год.

Принцип действия системы при сезонной работе в теплое время года

Вода из скважины насосом 1 подается в установку химводоочистки 2, где очищается от солей и дальше поступает в бак-аккумулятор 3. Далее вода циркуляционным насосом 4 подается в электрический водонагреватель 5, где нагревается до необходимой температуры и поступает в бак-аккумулятор 6, откуда циркуляционным насосом 7 подается в контур горячего водоснабжения жилого дома 15. Невостребованная потребителем вода поступает в аппарат химводоочистки 16 и далее циркуляционным насосом 17 подается в бак-аккумулятор 3. В случае аварийной ситуации теплоноситель из бака-аккумулятора 6 может быть удалена в канализацию 25. В случае повышения температуры воздуха на улице до некомфортной отметки, включается в тепловом насосе режим кондиционирования. Вода из грунтового теплообменного коллектора 23 циркуляционным насосом 21 подается в контур 22 теплых полов, охлаждает площадь пола и воздуха в комнатах коттеджа до комфортной температуры.

Принцип действия установки для круглогодичной работы

В теплое время года принцип работы установки показан выше. А в холодное время года установка работает следующим образом. Вода с температурой $5 \div 7$ °С теплообменного коллектора 23 грунтового теплового насоса циркуляционным насосом 21 подается во второй контур испарителя 20 теплового насоса, где нагревает холодагент первого контура, который превращается в пар. Пар холодагента поступает в компрессор 18, где сжимается до высокой температуры и давления. Далее пар поступает в

первый контур конденсатора 11 теплового насоса, где отдает свое тепло второму контуру конденсатора 10 [5], в который подается вода циркуляционным насосом 7 из бака-аккумулятора 6. После конденсатора 10 пар превращается в жидкость и поступает в первый контур охладителя 9 теплового насоса и отдает свое тепло второму контуру 8 теплового насоса. Вода из бака-аккумулятора 6 циркуляционным насосом 7 подается во второй контур охладителя 8 уже подогретая до температуры 34–37 °С. Таким образом, вода нагревается сначала во втором контуре конденсатора 10, а затем во втором контуре охладителя и поступает к пользователю с необходимой температурой (максимальная 80 °С). Когда из строя выходит электрический водонагреватель и грунтовый тепловой насос, то в качестве теплового дублера выступает котельная установка 12 с мазутной горелкой 13 и подачей воздуха 14, которая подогревает воду до необходимой температуры и подает ее в систему отопления, и в систему горячего водоснабжения коттеджа. В случае аварийной ситуации есть возможность выпустить теплоноситель в канализацию 25 (слив воды из системы). В грунтовых тепловых насосах используется тепловая энергия, которая накоплена в почве за счет нагревания ее солнцем или другими источниками. Почва имеет свойство хранить солнечное тепло в течение длительного времени, которое ведет к относительно равномерному уровню температуры источника тепла в течение всего года, и это обеспечивает эксплуатацию теплового насоса с высоким коэффициентом преобразования. Работа теплоэнергетической системы управляется и контролируется в автоматическом режиме с персонального компьютера.

Получение тепла от каждого отдельно взятого метра трубы с теплоносителем во всех случаях напрямую зависит от показателей нескольких параметров. Это глубина укладки, наличие грунтовых вод, качество грунта и прочие.

В первую очередь нужно понимать баланс тепла в здании. Для этих расчетов можно воспользоваться формулой

$$R = (k \cdot V \cdot t) / 860, \quad (1)$$

где R – потребляемая мощность помещения (кВт/час); k – средний коэффициент потерь тепла зданием: например, равно 1 – отлично утепленное здание, а 4 – барак из досок; V – суммарный объем всего отапливаемого помещения, в куб.м.; t – максимальный перепад температуры между улицей и внутри помещения; 860 – значение, необходимое для перевода получившихся ккал в кВт. В случае с геотермальным тепловым насосом типа «грунт-вода» нужно еще рассчитать необходимую длину контура, который будет находиться в грунте. Известно, что 1 метр коллектора дает примерно 50 Вт. Зная требуемую мощность насоса, мы без труда рассчитаем сколько нам нужно труб для изготовления контура. Рассчитаем для нашего частного дома все параметры. Отапливаемая площадь 300 кв.м.; высота потолков 2,5 м; здание хорошо утеплено; минимальная температура зимой на улице – (- 25) °С; комфортная температура в помещении +22 °С. В первую очередь высчитываем отапливаемый объем помещения: 300 кв.м. х 2,5 м = 750 м³. Добавляем 50 м³ на коридоры и переходы, т.е общая отапливаемая площадь будет равна 800 м³. Затем вычисляем значение

$$t = 22 - (-25) = 47 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2)$$

Подставляем эти данные в формулу (1), кВт/ч

$$R = (k \cdot V \cdot t) / 860 = (1 \cdot 800 \cdot 47) / 860 = 43,721. \quad (3)$$

Мы получили требуемую мощность теплового насоса в 44 кВт/ч. Эту цифру увеличиваем на 20 %, иначе тепловой насос будет все время работать на полную мощность и может быстро выйти из строя.

$$R = 43,721 \cdot 1,2 = 52,47. \quad (4)$$

Следовательно, приобретать лучше агрегат на 53 кВт/ч. Для его функционирования нам потребуется коллектор общей длиной, м

$$l = \frac{53}{50} = 1060. \quad (5)$$

Выбираем тепловой насос «грунт-вода» с горизонтальным расположением коллектора потому, что у владельца частного дома есть участок земли, где можно разместить коллектор. Весь внешний контур системы собирается с применением труб выполненных из полиэтилена [6]. Схема горизонтального геотермального грунтового теплового насоса представлена на рис. 2. Вместо батарей отопления применяем теплый пол - трубопроводы из ПВХ [7].



Рисунок 2 – Схема горизонтального геотермального грунтового теплового насоса с расположением теплых полов на этажах

Нами был выполнен теплотехнический расчет геотермального грунтового теплового насоса.

Таким образом, массовый расход рабочего агента, кг/с, определяем по формуле

$$G = \frac{Q_B}{(q_K + q_{П.О})}, \quad (6)$$

где Q_B – теплопроизводительность геотермального грунтового теплового насоса; q_K – удельная тепловая нагрузка конденсатора, кДж/кг, $q_{П.О}$ – удельная тепловая нагрузка охладителя, кДж/кг.

Объемную производительность компрессора, м³/с, определяем по формуле

$$V_1 = G \cdot v_1, \quad (7)$$

где v_1 – удельный объем низкотемпературного рабочего агента в точке 1 диаграммы состояния.

Определяем расчетную полную тепловую нагрузку испарителя теплового насоса, кВт

$$Q_0 = G \cdot q_0, \quad (8)$$

где q_0 – удельная холодопроизводительность испарителя, кДж/кг.

Определяем расчетную тепловую нагрузку охладителя теплового насоса, кВт

$$Q_{\text{ПО}} = G \cdot q_{\text{ПО}}. \quad (9)$$

Определяем расчетную тепловую нагрузку конденсатора, кВт

$$Q_{\text{К}} = G \cdot q_{\text{К}}. \quad (10)$$

Определяем удельную работу компрессора теплового насоса, кДж/кг, зная электромеханический КПД компрессора $\eta_{\text{ЭМ}}$

$$l_{\text{КМ}} = \frac{l_{\text{а}}}{\eta_{\text{ЭМ}}}, \quad (11)$$

где $l_{\text{а}}$ – удельная внутренняя работа компрессора теплового насоса, кДж/кг.

Определяем удельный расход электроэнергии на единицу выработанного тепла

$$\mathcal{E}_{\text{Т.Н}} = \frac{l_{\text{КМ}}}{(q_{\text{К}} + q_{\text{ПО}})}. \quad (12)$$

Определяем электрическую мощность компрессора теплового насоса, кВт

$$N_{\text{КМ}} = l_{\text{КМ}} \cdot G. \quad (13)$$

Определяем коэффициент трансформации теплоты

$$K_{\text{T}} = \frac{(q_{\text{К}} + q_{\text{ПО}})}{l_{\text{КМ}}}. \quad (14)$$

Определяем среднюю температуру низкотемпературного рабочего агента, К

$$T_{\text{Н.СР}} = \frac{(t_{\text{H1}} + t_{\text{H2}})}{2} + 273, \quad (15)$$

где t_{H1} – температура теплоносителя на входе в испаритель, °С, t_{H2} – температура теплоносителя на выходе из испарителя, °С.

Определяем среднюю температуру полученного тепла, К

$$T_B^{CP} = \frac{(t_{B1} + t_{П.О})}{2} + 273, \quad (16)$$

где t_{B1} – температура теплоносителя на выходе из конденсатора, °С, $t_{П.О}$ – температура теплоносителя на входе в охладитель, °С.

Определяем коэффициент работоспособности тепла с потенциалом T_B^{CP}

$$\tau_T = 1 - \frac{T_{O.C}}{T_B^{CP}}, \quad (17)$$

где $T_{O.C}$ – температура окружающей среды, К.

Определяем коэффициент работоспособности холода с потенциалом $T_{H.CP}$

$$\tau_O = 1 - \frac{T_{O.C}}{T_{H.CP}}. \quad (18)$$

Определяем КПД геотермального грунтового теплового насоса

$$\eta = \frac{q_K + q_{П.О}}{l_{KM}} = \frac{271 \cdot 0,1}{82,2} = 0,303 (30,3). \quad (19)$$

Нами был выбран геотермальный грунтовой тепловой насос фирмы «Nibe». Предложенная система была смонтирована на частном подворье в Харьковской области при реконструкции коттеджа и проработала полных четыре года, экономия топлива составила сто тысяч гривен за год. Срок окупаемости такой системы составил 2,5 года.

Выводы. Таким образом, применение теплоэнергетической системы снабжения (горячей водой и отоплением), в которой совместно с электрическим водонагревателем используется геотермальный грунтовой тепловой насос, позволяет: уменьшить себестоимость тепловой энергии за счет снижения материалоемкости и затрат на оборудование, которое используется; экономить органическое топливо; уменьшить тепловую нагрузку и загрязнение окружающей среды.

Литература

1. Концепция государственной энергетической политики Украины на период до 2020 г. // Информационное приложение. – 2001. – № 10. – 8 с.
2. Овчаренко В.А. Овчаренко А.В. Використання теплових насосів // Холод М+Т, 2006, №2 с. 34–36.
3. Даффи Дж., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии. – М: Мир, 1977. – 420 с.
4. Теплоснабжение: Учебник для вузов / А.А. Ионин, Б.М. Хлыбов, В.Н. Братенков, Е.Н. Терлецкая; Под ред. А.А. Ионина. – М.: Стройиздат, 1982. – 336 с., ил.

5. Рей Д., Макмайл Д. Тепловые насосы: Пер. с англ. – М.: Энергоиздат, 1982. – 224 с.
6. СНиП 2.04.14-88 "Тепловая изоляция оборудования и трубопроводов".
7. СНиП 2.04.01-85 "Внутренний водопровод и канализация зданий".

Bibliography (transliterated)

1. Kontseptsiya gosudarstvennoy energeticheskoy politiki Ukrainyi na period do 2020 g. // Informatsionnoe prilozhenie. – 2001. – # 10. – 8 p.
2. Ovcharenko V.A. Ovcharenko A.V. Viktoristannya teplovih nasosiv // Holod M T, 2006, #2. – p. 34–36.
3. Daffi Dzh., Bekman U.A. Teplovyie protsessyi s ispolzovaniem solnechnoy energii. – М: Mir, 1977. – 420 p.
4. Teplosnabzhenie: Uchebnyk dlya vuzov / A.A. Ionin, B.M. Hlyibov, V.N. Bratenkov, E.N. Terletskaia; Pod red. A.A. Ionina. – М.: Stroyizdat, 1982. – 336 p., il.
5. Rey D., Makmaykl D. Teplovyie nasosyi: Per. s angl. – М.: Energoizdat, 1982. – 224 p.
6. SNiP 2.04.14-88 "Teplovaya izolyatsiya oborudovaniya i truboprovodov".
7. SNiP 2.04.01-85 "Vnutrenniy vodoprovod i kanalizatsiya zdaniy".

УДК 662.997

Селіхов Ю.А., Коцаренко В.О., Горбунов К.О., Рябова І.Б.

**ІНТЕГРАЦІЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ СИСТЕМИ ОПАЛЮВАННЯ
КОТЕДЖУ**

Запропонована теплоенергетична система постачання: гарячою водою і опалюванням, у якій спільно з електричним водонагрівником, використовується геотермальний ґрунтовий тепловий насос. Ця система дозволяє: зменшити собівартість теплової енергії за рахунок зниження матеріалів і витрат на устаткування; економити органічне паливо; зменшити теплове навантаження і забруднення довкілля.

Selikhov Yu.A., Kotsarenko V.A., Gorbunov K.A., Ryabova I.B.

**INTEGRATION AND OPTIMIZATION OF THE COTTAGE HEATING SYSTEM
ACTION**

The system of supply is offered: by hot water and heating in which jointly with electric water heater, the geothermal ground thermal pump is utilized. This system allows: to decrease the prime price of thermal energy due to the decline of materials and charges on an equipment; to save an organic fuel; to decrease the thermal loading and contamination of environment.

УДК 662.71.74

Збараз Л.И., Ганжа А.Н., Павлова В.Г.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ОТОПИТЕЛЬНОЙ КОТЕЛЬНОЙ

Отопительные котельные, традиционно, проектируются в составе нескольких котлов одинаковой мощности [1]. Так, например, при подключённой тепловой нагрузке 2,0 МВт, принято устанавливать 2 котла по 1,0...1,25 МВт. Для покрытия отопительной нагрузки до 15 МВт проектируют 3 котла по 5 МВт и т.д. Однако, установка котлов разной мощности для покрытия отопительной нагрузки может оказаться более рациональной. Это связано с тем, что даже при плавном регулировании нагрузки, КПД котла достигает максимума в достаточно узком диапазоне. Это, как правило, 85...90 % номинальной мощности.

В настоящей работе проанализированы несколько вариантов компоновки энергетического оборудования котельной, определён плановый расход энергоресурсов и выбран вариант с минимальными прямыми затратами за отопительный сезон.

Для анализа рассматривалась работа отопительной котельной по ул. Ленина, 66 в пос. Б. Рогань, Харьковского района, Харьковской области. Подключённая тепловая нагрузка – 3,837 МВт (3,3 Гкал/ч) [2]. Для определения потерь с утечкой теплоносителя объём системы отопления принимаем 65 м³/МВт подключённой нагрузки – 214,5 м³ [3]. Расчётные тепловые потери – 13,67 %.

Система отопления работает по температурному графику 95–70 °С. Регулирование осуществляется качественным методом.

В котельной установлено 2 котла КОЛВИ-2000 с горелками ГГБ 2,5 МВт. В данной работе это оборудование рассматривается как базовый вариант.

Для проведения анализа и определения расхода газа за сезон воспользуемся статистическими данными продолжительности стояния наружных температур в отопительном сезоне по Харьковскому региону [4], которые приведены в таблице 1. Кроме того, в таблице приведены продолжительность стояния наружных температур, температуры в подающем и обратном трубопроводах и соответствующая тепловая нагрузка отопительной котельной с учётом тепловых потерь по длине трубопроводов и потерь с нормативной утечкой теплоносителя.

Таблица 1 – Статистические данные продолжительности стояния наружных температур в отопительном сезоне

Температура наружного воздуха	ниже-25 °С	-25...-20 °С	-20...-15 °С	-15...-10 °С	-10...-5 °С	-5...0 °С	0...+10 °С
Продолжительность, час.	47	125	246	487	829	1299	1551
T _{обр.} °С	95	83	76	68	61	53	38
T _{обр.} °С	70	67	61	55	50	44	33
Тепловая нагрузка с учётом потерь, и утечки МВт	3,872	3,603	3,153	2,704	2,255	1,806	0,907

Тепловая схема котельной традиционная и приведена на рис. 1.

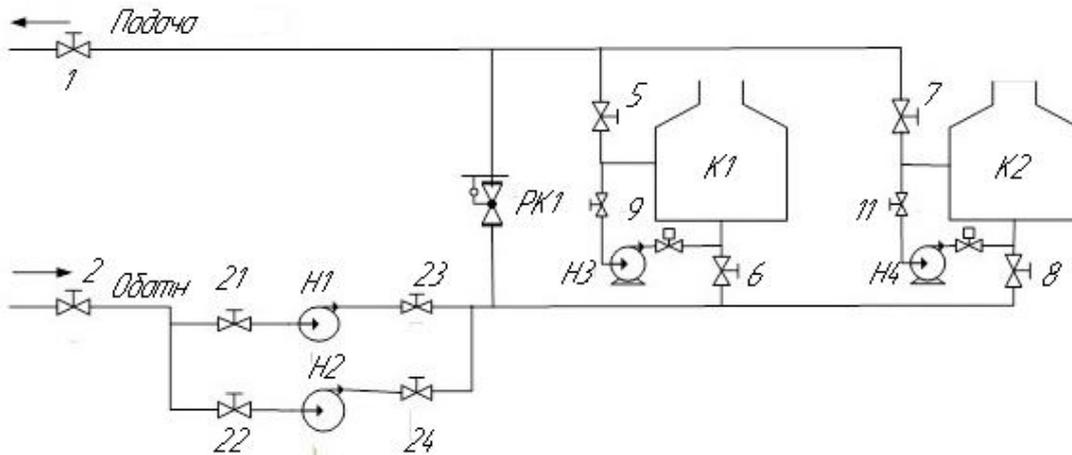


Рисунок 1 – Тепловая схема котельной

K1, K2 – отопительные котлы № 1, № 2; Н1, Н2 – циркуляционные насосы;
 Н3, Н4 – насосы рециркуляции котлов № 1, № 2 – соответственно;
 РК1 – регулирующий клапан для поддержания стабильного гидравлического режима.
 Цифрами обозначена запорная арматура

Как видно по схеме, для покрытия данной тепловой нагрузки могут быть использованы котлы мощностью 1,0, 1,25; 1,6; 2; 2,5 и 3,15 МВт установленные по параллельной схеме в одной из шести нижеперечисленных комбинации: (2 МВт; 2 МВт); (1,6 МВт; 2,5 МВт); (1,25 МВт; 2,5 МВт); (1,6 МВт; 2 МВт); (1 МВт; 3,15 МВт), (1,6 МВт; 1,6 МВт). Стоимость монтажа котельной в любом из шести вариантов отличается мало. Вариант установки трёх котлов в данном случае не рассматриваем из-за высокой первоначальной стоимости.

На этапе проектирования заранее неизвестна зависимость КПД котла от нагрузки. Её можно будет определить в последствии, при проведении пусконаладочных работ оборудования и составлении режимных карт, с последующей корректировкой оптимальной нагрузки на котлы. Воспользуемся среднестатистической зависимостью КПД брутто котла от удельной нагрузки, которая приведена на рис. 2.

Для решения оптимизационной задачи введём следующие обозначения.

Удельной нагрузкой на i -й котёл q_i будем называть величину равную отношению вырабатываемой тепловой энергии i -м котлом – Q_i к номинальной мощности i -го котла – Q_i^H .

$$q_i = \frac{Q_i}{Q_i^H}. \quad (1)$$

С помощью прикладного пакета программ Statistika 7 [5] аппроксимируем данную кривую полиномом пятой степени:

$$y = 0,2564x^5 - 1,2354x^4 + 2,007x^3 - 1,7134x^2 + 0,9479x + 0,6251. \quad (2)$$

Формализация рассматриваемой оптимизационной задачи формулируется следующим образом: среди всех возможных вариантов установки оборудования выбрать

такой вариант, при котором прямые затраты энергоносителей за отопительный сезон будут минимальными.

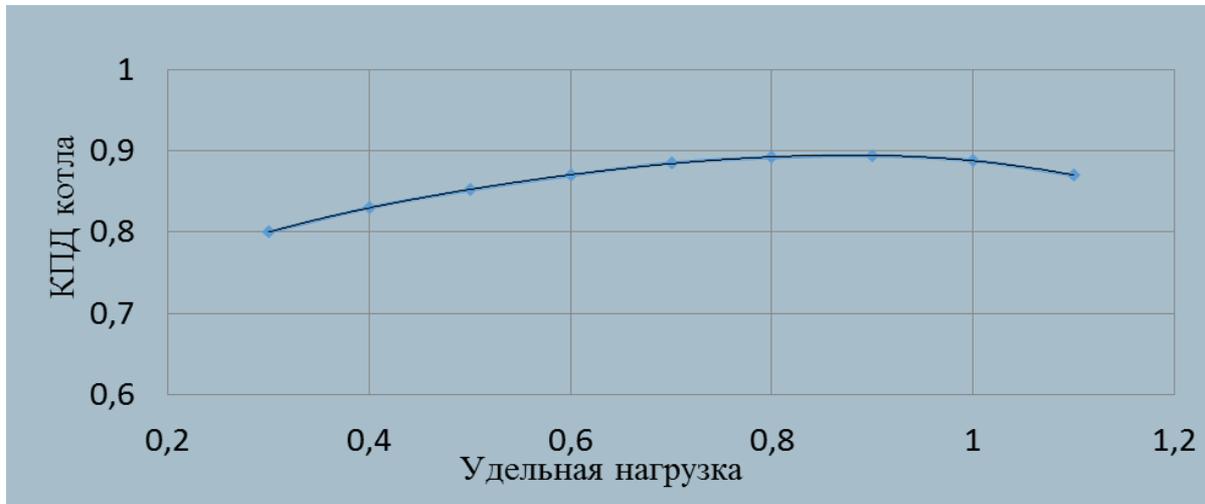


Рисунок 2 – Зависимость КПД котла от удельной нагрузки

Это двухуровневая оптимизационная задача, для решения которой необходимо применить принцип декомпозиции.

Задачу будем решать в общем виде для произвольного количества котлов.

На первом уровне решим задачу оптимального распределения нагрузки между котлами разной мощности, при условии, что зависимость КПД котлов от вырабатываемой мощности $\eta = \eta(q_i)$ одинакова, и подчиняется уравнению (1).

На величину q_i наложим ограничения:

$$0,3 \leq q_i \leq 1,1. \quad (3)$$

Суммарная выработка тепловой энергии n котлами:

$$Q_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n Q_i.$$

Расход газа i-м котлом:

$$G_i = \frac{q_i \cdot Q_i^H}{Q_H^P \cdot \eta(q_i)}.$$

Для принятых обозначений суммарный расход газа:

$$G_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n \frac{q_i \cdot Q_i^H}{Q_H^P \cdot \eta(q_i)}.$$

По условию задачи $G_{\Sigma} \rightarrow \min$. Нам надо определить, при каких значениях вектора q_i выполняется это условие.

Применим обычный аппарат дифференциального исчисления функции нескольких переменных:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\partial G_{\Sigma}}{\partial q_i} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i^n \cdot \eta(q_i) - Q_i^n \cdot q_i \cdot \eta'(q_i)}{Q_i^n \cdot \eta^2(q_i)} = 0.$$

Для выполнения равенства достаточно, чтобы каждое слагаемое равнялось нулю.

$$\eta(q_i) - q_i \eta'(q_i) = 0.$$

Тогда оптимальная удельная нагрузка на *i*-й котёл:

$$q_i^{opt} = \frac{\eta(q_i)}{\eta'(q_i)}.$$

При условии: $\eta(q_i) \neq 0, \eta'(q_i) \neq 0$.

Таким образом, при одинаковой зависимости $\eta(q_i)$ всех котлов, как мы приняли для новой котельной до проведения пусконаладочных работ, относительная нагрузка q_i на котлы так же одинаковая.

На втором уровне решим задачу выбора оптимальной компоновки оборудования из шести выше перечисленных вариантов. Методом полного перебора [7] определяем комбинацию, при которой затраты топлива на покрытие тепловой нагрузки минимальные. Результаты расчёта сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Расход ресурсов за сезон по вариантам

	Вариант компоновки оборудования (мощность в МВт)					
	2,0+2,0	1,6+2,5	1,25+2,5	1,6+2,0	1,0+3,5	1,6+1,6
Планный расход газ за сезон, тыс. м ³	1011,97	1010,82	998,97	1016,61	1002,73	1013,23
Разница между базовым и предлагаемым вариантом, тыс. м ³	базовый вариант	1,146	12,999	-4,637	9,239	-1,259
Экономия (перерасход), тыс. грн.	базовый вариант	9,803	111,228	-39,678	79,060	-10,777

Сравнивая базовый вариант установки оборудования (2 МВт + 2 МВт) с предлагаемыми вариантами делаем вывод, что при установке котлов разной мощности расход топлива за сезон может быть как выше, так и ниже базового. Это зависит от многих факторов: подключённой нагрузки, объёма и протяжённости тепловых сетей, способа прокладки тепловых сетей, фактической утечки и т.д. Минимальный расход газа за сезон для данной котельной получаем при установке котлов (1,25 МВт; 2,5 МВт), причём экономия газа достигает 12,999 тыс. м³. При стоимости газа для промышленности 8,55684 грн./м³ экономия составляет 111,228 тыс. грн. за сезон, причём капитальных

затрат на реконструкцию не требуется, только математическое моделирование работы оборудования на этапе проектирования.

Данное решение позволяет сказать следующее:

1. При одинаковой зависимости КПД от относительной нагрузки котла минимальный расход газа достигается при одинаковой относительной нагрузке на котлы и не зависит от мощности котла.
2. При установке котлов разной мощности расход ресурсов может быть как выше, так и ниже базового – котлов одинаковой мощности, причём отклонение достигает $\pm 1,5\%$.

Выводы. На этапе проектирования или эксплуатации отопительной котельной можно методами математического программирования смоделировать работу оборудования и рассмотреть возможность установки или использования котлов различной мощности. Это позволит снизить прямые затраты при эксплуатации в отопительном сезоне и оптимально использовать тепловую мощность оборудования.

Литература

1. Соколов Е.Я. Теплофикация и тепловые сети: Учебник для вузов. -7-е изд. /Соколов Е.Я. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 472 с.
2. Збараз Л.И. Математическое моделирование и оптимизация работы тепловых сетей с учётом тепловых потерь/ Л.И. Збараз, В.Г. Павлова //Вестник Приднепровской государственной академии строительства и архитектуры.– 2016.– № 8 (221). – стр. 42–50.
3. ДБН В.2.5-39:2008 «Тепловые сети».
4. Стоянов Ф.А. Методы системного анализа в задачах оптимального проектирования централизованных систем теплоснабжения: Учебное пособие для ВУЗов./ Ф.А. Стоянов, С.Ю. Андреев, Л.П. Шевченко. Харьков: Золотые страницы. – 2005.–140 с.
5. Халафян А.А. Statistica 6. Статистический анализ данных. 3-е издание. Учебник / Халафян А.А. –М.: ООО «Бином-Пресс».– 2007. – 512 с.
6. Козин В.Е. Учебное пособие для студентов вузов./В.Е. Козин, Т.А. Левина, А.М. Марков и др. – М.: Высш. школа, 1980. – 408 с.
7. Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование/ Д. Химмельблау– М.: Мир.– 1975. – 536 с.

Bibliography (transliterated)

1. Sokolov E.Ya. Teplofikatsiya i teplovyie seti: Uchebnik dlya vuzov. -7-e izd. /Sokolov E.Ya. – М.: Izdatelstvo MEI, 2001. – 472 p.
2. Zbaraz L.I. Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya raboty teplovyih setey s uchyotom teplovyih poter/ L.I. Zbaraz, V.G. Pavlova //Vestnik Pridneprovskoy gosudarstvennoy akademii stroitelstva i arhitekturyi.– 2016.– # 8 (221). – p. 42–50.
3. DBN V.2.5-39:2008 «Teplovyie seti».
4. Stoyanov F.A. Metodyi sistemnogo analiza v zadachah optimalnogo proektirovaniya tsentralizovannyih sistem teplosnabzheniya: Uchebnoe posobie dlya VUZov./ F.A. Stoyanov, S.Yu. Andreev, L.P. Shevchenko. Harkov: Zolotyie stranitsyi. – 2005.–140 p.
5. Halafyan A.A. Statistica 6. Statisticheskiy analiz dannyih. 3-e izdanie. Uchebnik / Halafyan A.A. –М.: ООО «Binom-Press».– 2007. – 512 p.

6. Kozin V.E. Uchebnoe posobie dlya studentov vuzov./V.E. Kozin, T.A. Levina, A.M. Markov i dr. – M.: Vyssh. shkola, 1980. – 408 p.

7. Himmelblau D. Prikladnoe nelineynoe programmirovaniye/ D.Himmelblau– M.: Mir.– 1975. – 536 p.

УДК 662.71.74

Збараз Л.И., Ганжа А.М., Павлова В.Г.

РОЗРОБКА АЛГОРИТМУ АВТОМАТИЧНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ОПАЛЮВАЛЬНОЇ КОТЕЛЬНОЇ

У даній роботі проаналізовані кілька варіантів компоновання енергетичного обладнання котельної, визначено планові витрати енергоресурсів і обрано варіант з мінімальними прямими витратами за опалювальний сезон.

На етапі проектування опалювальної котельної доцільно методами математичного моделювання змоделювати роботу обладнання і розглянути оптимальні варіанти установки котлів різної потужності. Це дозволить знизити прямі витрати при експлуатації в опалювальному сезоні і раціонально використовувати теплову потужність обладнання.

Zbaraz L., Ganzha A., Pavlova V.

DEVELOPMENT OF HEATING BOILER HOUSE ENERGY EQUIPMENT AUTOMATIC DESIGN AND OPTIMIZATION ALGORITHM

Several variants for the layout of the boiler equipment are analyzed in this paper. Also, the planned costs of energy resources are determined. The variant that provides the minimum direct costs for the heating season is chosen. Methods of mathematical modeling are recommended at the design stage for the selection of boilers with different capacities in order to choose the best variant. This allows to reduce direct costs during operation in the heating season and to use rationally the thermal capacity of the equipment.

УДК 544.47

Краснокутский Е.В., Ведь В.Е., Кузнецова М.М.

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВТОРИЧНЫЕ НОСИТЕЛИ КАТАЛИЗАТОРОВ ОЧИСТКИ ГАЗОВЫХ ВЫБРОСОВ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Настоящая работа посвящена исследованию систем «каталитически активное покрытие – вторичный носитель». Вторичный носитель представляет собой алюмокремниевую стеклокристаллическую композицию с добавками 3d-переходных элементов в ее состав. Изучено влияния присутствия 3d-переходных элементов в составе промежуточных покрытий на изменение активности палладийсодержащего катализатора. Исследованы основные показатели эффективности протекания неизотермического гетерогенно-каталитического процесса конверсии бензола в зависимости от типов переходных металлов, входящий в состав промежуточных покрытий. Проведен комплексный анализ морфологии как промежуточных стеклосодержащих вторичных носителей катализаторов, так и поверхности нанесенных на них слоев каталитически активных соединений, что позволило оценить влияние характерных особенностей строения покрытий на поверхностную константу скорости процесса конверсии и коэффициент массоотдачи.

Введение

Автомобильный транспорт и мусороперерабатывающие комплексы являются основными потребителями производимых в мире. Как и в системах дожигания отработавших газов двигателей внутреннего сгорания, так и системах каталитической очистки отходящих газов мусороперерабатывающих комплексов, имеют место динамически меняющиеся параметры газового потока, омывающего катализатор. Перепады температур могут достигать до 200 К, а скоростей газового потока до 50 % от средней скорости. Указанные условия приводят к механическому разрушению не только каталитической поверхности, но и носителя катализатора, что снижает срок эффективного функционирования очистных систем. Эффективное функционирование катализатора в процессах очистки газовых выбросов определяется также его химической активностью, которая является функцией не только его качественного и количественного состава, но также зависит от качественного и количественного состава носителя катализатора. Во многих случаях, когда носителем катализатора является металл или керамика, изменение химического состава в широких пределах не представляется возможным. Это приводит к идее создания промежуточного (вторичного) носителя катализатора, локализованного на поверхности первичного носителя (металла или керамики) и размещающего на своей поверхности слой каталитически активных соединений. Подобная многослойная система за счет возможности варьирования в широких пределах качественного и количественного составов промежуточного покрытия лишена недостатков двухслойных систем («носитель-катализатор»), а также предоставляет возможность управлять термомеханическими и каталитическими свойствами каталитического покрытия.

Постановка задачи

Термомеханическая устойчивость и каталитическая активность катализаторов в обезвреживании газовых выбросов автомобильного транспорта, теплоэнергетических

установок и мусороперерабатывающих комплексов определяется, как известно, качественным и количественным составом каталитических покрытий. Однако не в последнюю очередь каталитическая активность также определяется промотирующими и модифицирующими свойствами носителя катализатора. Промотирующие свойства носителя являются функцией его качественного, количественного состава, а также микроструктуры и термической предыстории. Экспериментальные и теоретические исследования состава носителя катализатора позволяют найти такие его значения, которые позволят значительно повысить термомеханическую устойчивость и каталитическую активность катализаторов. Однако поскольку носителями каталитических покрытий являются материалы либо керамической, либо металлической природы, на состав носителей накладываются значительные ограничения, связанные с их механическими и эксплуатационными свойствами.

Для обхода указанного ограничения нами предложено использовать промежуточные (вторичные) носители стеклокристаллической природы. Вторичные носители формируются на поверхности первичного носителя (металла или керамики), а затем на поверхности вторичного носителя создается слой каталитически активного покрытия. Приведенная трехслойная система позволяет обойти ограничение состава носителя катализатора, что является ее неоспоримым преимуществом. С другой стороны, следует отметить, что трехслойная система, как впрочем, и двухслойная система типа «носитель-катализатор», имеет недостаток, связанный с разницей температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР). Указанная разница неминуемо приводит к возникновению механических напряжений между слоями каталитической системы и, как следствие, к ее механическому разрушению в условиях динамических термических параметров эксплуатации блоков каталитической нейтрализации.

Именно использование нами вторичных носителей стеклокристаллической природы позволяет избежать накопления критических термомеханических напряжений между слоями первичного носителя, вторичного носителя и слоя каталитически активных компонентов. Это связано с возможностью подбора такого качественного и количественного состава стеклокристаллического носителя, который позволит получить промежуточное по своему значению ТКЛР и позволит использовать вторичного носителя в роли демпфера между слоями первичного носителя и катализатора.

Перед исследованием поставлена цель определения эффективности эксплуатационных характеристик катализаторов в процессах обезвреживания газовых выбросов и выявления управляющих факторов, посредством которых можно повысить рабочие параметры на основе комплексного исследования поверхностной структуры носителей каталитических покрытий, их морфологии, морфологии разрабатываемых катализаторов.

Морфология поверхностей синтезированных вторичных носителей и катализаторов

Синтезируемые вторичные покрытия в соответствии с предложенной нами методикой формируются на поверхности фольги и представляют собой системы оксидов в виде аморфных или стеклокристаллических адгезиов. Первичным носителем является фольга сплава NiCrA (the same as NiCr80/20, Ni80Cr20, Chromel A, N8, Nikrothal 8, Resistohm 80, Cronix 80, Nichrome V, HAI-NiCr 80). В настоящей работе исследуются следующие составы оксидных систем вторичных носителей: manganese-aluminum-silicon (MAS), nickel-aluminum-silicon (NAS) cobalt-aluminum-silicon (CAS), растровая электронная микроскопия поверхностей которых приведена на рис. 1.

Покриття всіх вищеуказаних композицій мають високу механічну міцність, сплошність і адгезію до поверхні металу. На поверхні фольги були сформовані покриття. Механічна міцність покриттів вивчалася в декількох місцях. Було показано відсутність тріщин і сколів на поверхні покриття в місцях вигинів. Термічну стабільність каталітично активного покриття на поверхні металічної фольги досліджували троекратним тепловим ударом від 1000°C до кімнатної температури, внаслідок чого не було виявлено відшарування покриття.

Дослідження структури покриттів проводилося з допомогою оптичної, скануючої електронної та атомно-силової мікроскопії.

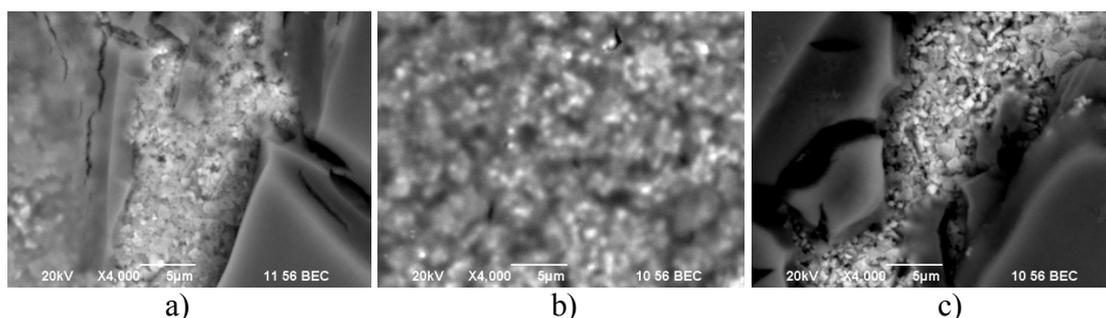


Рисунок 1 – Зовнішній вигляд склокристалічних покриттів складу Ni-Al-S (а), Co-Al-S (б), Mn-Al-S (в). Растрована електронна мікроскопія

Як видно з рис. 1б Co-містять покриття є сплошними, повністю покривають носій фольгу сплаву NiCrA і мають зернисту структуру поверхні, що містить незначільну кількість кристалічних включень передбачуваних складів $\text{Co}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$, $\text{Co}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$ (за даними рентгеноструктурного аналізу). Ni-містять покриття характеризуються наявністю великих структурних елементів типу каналів і височин. Ширина каналів становить від 5 до 15 мкм. Кінці каналів і тріщин характеризуються гострими кутами і відсутністю слідів оплавлення. Така структура характерна для кристалічних покриттів, що підтверджується даними рентгеноструктурного аналізу покриття NAS. Покриття містить наступні кристалічні компоненти $\text{Ni}_{10.3}\text{Al}_{11.3}\text{Si}_{2.4}\text{O}_{32}$, $\text{Ni}_{27}\text{Al}_{13.9}\text{Si}_{5.1}\text{O}_{48}$, $\text{Ni}_{12.48}\text{Al}_7\text{Si}_{4.5}\text{O}_{32}$, $\text{Ni}_3\text{Al}_2\text{SiO}_8$. Mn-містять покриття характеризуються наявністю великих структурних елементів типу каналів і височин. Ширина каналів становить від 5 до 15 мкм. Кінці каналів і тріщин характеризуються гострими кутами і відсутністю слідів оплавлення. Така структура характерна для кристалічних покриттів, що підтверджується даними рентгеноструктурного аналізу покриття MAS. Покриття містить наступні кристалічні компоненти $\text{Mn}_{0.86}\text{Al}_{1.14}(\text{SiO}_4)\text{O}$, $\text{Mn}_{1.9}\text{Al}_{3.8}\text{Si}_{8.3}\text{O}_{24}$, $\text{Mn}_3\text{Al}_{12}(\text{SiO}_4)_3$, $\text{Mn}_{46}(\text{Al}_{92}\text{Si}_{100}\text{O}_{384})$.

Відповідно до запропонованої нами методики на поверхні вторинних носіїв формуються шари каталітично активних сполук. В даній роботі в якості каталітично активного речовини був обраний оксид палладію PdO. Растрована електронна мікроскопія отриманих покриттів представлена на рис. 2.

Рисунок 2 показує, що каталітично активний шар оксиду палладію повністю екранує структуру поверхні вторинного носія, з чого випливає, що товщина шару PdO досягає до 1 мікрону, що відповідає кількості нанесеного оксиду палладію.

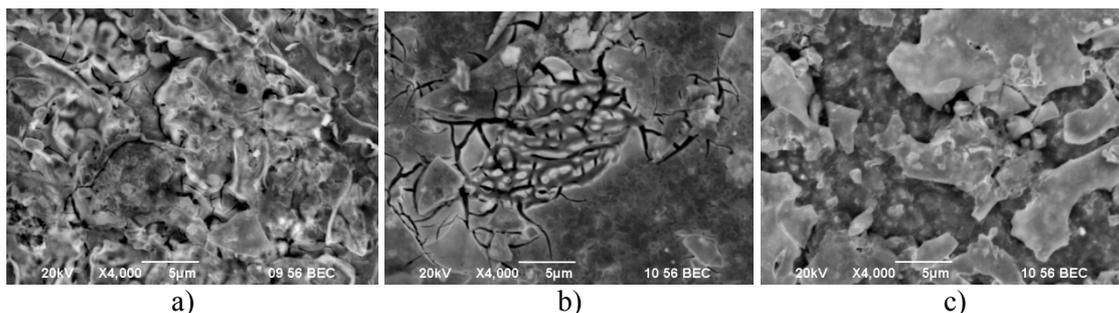


Рисунок 2 – Внешний вид покрытия PdO на поверхностях стеклокристаллических покрытий составов Ni-Al-S (a), Co-Al-S (b), Mn-Al-S (c). Растровая электронная микроскопия

Из рис. 2 (a) следует, что в случае использования в качестве вторичного носителя Ni-содержащую стеклообразную фазу катализатор на основе оксида палладия формирует сплошную поверхность, характеризующуюся развитой системой микротрещин и отсутствием сглаженных и оплавленных краев трещин. Рисунок 2 (b) показывает, что на поверхности Co-содержащего покрытия слой оксида палладия формирует более густую сеть трещин, по сравнению с системой на основе никеля. Данная поверхность характеризуется также наличием незначительного количества округлений сколов и трещин. На рис. 2 (c) показана структура поверхности каталитического слоя оксида палладия на вторичном Mn-содержащем носителе. Слой PdO полностью заполняет каналы и трещины вторичного покрытия и формирует на его поверхности агрегаты размером от 5 до 25 нм. Каталитическая поверхность характеризуется наличием выраженных острых углов, сколов и отсутствием округлых и оплавленных граней и ребер.

Внешний вид рассмотренных каталитических поверхностей свидетельствует об отсутствии процессов стеклования в момент формирования слоя оксида палладия, что приводит к малой или отсутствующей миграции PdO в толщу вторичного носителя. Это позволяет предположить о близкой по значению скорости конверсии газовых выбросов на синтезированных поверхностях в условиях внешнEDIффузионного торможения.

Определение каталитической активности композитных покрытий

Каталитическую активность синтезированных каталитических покрытий в процессах конверсии газов, подлежащих очистке, определяли с помощью модельной установки проточного типа. Испытания каталитических преобразователей проводились в реакциях окисления бензола. Для определения газообразных компонентов, входящих в состав отработанных газов, использовались измерительные приборы «Инфракар» и «Окси». Условия определения каталитической активности следующие: линейная скорость разовой смеси – 1.5 м/с, размер частиц катализатора – 5×10 мм, скорость нагрева – 10 °C/мин. Состав модельной смеси, содержащей бензол, г/м³: бензол – 10, воздух – все остальное.

Для определения влияния состава вторичного носителя каждый образец импрегнировали каталитически активными соединениями PdO одинакового качественного и количественного состава. Полученные таким образом каталитические композиции были изучены на исследовательском стенде.

На рисунке 3 показана температурная зависимость степени конверсии испытуемого соединения – бензола – для покрытий серии составов алюминий-бор.

Как показывают экспериментальные данные, приведенные на рис. 3, температурные зависимости степени конверсии бензола для случаев использования вторичных носителей катализаторов различных составов имеют свои особенности.

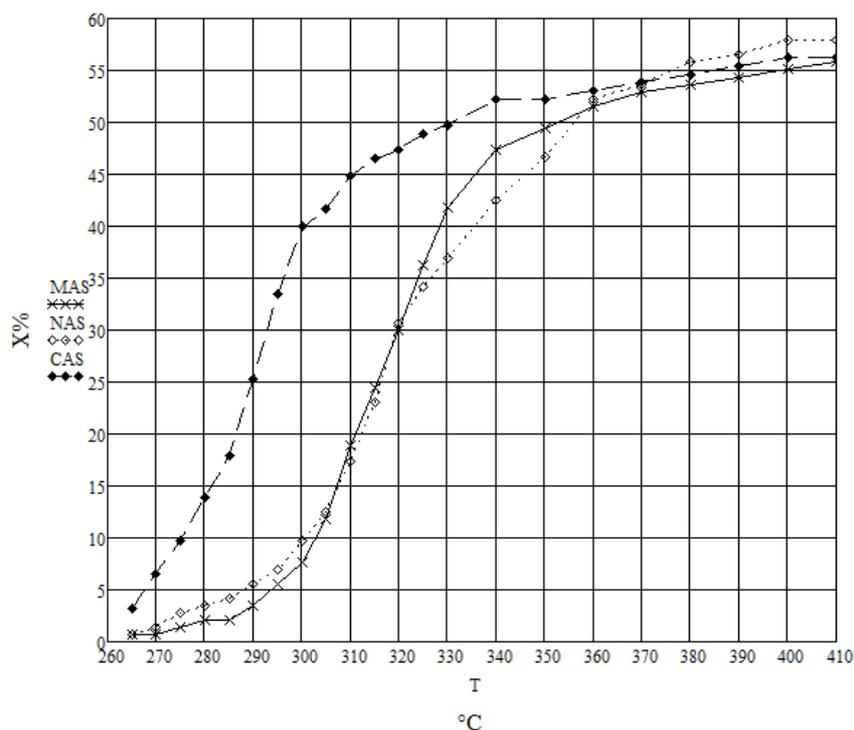


Рисунок 3 – Температурная зависимость степени конверсии бензола X для покрытий составов MAS, NAS и CAS

Каждая зависимость рисунка 3 имеет два участка: низкотемпературный (соответствующий лимитированию процесса конверсии бензола химическими процессами на поверхности каталитического покрытия) и высокотемпературный (соответствующий лимитированию процесса конверсии бензола особенностями массопереноса в системе «газовый поток – поверхность каталитического покрытия»).

На изменение зависимостей степени конверсии от температуры в низкотемпературной области оказывают влияние такие факторы, как количество доступных для адсорбции каталитических центров, а также их распределение по энергиям.

В области высоких температур все активные центры, принимающие участие в каталитических процессах, становятся приблизительно энергетически равноценными, поэтому ключевым фактором, определяющим полноту превращения бензола в конечный продукт CO_2 , является количество и доступность активных центров для адсорбирующихся молекул исходных веществ.

Температурные зависимости степени превращения бензола в конечный продукт карбон (IV) оксид имеют две области протекания гетерогенно-каталитического процесса. Разделение массива экспериментальных точек на группы, соответствующие областям протекания конверсии бензола, в соответствии с позволяет определять такие параметры, как наблюдаемое значение энергии активации и предэкспоненциального множителя, а также величину коэффициента массоотдачи согласно, методики определения которых учитывают два механизма окисления бензола: каталитический механизм на поверхности каталитического преобразователя и термический радикальный механизм в ядре газового потока.

Основные показатели эффективности протекания гетерогенно-каталитического процесса конверсии бензола на поверхности синтезированных катализаторов приведены в табл. 1.

Таблиця 1 – Показатели эффективности процесса гетерогенной каталитической конверсии бензола

Вторичный носитель	Наблюдаемое значение энергии активации, Дж/(моль × К)	Предэкспоненциальный множитель, м/с	Поверхностная константа скорости при 320 °С, м/с	Длина реактора на которой 95% конверсии достигается при 320 °С в условиях отсутствия диффузионного торможения, м	Коэффициент массоотдачи при 380 °С, м/с
NAS	177,000	4.1×10^{16}	10.3	0.83	0.0161
CAS	197,000	1.6×10^{19}	64.5	0.13	0.0156
MAS	206,000	1.6×10^{19}	10.3	0.83	0.0152

Анализ экспериментальных данных

Каталитические покрытия, синтезированные на поверхности вторичных Ni-содержащих, Mn-содержащих и Co-содержащих вторичных носителей, характеризуются близкими значениями степени конверсии бензола и соответственно близкими значениями коэффициентов массоотдачи в высокотемпературной области. Данный факт объясняется следующим образом. В высокотемпературной области, лимитируемой процессами массоотдачи, особенности химической кинетики на поверхности катализатора не влияют на массоперенос. Следовательно на значение коэффициента массоотдачи влияет только степень заполнения поверхности катализатора активными центрами. Действительно, полное отсутствие признаков плавления и стеклования слоя катализатора на поверхности покрытия NAS и наличие вкраплений кристаллической фазы в нем, а также незначительные признаки стеклования катализатора на поверхности покрытия CAS, способствует более полной локализации оксида палладия PdO именно на поверхности, а не в глубине слоя вторичного покрытия, где он будет значительно более труднодоступен для реагентов из газовой фазы. Таким образом, подобность структур поверхностей слоя катализатора на вторичных носителях свидетельствует о близких значениях поверхностных концентраций оксида палладия и, следовательно, коэффициентов массоотдачи и степени конверсии бензола в высокотемпературной области.

В случае использования Co-содержащего вторичного носителя наблюдаются самые высокие значения скорости конверсии газов в низкотемпературной области, соответствующей лимитированию процесса гетерогенно-каталитической конверсии стадией поверхностной химической кинетики. По условию экспериментального исследования содержание палладия на всех рассмотренных носителях является одинаковым. Также с помощью исследования морфологии поверхностей и кинетического анализа экспериментальных данных гетерогенно-каталитической конверсии в высокотемпературной области показано отсутствие миграции палладия в толщу вторичного носителя. Единственной отличительной характеристикой покрытия CAS является наличие в нем оксида кобальта. Это приводит к заключению, что наличие оксида кобальта во вторичном носителе оказывает существенное промотирующее влияние на каталитические свойства палладиевого катализатора. Кобальтовое промотирование настолько сильно, что оказывает заметное влияние на поверхностный слой катализатора даже в случае толщины покрытия оксида палладия достигающей 2 мм.

Выводы

Проведенное нами комплексное исследование морфологии поверхности катализаторов и их каталитической активности в процессах окисления бензола позволило выявить общие закономерности строения и физико-химических свойств поверхности вторичного носителя, обеспечивающих увеличение поверхностной константы скорости химической реакции и коэффициента массоотдачи от газового потока к поверхности катализатора.

Особенности температурной зависимости степени конверсии бензола для катализаторов на различных вторичных носителях объясняются различиями в особенностях взаимодействия оксида палладия с системами оксидов NAS, CAS и MAS на химическом уровне в момент формирования каталитического покрытия. Из экспериментальных данных следует, что значительное увеличение константы скорости при заданной температуре может быть достигнуто:

- выбором состава вторичного носителя, содержащего промотирующие компоненты;
- выбором состава вторичного носителя, при формировании которого будут выделяться кристаллические включения;
- выбором состава вторичного носителя с максимально возможной температурой стеклования во избежание растворения слоя катализатора в носителе.

Литература

1. Basf Catalysts Llc., 2009. Pt-Pd diesel oxidation catalyst with CO/HC light-off and HC storage function. US 7576031 B2 USA.
2. Ividen Co., Ltd., 2012, Honeycomb structure and exhaust gas conversion apparatus. EP2127725 B1 Japan.
3. Krasnokutskii E.V., Ved V.E., 2013a, Substantiating Reaction Mechanism of Thermocatalytic Benzene Conversion, Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 47, 1, 60-65, DOI: 10.1134/S004057951301003X.
4. Levenspiel, O., 1999, Chemical Reaction Engineering, New York: Wiley.
5. Makhanov B., Satayev M., Krasnokutsky Ye., Ved V., Saipov A., 2015, New Type of Harmful Gas Emissions Catalytic Converter, Industrial Technology and Engineering, 4, 5–18.
6. Ngk Insulators, Ltd., 2008, Use of a honeycomb structure in an exhaust gas converter system. EP1384507 B1 Japan.
7. Richards, R., 2006, Surface and nanomolecular catalysis. Boca Raton, FL, CRC/Taylor & Francis.
8. Tovazhnyanskii L.L., Ved' V.E., Koshchii V.A., Rovenskii A.I., Krasnokutskii E.V., 2013, Mobile Thermocatalytic Waste Processing Complex, Chemical Engineering Transactions, 35, 907-912, DOI: 10.3303/CET1335151.
9. Tovazhnyanskii L.L., Ved' V.E., Koshchii V.A., Rovenskii A.I., Meshalkin V.P., Krasnokutskii E.V., 2011, Effectiveness of Operation of Sewerage System of Mobile Complex of Thermocatalytic Waste Treatment, Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 45, 6, 838-841, DOI: 10.1134/S0040579511060169.
10. Ved' V., Tovazhnyanskiy L., Krasnokutskiy Ye., Koshchiy V., 2015, Modelling Of Hydrocarbons Catalytic Conversion Process, Chemistry & Chemical Technology, 9, 1, 101-106.

УДК 544.47

Краснокутський Є.В., Ведь В.Є., Кузнецова М.М.

**УНІВЕРСАЛЬНІ БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНІ ВТОРИННІ НОСІЇ
КАТАЛІЗАТОРІВ ОЧИЩЕННЯ ГАЗОВИХ ВИКИДІВ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ
УСТАНОВОК**

Спосіб формування на поверхні металів або кераміки каталітично активних компонентів шляхом приєднання їх до поверхні проміжного склокристалічного покриття. Вивчено вплив наявності 3d-перехідних елементів у складі проміжного покриття на зміну активності каталізатора, що містить паладій. Вивчені основні показники ефективності процесу неізотермічного гетерогенно-каталітичного перетворення бензену в залежності від типів перехідних металів, що входять до складу проміжного покриття. Проведено комплексний аналіз морфології вторинних носіїв, а також покриттів каталізатора, сформованих на їх поверхні, що дозволило оцінити вплив характерних особливостей структури поверхні на константу швидкості та коефіцієнт масовіддачі.

Krasnokutsky Ye.V., Ved V.E., Kuznetsova M.M.

**UNIVERSAL MULTI-FUNCTIONAL SECONDARY CATALYST CARRIERS FOR
PURIFICATION OF GAS EMISSION OF THERMAL POWER EQUIPMENTS**

A method of deposition on the surface of metals or ceramics catalytically active compounds by attaching them to the intermediate glass crystalline coatings. The effect of the presence of 3d-transition elements in the intermediate coating to modify the activity of a palladium containing catalyst was studied. The basic indicators of the efficiency of non-isothermal heterogeneous catalytic conversion process of benzene depending on the types of transition metals which are part of the intermediate coating were studied. Comprehensive analysis of the morphology of a glass-intermediate secondary catalyst carriers and surface coating them with layers of catalytically active compounds was carried out, which allowed to estimate the effect of the characteristic features of the structure of the coating surface on the rate constant of the process of conversion and mass transfer coefficient.

УДК 658.562

Тихомирова Т.С., Филенко О.Н., Горбунова О.В., Шестопапов А.В.

ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МЕТОДА МОЗГОВОГО ШТУРМА ПРИ ИЗУЧЕНИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ДИСЦИПЛИН

Метод мозгового штурма (brainstorming) или просто мозговой штурм (далее МШ) используется для поиска решений различных задач с 1941 года [1]. Данный метод позволяет быстро найти нестандартное решение различных задач с привлечением специалистов из разных областей. МШ широко используется при решении маркетинговых и рекламных задач, при поиске идеи для нового логотипа или названия продукта. Существуют классические примеры увеличений продаж, найденные при МШ – например зубной пасты, благодаря идеи увеличить диаметр выходного отверстия тюбика и т.д. В технических областях данный метод хоть и внедрялся, однако не получил широкого распространения. Для решения технических, иногда узкоспециальных задач, метод МШ считается «несерьезным».

Существуют определенные правила успешного проведения МШ, среди которых авторы отмечают желательное привлечение специалистов из разных областей или по крайней мере из разных отделов (цехов, подразделений), если речь идет о крупном предприятии (компании). Так называемый «свежий взгляд» на проблему позволяет порой найти реальные, но не стандартные решения.

Инженерная экология, в отличие от классической экологии, стоит на стыке гуманитарных и технических дисциплин. Инженерная экология одна из не многих на сегодняшний день в Украине так называемых «интегральных специальностей», где свой потенциал могут реализовать как люди с техническим, так и с гуманитарным складом ума. Соответственно, группы студентов-экологов в технических ВУЗах очень часто состоят из людей с отличающимися подходами к решению проблем и задач. И хотя собственные наблюдения авторов показали, что «чистых» гуманитариев или «чистых» технарей на инженерную экологию поступает не более 5 %, но среди оставшихся 95 % можно четко выделить людей с преобладающим «техническим» или «гуманитарным» складом ума.

Специальные экологические дисциплины для студентов, которые обучаются по программе «бакалавр» на специальности «инженерная экология» в технических ВУЗах Украины, охватывают широкий спектр экологических и смежных проблем. При этом большинство практических занятий могут и должны, по мнению авторов, быть направлены на решение конкретных задач.

Все вышеперечисленное натолкнуло авторов на идею провести экспериментальное внедрение МШ при решении конкретных проблемно-ориентированных заданий и задач экологического характера.

Многочисленные исследования психологических особенностей творчества позволили сделать вывод, что одним из основных препятствий для рождения новых идей является «боязнь оценки»: люди часто не высказывают вслух интересные неординарные идеи из-за опасения встретиться со скептическим либо даже враждебным к ним отношением со стороны руководителей и коллег [2]. Целью применения мозгового штурма является исключение оценочного компонента на начальных стадиях создания идей. Для полного психологического комфорта при проведении МШ в студенческой группе, преподаватель ни в коем случае не является ни ведущим, ни его помощником. Авторы после трех лет внедрения МШ пришли к выводу, что преподаватель должен выступать в роли некоего судьи – а именно пресекать не корректные, оскорбительные, унижающие

реплики или комментарии от студентов в адрес друг друга или касательно высказанных идей. В случае, если староста группы является авторитетом для своих одноклассников, его можно назначить на роль ведущего. Однако, если староста не является лидером, или не тактичен (не умеет сдерживать эмоции), лучше на роль ведущего выбрать другого студента. Опыт авторов показал, что с ролью ведущего хорошо справляются профессиональные спортсмены или студенты, имеющие опыт публичных выступлений (танцоры, певцы, артисты юмористических постановок и т.д.). Роль ведущего при проведении МШ одна из самых важных – он отвечает за рабочую, комфортную атмосферу, передает слово следующему участнику, пресекает проявления враждебности и т.д. Помощник ведущего, как правило, отвечает за фиксацию высказанных идей. На сегодняшний момент уже можно отказаться от записи идей на бумаге, наиболее оптимальным является аудиофиксация с помощью диктофонов, встроенных в смартфоны. Задача помощника подойти близко к каждому из участников для четкой фиксации речи.

Самым сложным при проведении МШ в группе студентов является исключение критики и раскрепощение всех участников. В классическом и идеальном варианте проведения МШ участники не должны быть близко знакомы друг с другом. Т.е. они являются сотрудниками одной компании, но, как минимум, работают в разных отделах или на разных этажах. На втором и третьем курсе роли в группе уже распределены. Есть «заучка», «умник», «клоун», «красавица», «красавчик» и т.д. Соответственно, очень важно донести до студентов, что они не имеют права уничтожительно высказываться в адрес участников и их идей. Одним из способов, опробованных авторами, является отказ от оценивания итога МШ. За данный вид практического задания оценка не выставляется ни кому из присутствующих, только отметка о присутствии или, как вариант, всем участникам по одинаковому фиксированному количеству баллов. И, конечно, в данном случае возрастает роль «преподавателя – судьи» и ведущего, которые должны дать возможность высказаться первыми тем участникам, авторитет которых в группе не высок.

Оптимальным построением практического занятия с использованием МШ является, по мнению авторов, следующая модель:

- первые 45 минут занятия преподаватель рассказывает студентам о самом методе МШ, его истоках, приводит наиболее яркие примеры использования МШ, рассказывает о правилах проведения и особенно акцентирует внимание студентов на том факте, что они могут высказывать самые фантастические идеи без боязни быть раскритикованными или получить низкую оценку, в конце 45 минут выбирается ведущий и его помощник;

- пятиминутный перерыв;

- постановка проблемы. Многие авторы считают, что участники должны быть ознакомлены с задачей МШ за 2–3 дня, чтобы подготовиться и вникнуть в проблему [3]. Однако в этом случае организаторы МШ исключают фактор «внезапного озарения», а также вводят самооценку для участников, ведь за 3 дня обдумывания проблемы человек сам дает оценку своим решениям, подсознательно отбрасывая новаторские, смелые, фантастические. Поэтому при изучении экологических проблем допустимым является озвучивание проблемы непосредственно перед началом МШ. На формулировку проблемы отводиться не более 3х минут.

- собственно МШ – не более 40 минут. Проведенные авторами данного исследования практические занятия с использованием МШ показали, что независимо от сложности проблемы, года обучения, количества студентов, средней успеваемости в группе, через 40 минут высказываемые идеи начинают повторяться по сути или вообще перестают высказываться. Скорей всего, это связано с особенностями человеческого мозга,

которые не способен интенсивно и качественно работать более 45 минут [4], а также падению интереса со стороны студентов к проблеме и самому занятию.

Предложенный формат проведения МШ укладывается в одно занятие (одну пару) и позволяет за одно практическое занятие и рассказать студентам о МШ, и опробовать его.

Таблица 1 – Результаты анонимного опроса студентов, принимавших участие в решении практической задачи с применением метода мозгового штурма, в % от участников

Вопрос	Учебный год		
	2014\2015	2015\2016	2016\2017
Вы ранее слышали о мозговом штурме?			
– да	10	15	17
– нет	90	85	83
Принимали ли вы участие в мозговом штурме?			
– да, в школе/техникуме	5	7	7
– нет	95	93	93
Интересно ли было решать практические задачи с применением метода мозгового штурма?			
– скорее да, чем нет	60	40	75
– скорее нет, чем да	30	10	15
– нет, пустая трата времени	10	50	10
Какой фактор мешал полноценному проведению мозгового штурма в вашей группе			
– отсутствие реальной анонимности	43	74	28
– плохой ведущий	27	12	32
– не корректная постановка задачи	20	9	13
– лимит времени	10	5	27
Вы готовы в будущем использовать мозговой штурм в своей профессиональной деятельности?			
– скорее да, чем нет	46	38	64
– скорее нет, чем да	54	62	36

За три учебных года большинство участвовавших студентов в МШ положительно отнеслись к его использованию (табл. 1). В 2015\2016 уч. году МШ был реализован в группе студентов, в которой нет единства и дружеской атмосферы, в группе с постоянными конфликтами между студентами. В этом случае решающим фактором, помешавшим провести МШ, стало отсутствие анонимности (74 % опрошенных студентов). Однако стоит отметить, что отсутствие реальной анонимности является, по мнению студентов и других групп, существенным недостатком (табл.1). Для полноценного МШ в студенческой группе авторы статьи проводили так называемый «электронный мозговой штурм» (online brainstorming). В последние годы с развитием интернет-технологий стало возможно не только участие специалистов или менеджеров в МШ с помощью видео связи, но и полностью анонимное решение задачи путем создания закрытого чата, где все участники находятся под псевдонимами (т.н. «никами»). Электронный МШ также ликвидирует «боязнь оценки», а также позволяет получать идеи одновременно от всех участников, тем самым нет очередности высказываний и соответственно человек не успевает передумать или посчитать свою идею слишком фантастической. В студенческой группе для полной невозможности идентификации участников для псевдонимов предлагалось выбирать названия деревьев или названия городов любой далекой страны, а не

использовать части фамилий, адресов электронных почт, имена любимых героев или героинь и т.д. После реализации «электронного МШ», в группе в 2015\2016 уч. году более 60 % студентов пришли к выводу о возможности использования МШ в своей профессиональной деятельности.

Таблица 2 – Примеры практических задач для реализации метода мозгового штурма при изучении специальных экологических дисциплин

Название дисциплины и номер учебного семестра для ее изучения	Формулировка задачи
Основы экологии и неэкология (3)	1. Как снизить потребление электроэнергии населением? 2. Как эффективно бороться с незаконной вырубкой сосен и елей перед новогодними праздниками?
Агроэкология (3)	1. Пути увеличения объемов продаж органической продукции в Украине 2. Способы изменения общественного мнения относительно ГМО и продукции, их содержащих, в позитивную сторону.
Гидрология (4)	1. Как решить проблему заболачивания местности из-за плотин, которые строят бобры, без истребления бобров?
Ландшафтная экология (5)	1. Способы уменьшения количества пожаров в лесах Харьковской области 2. Как уменьшить число заболеваний, вызванных не качественной питьевой водой в Харьковской области?

Далее приведены результаты МШ для решения предложенной проблемы «Как снизить потребление электроэнергии населением», высказанные студентами 2-го курса

1. Замена техники на более экономичную;
2. Ходить в гости для просмотра одних и тех же телепередач;
3. Ограничить потребление в ночное время;
4. Обеспечить каждую квартиру электробатареями;
5. Утеплять дома, чтоб в холодные периоды года не использовать обогреватели;
6. Запретить продажу неэлектроберегающих лампочек, заложить механизм компенсации для более бедных слоев населения;
7. Провести генную модификацию человека, чтоб он мог видеть в темноте и жить при температуре +10⁰С, или других качеств, позволяющих экономить или не использовать вообще электроэнергию;
8. Оснащение техники сенсорами присутствия людей;
9. Плановое выключение электричества;
10. Переход на свечи;
11. Проводить некие манипуляции на электросчетчики;
12. Запрет на продажу ненужной техники;
13. В темное время суток выходить на улицу, чтобы меньше тратить электроэнергию дома;
14. Информационная политика;
15. Штрафы за нерациональное использование;
16. Оснастить дома 2-х фазными электросчетчиками;
17. Придумать новую систему окон для поступления большего количества света;
18. Снизить стоимость на теплонасосы;
19. Заниматься спортом с целью согревания и производства электроэнергии в холодное время;

20. Сделать доступными портативные зарядные устройства.

Анализ показывает, что маловероятными являются способы решения задачи №7,10,13,19. Однако наука не стоит на месте, и в долгосрочной перспективе возможна реализация 7-го варианта. А заниматься спортом с целью выработки энергии и согревания тоже при всей кажущейся фантастичности является легко реализуемым способом, особенно в случае отсутствия других источников энергии. А вот пункт 6 получил в дальнейшем свое развитие. На основе высказанной идеи студентами проведена научная работа и разработан эффективный план внедрения энергосберегающих лампочек в том числе и среди бедных слоев населения.

Результаты МШ могут быть оценены в дальнейшем с использованием метода экспертных оценок, который позволяет выделить наиболее приемлемый (оптимальный) способ решения проблемы, а также отбросить наиболее не выгодные способы решения и выделить группу потенциально возможных способов решения проблемы, используя оценки, данные экспертами – людьми, являющимися признанными авторитетами в области решения конкретной проблемы [5]. Метод экспертных оценок позволяет перевести в область математического анализа полученные результаты МШ и также может быть рекомендован для изучения студентами-экологами как инструмент оценки всевозможных решений практических задач.

Литература

1. Аверченков В.И. Основы научного творчества : учебное пособие. – М.: Флинта, 2016. – 242 с. – ISBN 978-5-9765-1269-6.
2. Бешапошникова В.И. Методологические основы инноваций и научного творчества: учебное пособие. – М.: Инфра-М, 2017. – 189 с. – ISBN 978-5-16-012078-2.
3. П.В. Горев, В.К. Утёмов Научное творчество. Практическое руководство по развитию креативного мышления. Методы и приемы ТРИЗ.– М., 2014.– 112 с.
4. Дойдж Норманн. Пластичность мозга. – М.: Флинта, 2014. – 210 с.
5. А.И. Орлов Теория принятия решений Учебное пособие. – М.: Издательство "Март", 2004. – 656 с.

УДК 658.562

Тихомирова Т.С., Філенко О.М., Горбунова О.В., Шестопалов О.В.

ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ МОЗКОВОГО ШТУРМУ ПРИ ВИВЧЕННІ СПЕЦІАЛЬНИХ ЕКОЛОГІЧНИХ ДИСЦИПЛІН

У статті проаналізовано результати експериментального впровадження методу мозкового штурму для пошуку рішень певних задач при проведенні практичних занять з спеціальних екологічних дисциплін («Ландшафтна екологія», «Агроекологія», «Основи екології та неоекологія»).

Tykhomyrova T.S., Filenko O.N., Gorbunova O.V., Shestopalov A.V.

THE BRAINSTORM METHOD USING IN SPECIAL ENVIRONMENTAL DISCIPLINES STUDYING

The results of the experimental introduction of the brainstorming method for solving the set tasks in practical classes on special ecological disciplines ("Landscape Ecology", "Agroecology", "Fundamentals of Ecology and Neoeology") are analyzed.

Наукове видання

Щоквартальний науково-практичний журнал

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

3'2017

Технічний редактор *К. О. Горбунов*

Підп. до друку 19.09.2017 р. Формат 60 × 84 1/8. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 5,2. Наклад 300 пр. 1-й з-д 1–43.
Зам. № 151. Ціна договірна.

Видавець і виготовлювач
Видавничий центр НТУ «ХП»,
вул. Кирпичова, 2, м. Харків-2, 61002.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 5478 від 21.08.2017 р.