

ІТЕ ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Щоквартальний науково-практичний журнал

2'2017

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. Маляренко, д-р техн. наук, проф.
Д. Ф. Сімбірський, д-р техн. наук, проф.
В. П. Шапорев, 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.
Л. М. Ульянов, д-р техн. наук
П. О. Капустенко, акад. Академії будівництва України
О. П. Арсеньєва, д-р техн. наук, доц.

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:

61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21
Тел. 70-76-958

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Андреева О. Л., Костиков А. О., Ткаченко В. И.
Тепломассоперенос в подогреваемой снизу
цилиндрической конвективной ячейке
со свободной верхней границей при учете
поверхностного натяжения 3

Селихов Ю. А., Коцаренко В. А., Горбунов К. А.,
Давыдов В. А.
Возобновляемые источники энергии
для горячего водоснабжения и отопления
частного дома 15

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ

Бобух А. О., Дзевочко О. М., Подустов М. О.,
Переверзева А. М.
Синтез критеріїв оцінювання якості вибору
структури математичних моделей хімічних
технологій 21

Мацегора А. И.
Математическое моделирование
образования отложения на поверхности
теплопередачи пластинчатого
теплообменника 27

Подустов М. О., Дзевочко О. М.,
Дудка С. В.
Математичне моделювання процесу
одержання мінеральних добрив..... 38

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Бабіченко А. К., Подустов М. О.,
Кравченко Я. О., Лисаченко І. Г.,
Дзевочко О. М., Деменкова С. Д.
Автоматизована система ідентифікації
процесу теплообміну у випарниках блоку
вторинної конденсації виробництв аміаку....45

Ситнік Н. С., Демидов І. М.,
Мазаєва В. С., Голодняк В. О.
Дослідження впливу процесу переетери-
фікування на триацилгліцерольний
склад жирової сировини з різним
жирнокислотним складом54

Пугановський О. В., Подустов М. О.,
Дзевочко О. М., Шутинський О. Г.,
Печенко Т. І.
Визначення впливу окислювального
та абсорбційного об'ємів на процес
абсорбції NO_x в технології нітратної
кислоти..... 62

Гончаренко П. Д., Щепцов О. В.
Зміна якості вибухових речовин
при їх довготривалому зберіганні 70

СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ

Тихомирова Т. С., Быканов С. Н.,
Горбунова О. В.
Раздельный сбор твердых бытовых
отходов: опыт и перспективы в Украине..... 75

Сторінка редколегії..... 82

Затверджено Вченою радою НТУ «ХПІ» (протокол № 5 від 06.06.2017 р.)

Інтегровані технології та енергозбереження / Щоквартальний науково-практичний журнал. —
Харків : НТУ «ХПІ», 2017. — № 2. — 84 с.

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

УДК 621.384.6:620.198

Андреева О.Л., Костиков А.О., Ткаченко В.И.

ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС В ПОДОГРЕВАЕМОЙ СНИЗУ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ КОНВЕКТИВНОЙ ЯЧЕЙКЕ СО СВОБОДНОЙ ВЕРХНЕЙ ГРАНИЦЕЙ ПРИ УЧЕТЕ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ

Конвективные гексагональные ячейки возникают в горизонтальных слоях вязкой, несжимаемой, подогреваемой снизу жидкости. Это явление впервые экспериментально исследовано А. Бенаром в 1900 году [1]. А. Бенар рассматривал поверхность жидкости как плоскую и свободную, т.е. она не соприкасалась с твердой поверхностью, и, следовательно, не испытывала касательных напряжений. Однако уже в первых своих экспериментах он показал, что на верхней границе слоя не реализуются свободные граничные условия (равенство нулю второй производной от вертикальной скорости в ячейке), т.к. присутствует сила поверхностного натяжения, дающая отличные от нуля значения тангенциального тензора вязких напряжений. Косвенным подтверждением наличия силы поверхностного натяжения является обнаруженный им незначительный прогиб поверхности жидкости над центрами ячеек. Согласно измерениям, для сперматета при температуре 100 °С величина прогиба составлял около 0.75 мкм при толщине слоя порядка 0,93 мм [1].

Однако, А. Бенар указывал, что эффекты поверхностного натяжения, несомненно, присутствуют в большинстве экспериментов, но они не являются определяющими.

В более поздней работе [2] для тонких слоев силиконового масла (глубиной <2 мм) с использованием различных оптических методов подтвержден обнаруженный А. Бенаром малый прогиб поверхности над центрами ячеек. При глубине 1.75 мм прогиб составлял величину 0.46–0.69 мкм. При этом было показано, что эффект температурного градиента поверхностного натяжения проявляется в тонких слоях, а глубина прогиба нарастает с увеличением температурного градиента поверхностного натяжения.

Несмотря на отмеченное А. Бенаром слабое влияние поверхностного натяжения, феноменология (описывание и упорядочивание физических механизмов, с последующим более точным исследованием закономерностей их проявления в действительности) процесса формирования ячеек должна учитывать также влияние поверхностного натяжения жидкости.

Таким образом, классическое представление Рэлея о возникновении конвекции в слое вязкой, подогреваемой снизу жидкости с отличным от нуля коэффициентом температурного расширения (присутствует эффект плавучести) [3] должно быть дополнено учетом поверхностного натяжения (термокапиллярного эффекта).

1. Уравнения массопереноса и граничные условия

Какие же граничные условия на свободной границе жидкости необходимо задавать при наличии поверхностного натяжения?

Один из возможных ответов на этот вопрос дан в работе [4], где продемонстрирован обобщенный подход в понимании фундаментального механизма поверхностного натяжения. В этой работе, в отсутствие эффекта плавучести (коэффициент температурного расширения равен нулю), стационарные уравнения для амплитуд возмущенной вертикальной скорости и температуры имеют вид:

$$\Delta \Delta v_z = 0; \quad (1)$$

$$\Delta T + v_z = 0, \quad (2)$$

где $\Delta \dots = \Delta_{\perp} \dots + \partial^2 \dots / \partial z^2$, $\Delta_{\perp} \dots = \partial^2 \dots / \partial x^2 + \partial^2 \dots / \partial y^2$, z и v_z – вертикальная координата, и возмущенная скорость, T – возмущенная температура, x, y – поперечные координаты.

Система уравнений (1), (2) должна быть дополнена граничными условиями жесткой нижней границе ($z = 0$), и на свободной поверхности ячейки ($z = 1$):

на границе $z = 0$;

$$v_z = 0; \frac{dv_z}{dz} = 0; T = 0; \quad (3)$$

на границе $z = 1$;

$$v_z = 0; \quad (4)$$

$$\frac{d^2 v_z}{dz^2} = M \cdot \Delta_{\perp} T; \quad (5)$$

$$\frac{dT}{dz} = -Bi \cdot T, \quad (6)$$

где $M = \gamma \theta h / \rho \nu \chi$ – число Марангони, $\gamma = -d\sigma/dT$ – температурный коэффициент поверхностного натяжения, h – толщина слоя, ρ, ν, χ – плотность, коэффициент кинематической вязкости и коэффициент температуропроводности жидкости соответственно, $\theta = T_2 - T_1$ ($T_2 > T_1$), T_2 и T_1 – температура нижней и верхней границ соответственно, $Bi = \kappa h / \chi_m$, $0 \leq Bi < \infty$ – безразмерный коэффициент теплоотдачи (число Био) [5], κ – коэффициент теплопередачи, определяющий скорость изменения с температурой скорости передачи тепла на единицу площади верхней поверхности жидкости к верхней среде, χ_m – коэффициент температуропроводности верхней среды.

В уравнениях (1), (2) и граничных условиях (3)–(6) все величины безразмерные. Координаты заданы в единицах глубины слоя h , возмущенная скорость – в единицах ν^2/h , возмущенная температура – в единицах $\theta = T_2 - T_1$, где T_2 и T_1 – температура нижней и верхней границ соответственно. При $\theta > 0$ – слой подогревается снизу, в противном случае – сверху. Значения $Bi^{-1} = 0$ и $Bi = 0$ являются предельными приближениями, соответствующими очень хорошему и очень плохому проводнику температурных возмущений соответственно [5].

Граничное условие (5) получено из требования равенства силы, возникающей из-за зависимости тангенциального поверхностного натяжения от температуры, напряжению сдвига, действующего на поверхность жидкости, с учетом условия неразрывности среды [4]. При этом влияние поверхностного натяжения на нормальное напряжение поверхности игнорируется, поскольку оно мало.

При отсутствии поверхностного натяжения граничное условие (5) переходит в граничное условие для свободной поверхности.

Обычно, на практике при не очень тонких слоях подогреваемой снизу жидкости присутствуют как поверхностное натяжение, так и плавучесть.

Учет плавучести в системе уравнений (1)–(6) осуществляется введением в левую часть уравнения (1) дополнительного слагаемого, ответственного за этот эффект. В этом случае в системе уравнений (1)–(6) следует уравнение (1) заменить на $\Delta \Delta v_z + R \Delta_\perp T = 0$, где $R = g \alpha \theta h^3 / \nu \chi$ – число Рэлея, $\alpha = \rho^{-1} \partial \rho / \partial T$ – коэффициент температурного расширения жидкости, g – ускорение свободного падения [6].

В работе [6] система уравнений (1)–(2) при наличии эффекта плавучести ($R \neq 0$) исследована численными методами. В результате исследования было установлено, что приводящие к неустойчивости плавучесть и поверхностное натяжение усиливают друг друга, и тесно связаны. Показано, что ячейки, образованные поверхностным натяжением, примерно того же размера, что и те, что образованы только плавучестью.

Однако полученные численные результаты не позволяют описать физику взаимного влияния плавучести и поверхностного натяжения в условиях различного режима теплообмена между жидкостью и примыкающей к ее верхней границе теплопоглощающей средой.

Вид граничных условий существенно сказывается на критерии устойчивости конвективного массопереноса в слое вязкой несжимаемой жидкости. Отсутствие на границах жидкости касательных напряжений приводит к стационарной задаче Рэлея, которая имеет аналитические решения для возмущенной скорости и температуры в слое [3].

Учет касательных напряжений на границах жидкости (не важно, какой природы) приводит к задаче с твердыми граничными условиями (на верхней и нижней границах существуют касательные напряжения). До настоящего времени такие краевые задачи не имели аналитических решений, и решались только численными методами.

Впервые аналитические решения стационарной, линейной задачи Рэлея [3] в цилиндрической геометрии с твердыми, а также смешанными граничными условиями получены в [7]. На основе этих решений найдены аналитические выражения нейтральных кривых для перечисленных выше (твердые и смешанные) типов граничных условий [8]. Показано, что эти кривые с достаточной степенью точности соответствуют численным расчетам других авторов.

Полученные в [7] аналитические решения использованы в [8] для описания физической модели зависимости числа Нуссельта от числа Рэлея. Эта модель оказалась достаточно реалистичной, т.к. с хорошей точностью описывает экспериментально полученные данные зависимости числа Нуссельта от числа Рэлея для ряда вязких, несжимаемых жидкостей.

Аналитические решения, полученные в [7], могут стать основой для описания процессов тепломассопереноса в конвективных ячейках со свободной верхней границей при учете ее поверхностного натяжения. Исследование такого круга задач представляет значительный интерес как для построения теории конвективных процессов в слоях вязких несжимаемых жидкостей с учетом поверхностного натяжения, так и для применения выводов теории в различных практических приложениях.

Поэтому в настоящей работе приведены результаты исследования процессов тепломассопереноса в цилиндрической конвективной ячейке со свободной верхней границей при учете ее поверхностного натяжения.

2. Уравнения для возмущенных вертикальной скорости и температуры в цилиндрической ячейке и граничные условия

При учете плавучести стационарные уравнения для амплитуд возмущенной вертикальной скорости и температуры в цилиндрической геометрии имеют вид:

$$\Delta \Delta v_z = -R \Delta_{\perp} T; \quad (7)$$

$$\Delta T + v_z = 0, \quad (8)$$

где $\Delta \dots = \Delta_{\perp} \dots + \partial^2 \dots / \partial z^2$, $\Delta_{\perp} \dots = \partial^2 \dots / \partial r^2 + r^{-1} \partial \dots / \partial r$.

При этом граничные условия задаются выражениями (3)–(6).

Выбираем зависимость возмущенных величин в виде:

$$v_z(r, z, t) = v(z) J_0(k_r r); \quad (9)$$

$$T(r, z, t) = \vartheta(z) J_0(k_r r), \quad (10)$$

где $v(z)$ и $\vartheta(z)$ – амплитуды возмущений вертикальной скорости и температуры соответственно; $J_0(x)$ – функции Бесселя первого рода нулевого порядка от аргумента x ; $k_r = \sigma_{1,1}/R$ – радиальное волновое число, характеризующее зависимость возмущений от поперечной координаты r ; $\sigma_{1,1}$ – первый ноль функции Бесселя первого рода первого порядка $J_1(\sigma_{1,1}) = 0$; R – радиус ячейки.

Подстановка (9), (10) в уравнения (7), (8) дает систему обыкновенных дифференциальных уравнений для амплитуд возмущений:

$$\frac{d^4 v}{dz^4} - 2k_r^2 \frac{d^2 v}{dz^2} + k_r^4 v = R k_r^2 \vartheta; \quad (11)$$

$$\frac{d^2 \vartheta}{dz^2} - k_r^2 \vartheta = -v. \quad (12)$$

Граничные условия (3)–(6) после подстановки (9), (10) преобразуются к виду:

на границе $z = 0$;

$$v = 0; \frac{dv}{dz} = 0; \vartheta = 0; \quad (13)$$

на границе $z = 1$;

$$v = 0; \quad (14)$$

$$\frac{d^2 v}{dz^2} = -k_r^2 \cdot M \cdot \vartheta; \quad (15)$$

$$\frac{d\vartheta}{dz} = -Bi \cdot \vartheta. \quad (16)$$

Таким образом, краевая задача (11)–(16) определяет спектр характеристических возмущений равновесного конвективного процесса в цилиндрической конвективной ячейке.

3. Решение уравнений для возмущенных вертикальной скорости и температуры в цилиндрической ячейке с учетом граничных условий

Уравнения (11), (12) с граничными условиями (13)–(16) в частном случае могут быть решены в аналитическом виде. Для этого подставим уравнение (12) в уравнение (11). Такая подстановка дает характеристическое уравнение:

$$(q^2 - b)^3 = -a^3, \quad (17)$$

где $a = (k_r^2 R)^{\frac{1}{3}}$, $b = k_r^2$, параметр q определяет зависимость амплитуды вертикальной скорости $v(z)$ от координаты z в виде $v(z) = A \cdot e^{qz}$, где A – произвольная постоянная величина.

В частном случае, при $a = 8(n\pi)^2$ и $b = 7(n\pi)^2$ зависимость числа Рэлея от волнового числа определяется выражением:

$$R(k_r) = \frac{(n^2 \pi^2 + k_r^2)^3}{k_r^2}. \quad (18)$$

Выражение (18) масштабными преобразованиями может быть приведено к выражению для нейтральной кривой краевой задачи с твердыми граничными условиями [7].

Следует отметить, что выражение (18) может быть получено из [5], если полученные в этой работе ряды Фурье рассматривать как асимптотические.

Амплитуда решения (9) может быть представлена в виде симметричной (относительно $z = 0.5$) функции $v(z)$:

$$v(z) = A \left[1 - ch \left(\left(z - \frac{1}{2} \right) X_+(k_r) \right) ch^{-1} \left(\frac{X_+(k_r)}{2} \right) \right] \sin(n\pi z), \quad (19)$$

где $X_+(k_r) = 0.5 \left[2\sqrt{(a^2 + ak_r + k_r^2)^2} + a + 2k_r^2 \right]^{\frac{1}{2}}$, $a = (n\pi)^2 + k_r^2$.

Амплитуда возмущенной температуры определяется из уравнения (12) методом вариации произвольных постоянных, и с учетом требования $\vartheta = 0$ при $z = 0$, может быть представлена в виде:

$$\vartheta(z) = Bsh(k_r z) + \frac{1}{k_r} \int_0^z v_k(\xi) sh(k_r(\xi - z)) d\xi - \frac{1}{k_r} \frac{sh(zk_r)}{sh(k_r)} \int_0^1 v_k(\xi) sh(k_r(\xi - 1)) d\xi. \quad (20)$$

Следует отметить, что симметричное решение (19) автоматически добавляет к граничному условию на верхней границе (14) еще одно условие: $dv/dz = 0$.

Таким образом, симметричное решение (19) описывает конвекцию в подогреваемом снизу слое вязкой несжимаемой жидкости с жесткими границами, т.к. возмущения вертикальной скорости и ее первые производные на обеих границах равны нулю. Однако, основные граничные условия, принятые в [5], не изменяются.

Подставляя значения $\vartheta(z)|_{z=1}$ из (15) в правую часть уравнения (11), а затем, используя выражение $v(z)$, и вычисляя вторую и четвертую производные $v(z)$ на верхней границе, получим следующее соотношение между числами Рэлея и Марангони:

$$R(k_r) = (2k_r^2 - 2X_+^2 + 2\pi^2) M(k_r). \quad (21)$$

С другой стороны, подстановка $v(z)$ в граничные условия (15), (16) приводит к системе уравнений, относительно двух коэффициентов A и B :

$$\begin{aligned} 2A\pi X_+ th\left(\frac{X_+}{2}\right) &= -BMk_r^2 sh(k_r), \\ A \frac{I_1(X_+, k_r)}{sh(k_r)} &= B(Bi \cdot sh(k_r) + k_r ch(k_r)), \end{aligned} \quad (22)$$

где $I(X_+, k_r) = \int_0^1 \sin(\pi\xi) sh(k_r\xi) \left(1 - ch\left(X_+ \left(\xi - \frac{1}{2}\right)\right) ch^{-1}\left(\frac{X_+}{2}\right) \right) d\xi$.

Из (22), исключая коэффициенты A и B , определим зависимость числа Марангони от волнового числа:

$$M(k_r) = - \frac{2\pi X_+ th(X_+/2) (Bi \cdot sh(k_r) + k_r ch(k_r))}{k_r^2 I(X_+, k_r)}. \quad (23)$$

Из (23) следует, что для задачи с твердыми граничными условиями числа Марангони отрицательные во всем диапазоне изменения радиального волнового числа и

числа Био. Этот факт означает, что жидкость характеризуется отрицательным значением температурного коэффициента поверхностного натяжения ($\gamma < 0$).

Соотношения (18), (21), (23) получены исходя из значения параметров $a = \left(k_r^2 R(k_r)\right)^{\frac{1}{3}} = 8(n\pi)^2$ и $b = k_r^2 = 7(n\pi)^2$. Эти значения параметров определяют точку на плоскости (R, k_r) , которая не находится на нейтральной кривой задачи твердыми граничными условиями. Для перехода на нейтральную кривую необходимо использовать описанную в [7] масштабную инвариантность решения (19): умножение a и b на постоянную величину λ^2 не изменяет вида решения, а только приводит к замене толщины слоя h на h/λ . При этом, под знаком тригонометрической функции в (19) величину $n\pi$ следует заменить на $\lambda n\pi$, т.к. при получении выражения (19) была использована сдвиговая инвариантность: $\sqrt{a-b} = n\pi$.

Нейтральная кривая задачи с твердыми граничными условиями для $n = 1$ описывается выражением [7]:

$$R^{rigid}(k_r) = \frac{2.597 \left(\pi^2 + (0.7 \cdot k_r)^{2.085} \right)^3}{(0.7 \cdot k_r)^{2.085}}. \quad (24)$$

Число Марангони при выполнении масштабных преобразований для перехода к нейтральной кривой задачи с твердыми граничными условиями преобразуется к виду:

$$M^{rigid}(k_r) = C \cdot M(0.7 \cdot k_r), \quad (25)$$

где $C = 4.836$ – масштабный численный коэффициент, выбор величины которого будет обоснован ниже.

Таким образом, соотношение между числами Рэлея и Марангони для краевой задачи с твердыми граничными условиями имеет вид:

$$R^{rigid}(k_r) = 2 \left((0.7 \cdot k_r)^2 - X_+^2 \left((0.7 \cdot k_r)^2 \right) + \pi^2 \right) M^{rigid}(k_r). \quad (26)$$

Уравнение (26) устанавливает связь между числами Рэлея и Марангони, но никак не изменяет их значений.

Решение (26) относительно k_r определяет поперечное волновое число, что в свою очередь задает локальное аспектное число A_l (отношение диаметра ячейки к толщине слоя) соотношением: $A_l = 2R/h = 2\sigma_{l,1}/k_r$. Согласно (26), величина поперечного волнового числа зависит от числа Био. Поэтому при неизменной толщине слоя h и для заданного режима теплопередачи с верхней границы слоя (разные числа Био) будут формироваться две ячейки разного диаметра, каждая из которых отличается знаком числа Рэлея.

Константа C в (25) зададим, исходя из следующих соображений.

Из (26) образуем функцию, связывающую числами Рэлея и Марангони $F(k_r) = 2 \left((0.7 \cdot k_r)^2 - X_+^2 \left((0.7 \cdot k_r)^2 \right) + \pi^2 \right) M^{rigid}(k_r) / R^{rigid}(k_r)$. В (25) выберем такое минимальное C , чтобы в предельном случае $Bi = 0$ существовала точка касания $F(k_r)$ с прямой $U(k_r) = -1$ (согласно (24), конвективные ячейки существуют и устойчивы). Поступая таким образом, численными расчетами можно установить, что $C = 4.836$.

На рис. 1 приведен график, показывающий функцию $F(k_r)$ и прямые $U(k_r) = \pm 1$. Точки касания и пересечения определяют зависимость поперечного волнового числа k_r от числа Био.

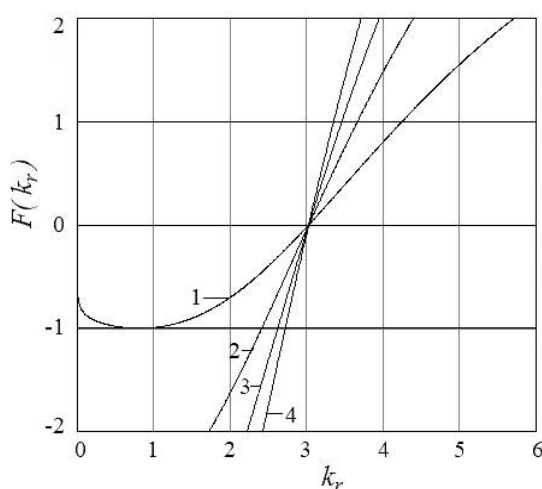


Рисунок 1 – Зависимость поперечного волнового числа k_r от числа Био: 1 – $Bi = 0$; 2 – $Bi = 2$; 3 – $Bi = 4$; 4 – $Bi = 6$

Из рис. 1 следует, что для положительных чисел Рэлея ($R^{rigid}(k_r) > 0$) волновое число (точки пересечения $F(k_r)$ с прямой $U(k_r) = -1$) с увеличением числа Bi от нуля до бесконечности увеличивается от $k_r = 0.89$ до $k_r = 3.03$. Локальное аспектное число при этом уменьшается от $A_l = 8.6$ (теплоизолированная верхняя граница) до $A_l = 2.53$ (идеально теплопроводящая граница).

Следует отметить, что полученное выше значение локального аспектного числа для идеально теплопроводящей границы $A_l = 2.53$ количественно близко к экспериментально измеренному, и теоретически обоснованному значению $A_l = 2.46$ [9].

В экспериментах по измерению конвективной скорости массопереноса в ячейках [10] наблюдались ячейки с достаточно большим диаметром. Это, по-видимому, связано с добавлением достаточно большого количества алюминиевой пудры в масло. При этом, алюминий, обладая высокой теплоемкостью, не успевал передать тепло воздуху на верхней границе слоя. Поэтому верхнюю границу можно рассматривать как не идеально проводящую. Экспериментально определено, что при глубине слоя масла 2 мм в

диаметр сосуда $D_V = 52$ мм укладывалось около 3 цилиндрических ячеек, т.е. локальное аспектное число равнялось $(A_l)_{exp} = \frac{52}{3} \frac{1}{2} = 8.66$. Полученное экспериментально локальное аспектное число 8.66 достаточно хорошо соответствует локальному аспектному числу слоя жидкости с теплоизолированной верхней границей $A_l = 8.6$.

Из анализа выражений (24), (25) следует, что числа Рэлея, находящиеся на нейтральной кривой, не зависят от чисел Марангони, т.е. эффекты плавучести и поверхностного натяжения не влияют друг на друга, а связаны соотношением (26).

На рис. 2 показана зависимость числа Марангони от волнового числа для различных значений числа Био.

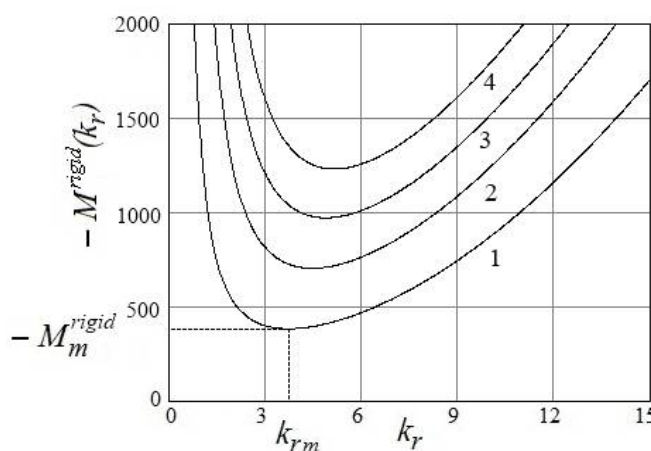


Рисунок 2 – Зависимость числа Марангони $-M^{rigid}(k_r)$

от волнового числа k_r для различных значений числа Био:

$$1 - Bi = 0; 2 - Bi = 2; 3 - Bi = 4; 4 - Bi = 6$$

Кривые $M^{rigid}(k_r)$ определяют критические значения числа Марангони, и их зависимость от коэффициента теплоотдачи Bi .

Для числа $Bi = 0$ критическое число Марангони равно $M_m^{rigid} = -384.97$ при значении волнового числа $k_{rm} = 2.61$. С увеличением числа Био до бесконечности верхняя граница слоя жидкости становится идеально теплопроводящей, и критическое число Марангони стремится также к бесконечности.

Таким образом, при больших числах Био рассматриваемая краевая задача является краевой задачей с твердыми граничными условиями и с идеально теплопроводящей верхней границей.

4. Выводы

В работе приведены результаты теоретического исследования процесса тепло-массопереноса в цилиндрической конвективной ячейке со свободной верхней границей при учете поверхностного натяжения

Сделан вывод о том, что при твердых граничных условиях на нижней границе слоя жидкости наличие поверхностного натяжения на верхней границе приводит к задаче с твердыми граничными условиями, т.к. на верхней и нижней границах слоя существуют касательные напряжения.

Предложено аналитическое выражение для возмущенной вертикальной скорости, которые удовлетворяют условию равенства скорости и ее первой производной нулю на верхней и нижней границе слоя (твердые граничные условия).

Полученное аналитическое выражение для возмущенной температуры удовлетворяет условию идеальной теплопроводности на нижней границе, и условию задаваемой числом Био теплопроводности на верхней границе.

Из граничного условия, обусловленного поверхностным натяжением, и условия температуропроводности на верхней границе получено уравнение, связывающее числа Рэлея с числами Марангони, т.е. определена взаимосвязь сил плавучести и поверхностного натяжения.

Из численного решения этого уравнения получены характерные волновые числа цилиндрической конвективной ячейки, и определена их зависимость от числа Био. Показано, что с увеличением числа Био от нуля до бесконечности характерное волновое число увеличивается от $k_r = 0.89$ до $k_r = 3.03$. Локальное аспектное число при этом уменьшается от $A_l = 8.6$ (теплоизолированная верхняя граница) до $A_l = 2.53$ (идеально теплопроводящая граница). Показано, что для идеально теплопроводящей границы $A_l = 2.53$ количественно близко к экспериментально измеренному, и теоретически обоснованному значению $A_l = 2.46$.

Описана в аналитическом виде зависимость чисел Марангони, от волнового числа и числа Био. Показано, что во всем диапазоне изменения волновых чисел числа Марангони принимают отрицательные значения.

Показано, что для равного нулю числа Био критическое число Марангони равно $M_m^{rigid} = -384.97$ при значении критического волнового числа $k_{rm} = 2.61$. С увеличением числа Био до бесконечности верхняя граница слоя жидкости становится идеально теплопроводящей, и критическое число Марангони стремится также к бесконечности.

Работа выполнена в рамках совместных научных исследований, проводимых в Национальном научном центре «Харьковский физико-технический институт», Харьковском национальном университете имени В.Н. Каразина и Институте проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины.

Литература

1. Bernard H. Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide // *Revue generale des Sciences, pures et appliques.* – 1900. – V. 11. – P. 1309–1328.
2. Cerisier P., Jamond C., Pantaloni J., Charmet J.C. // *Deformation de la surface libre en convection de Benard-Marangoni.* J. Physique, 1984, V. 45, P. 405–411.
3. Strutt J. W. (Lord Rayleigh) // *On convection currents in a horizontal layer of fluid, when the higher temperature is on the underside.* Phil. Mag., 1916, V. 32, P. 529–546.

4. Pearson J.R.A. On convection cells induced by surface tension. *J. Fluid Mech.*, 1958, V. 4, P. 489–500.
5. Nield D.A. Surface tension and buoyancy effects in cellular convection, *J. Fluid Mech.*, 1964. V. 19, P. 341–352.
6. Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. – М: Наука, 1972. – с. 393.
7. Andreeva O.L., Tkachenko V.I. Analytical Solution And Neutral Curves Of The Stationary Linear Rayleigh Problem With Rigid Or Mixed Boundary Conditions In Cylindrical Geometry. *East-European J. of Phys.*, 2015, Vol. 2, № 4, P. 52–57.
8. Паточкина О.Л., Казаринов Ю.Г., Ткаченко В.И. Физическая модель зависимости числа Нуссельта от числа Рэлея. *ЖТФ*, 2016, Т. 66, № 11, с. 23–29.
9. Patochkina O.L., Borts B.V., Tkachenko V.I. Elementary Convection Cell in the Horizontal Layer of Viscous Incompressible Liquid with Rigid and Mixed Boundary Conditions. *East-European J. of Phys.*, 2015, Vol. 2, № 1, P. 23–31.
10. Bozbiei L., Borts B., Kazarinov Y., Kostikov A., Tkachenko V. Experimental Study of Liquid Movement in Free Elementary Convective Sells. *Energetika*, 2015, T 61, No 2, P. 45–56.

Bibliography (transliterated)

1. Bernard H. Les tourbillons cellulaires dans une nappe liquide // *Revue generale des Sciences, pures et appliques.* – 1900. – V. 11. – P. 1309–1328.
2. Cerisier P., Jamond C., Pantaloni J., Charmet J.C. // Deformation de la surface libre en convection de Benard-Marangoni. *J. Physique*, 1984, V. 45, P. 405–411.
3. Strutt J. W. (Lord Rayleigh) // On convection currents in a horizontal layer of fluid, when the higher temperature is on the underside. *Phil. Mag.*, 1916, V. 32, P. 529–546.
4. Pearson J.R.A. On convection cells induced by surface tension. *J. Fluid Mech.*, 1958, V. 4, P. 489–500.
5. Nield D.A. Surface tension and buoyancy effects in cellular convection, *J. Fluid Mech.*, 1964. V. 19, P. 341–352.
6. Gershuni G.Z., Zhukhovitskii E.M. Convective stability of an incompressible fluid. - M: Science, 1972. – p. 393. (in Russian).
7. Andreeva O.L., Tkachenko V.I. Analytical Solution And Neutral Curves Of The Stationary Linear Rayleigh Problem With Rigid Or Mixed Boundary Conditions In Cylindrical Geometry. *East-European J. of Phys.*, 2015, Vol. 2, № 4, P. 52–57.
8. Patochkina O.L., Kazarinov Yu.G., Tkachenko V.I. Physical model of the dependence of the Nusselt number on the Rayleigh number. *ZhTF*, 2016, Vol. 66, No. 11, p. 23–29. (in Russian).
9. Patochkina O.L., Borts B.V., Tkachenko V.I. Elementary Convection Cell in the Horizontal Layer of Viscous Incompressible Liquid with Rigid and Mixed Boundary Conditions. *East-European J. of Phys.*, 2015, Vol. 2, № 1, P. 23–31.
10. Bozbiei L., Borts B., Kazarinov Y., Kostikov A., Tkachenko V. Experimental Study of Liquid Movement in Free Elementary Convective Sells. *Energetika*, 2015, T 61, No 2, P. 45–56.

УДК 621.384.6:620.198

Андрєєва О.Л., Костіков А.О., Ткаченко В.І.

ТЕПЛОМАСОПЕРЕНОС В ЦИЛІНДРИЧНІЙ КОНВЕКТИВНІЙ КОМІРЦІ, ЩО ПІДГРІВАЄТЬСЯ ЗНИЗУ, З ВІЛЬНОЮ ВЕРХНЬОЮ ГРАНИЦЕЮ ТА ПРИ ВРАХУВАННІ ПОВЕРХНЕВОГО НАТЯГУ

У роботі наведені результати теоретичного дослідження процесу тепломасопереносу в циліндричній конвективній комірниці з вільною верхньою границею при урахуванні поверхневого натягу.

Запропоновано аналітичний вираз для обуреної вертикальної швидкості, який задовольняє умові рівності швидкості і її першої похідної, які дорівнюють нулю на верхній і нижній межі шару (тверді граничні умови).

Отриманий аналітичний вираз для обуреної температури задовольняє умові ідеальної теплопровідності на нижній границі, і умові теплопровідності на верхній границі, яка задається числом Біо.

З граничної умови, обумовленої поверхневим натягом і умовами температуропровідності на верхній границі отриманого рівняння, що визначає взаємозв'язок сил плавучості і поверхневого натягу.

З чисельного рішення цього рівняння отримані характерні хвильові числа циліндричної конвективної комірниці, і визначена їх залежність від числа Біо.

Andreeva O.L., Kostikov A.O., Tkachenko V.I.

HEAT AND MASS TRANSFER IN HEATED FROM BELOW CYLINDRICAL CONVECTIVE CELL WITH FREE UPPER BOUNDARY AND TAKING IN ACCOUNT OF THE SURFACE TENSION

The paper presents the results of a theoretical study of the process of heat and mass transfer in a cylindrical convective cell with a free upper boundary, taking into account the surface tension.

An analytical expression is proposed for the perturbed vertical velocity, which satisfy the condition of equality of the velocity and its first derivative to zero at the upper and lower boundary of the layer (rigid boundary conditions).

The obtained analytical expression for the perturbed temperature satisfies the condition of ideal thermal conductivity at the lower boundary, and the condition given by the Bio number of thermal conductivity at the upper boundary.

From the boundary condition due to the surface tension, and the thermal diffusivity condition at the upper boundary, the equation is obtained. Determines the relationship between the forces of buoyancy and surface tension.

From the numerical solution of this equation, the characteristic wave numbers of a cylindrical convective cell are obtained, and their dependence on the number of Bio is determined.

The dependence of the Marngoni numbers on the wave number and the number of Bio is described analytically.

УДК 662.997

Селихов Ю.А., Коцаренко В.А., Горбунов К.А., Давыдов В.А.

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ОТОПЛЕНИЯ ЧАСТНОГО ДОМА

Постановка проблемы. По прогнозам специалистов, до 2020 года мировая потребность в электроэнергии вырастет в несколько раз и достигнет 34 млрд. т. условного топлива на год. Такое развитие энергетики будет пагубно влиять на окружающую среду и может стать одной из причин необратимого изменения климата. Это уже сейчас приводит к необходимости изыскивать новые, и предпочтительно нетрадиционные и возобновляемые источники энергии. По всей вероятности, наиболее полезным окажется сочетание нескольких источников энергии – солнечной, энергии ветра и геотермального теплового насоса как наиболее «чистых» с экологической точки зрения, чем источники энергии традиционной энергетики [1].

Опыт, накопленный разными странами в использовании солнечных коллекторов, тепловых насосов и ветроэлектродгенераторов, демонстрирует высокие возможности простого превращения этих видов энергии в тепловую энергию и электроэнергию, которые могут успешно использоваться для снабжения: электроэнергией, горячей водой, горячим воздухом, отоплением в помещениях государственных и частных домовладений, а также обеспечению разного рода технологических и бытовых потребностей не только в разных отраслях промышленности, но и в том числе на предприятиях агропромышленного комплекса Украины [2, 3].

Анализ последних исследований и публикаций. В Украине установки солнечного тепло- и холодоснабжения, тепловые насосы и ветроэлектродгенераторы на объектах гражданского и промышленного строительства пока не получили широкого внедрения, что связано с относительно низкими по сравнению с другими странами ценами на традиционные энергоносители и недостаточной подготовленностью рынка, а также оно сдерживается высокой металлоемкостью и себестоимостью солнечных коллекторов и тепловых насосов, и не подготовленностью нашего рынка к выпуску ветроэлектродгенераторов.

Поэтому, на наш взгляд, актуальной является концепция создания новых тепло-энергетических систем, в которых в качестве источников энергии будут использованы возобновляемые источники энергии. Для таких систем будут сконструированы новые конструкции солнечных установок, тепловых насосов и ветроэлектродгенераторов, когда расходы на выработку тепловой энергии и электроэнергии с помощью этих установок будут ниже уровня суммарных расходов на получение тепловой энергии и электроэнергии традиционными способами (в частности, в котельных установках). Это может достигаться за счет использования относительно дешевых отечественных материалов, выпуск которых гарантирован в достаточных объемах в течение длительного срока. Поэтому применение нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, экономия органического топлива, которое нужно для нагревания теплоносителя с 8 до 95 °С, улучшение экологической ситуации района потребления тепловой энергии за счет снижения объемов выбросов загрязняющих веществ, к которым относятся продукты сго-

рання традиционных видов энергии, – органического топлива, которое используется для производства тепловой энергии в котельном оборудовании, производство электроэнергии с помощью ветроэлектрогенераторов 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. 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, было принято решение о замене котла с мазутной горелкой на теплоэнергетическую систему: обеспечивающую частное домовладение горячей водой с помощью двухконтурной солнечной водонагревательной установки [4], отопление с помощью геотермального грунтового теплового насоса «грунт–вода» [5].

Также была разработана новая технологическая схема теплоэнергетической системы горячего водоснабжения и отопления коттеджа, представленная на рисунке 1.

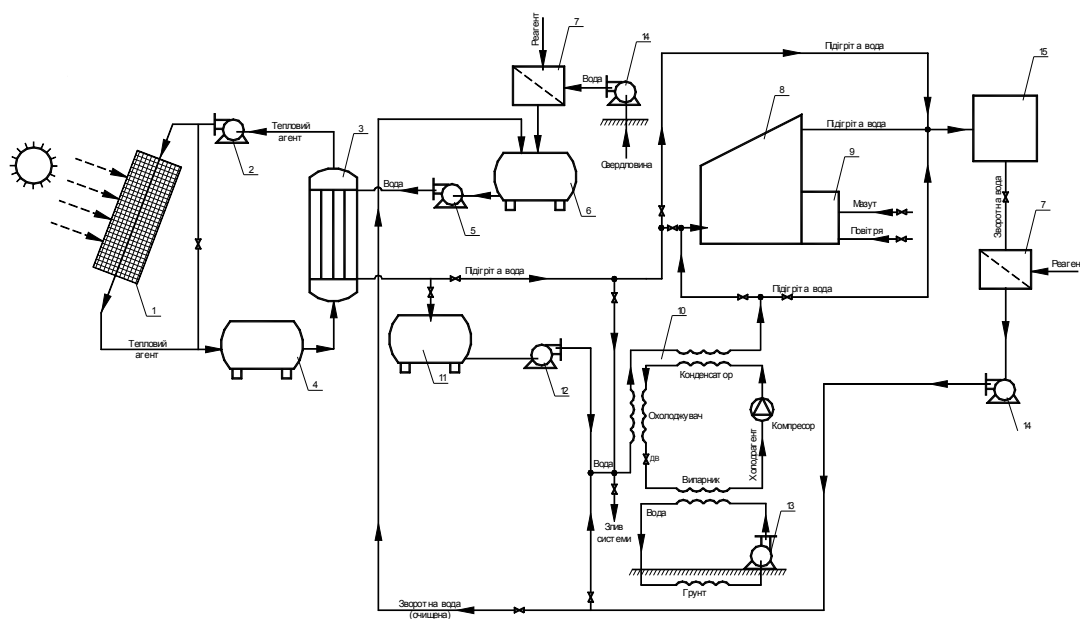


Рисунок 1 – Технологическая схема теплоэнергетической системы горячего водоснабжения и отопления коттеджа

- 1 – гелиоколлектор; 2 – насос; 3 – теплообменное устройство;
- 4, 6, 11 – баки-аккумуляторы; 5 – насос; 7 – установки химводоочистки;
- 8 – котельная установка; 9 – топка котла; 10 – грунтовой тепловой насос;
- 12–14 – насосы; 15 – пользователь

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

Принцип действия системы при сезонной работе в теплое время года

Антифриз (тепловой агент) из бака-аккумулятора 4 через первый контур теплообменника 3 циркуляционным насосом 2 подается в гелиоколлектор 1 солнечной установки, где нагревается до необходимой температуры и назад поступает в бак-аккумулятор 4. Нагретый антифриз отдает свое тепло во втором контуре кожухотрубчатого теплообменного аппарата 3 теплоносителю (вода), который подается циркуляционным насосом 5 из бака-аккумулятора 6, и подогретая поступает в бак-аккумулятор 11. Вода из скважины насосом 14 подается в установку химводоочистки 7, где очищается от солей и дальше поступает в бак-аккумулятор 6. Подогретая до необходимой температуры вода во втором контуре теплообменного аппарата 3 подается пользователю 15 на горячее водоснабжение. Когда температура воды не удовлетворяет пользователя 15, вода из бака-аккумулятора 11 циркуляционным насосом 12 подается во второй контур охладителя и конденсатора грунтового теплового насоса 10 «грунт-вода», где догревается до необходимой температуры и поступает пользователю 15.

Обратная вода от пользователя 15 подается в установку химводоочистки 7, где очищается и циркуляционным насосом 14 подается в бак-аккумулятор 6, или, в случае недостаточного количества воды пользователю 15, подается во второй контур охладителя и конденсатора грунтового теплового насоса 10, где догревается, и опять поступает пользователю 15. В случае аварийной ситуации есть возможность выпустить теплоноситель в канализацию (слив воды из системы). В случае повышения температуры воздуха на улице до некомфортной отметки, отключается солнечная установка и включается в тепловом насосе режим кондиционирования. Вода из грунтового теплообменного коллектора циркуляционным насосом 13 подается в контур 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 грунтового теплового насоса циркуляционным насосом 13 подается во второй контур испарителя теплового насоса, где нагревает холодоагент первого контура, который превращается в пар. Пар холодоагента поступает в компрессор, где сжимается до высокой температуры и давления. Дальше пар поступает в конденсатор теплового насоса, где отдает свое тепло второму контуру конденсатора [5], в который подается вода циркуляционным насосом 12 из бака-аккумулятора 11, или циркуляционным насосом 14 от пользователя 15. Таким образом, вода нагревается сначала во втором контуре конденсатора, а затем во втором контуре охладителя и поступает к пользователю с необходимой температурой (максимальная 80 °С). Когда из строя выходит: солнечная установка и тепловой насос, то в качестве теплового дублера выступает котельная установка 8 с мазутной горелкой 9, 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 (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.

Таким образом, тепловая энергия теплоэнергетической системы снабжения Q_T состоит из тепловой энергии двухконтурной гелиоустановки Q_1 и тепловой энергии теплового насоса Q_2 , и рассчитывается по уравнению

$$Q_T = Q_1 + Q_2. \quad (1)$$

Значения количества использованной теплоты для предыдущего подогрева воды определяется по формуле

$$Q_1 = G_B \cdot \rho_B \cdot c_B \cdot (t_B'' - t_B'), \quad (2)$$

где G_B – объемный расход подогреваемой воды, м³/с; ρ_B – плотность воды, кг/м³; c_B – теплоемкость воды, кДж/(м³·К); t_B' , t_B'' – температура холодной и подогретой воды, соответственно, °С.

Значения количества теплоты в тепловом насосе определяется по формуле

$$Q_2 = \xi \cdot N_{ЭЛ}, \quad (3)$$

где ξ – коэффициент преобразования теплового насоса; $N_{ЭЛ}$ – энергия, потраченная для реализации цикла теплового насоса.

Экономия топлива ΔB в котлоагрегате за счет использования такой системы можно рассчитать с помощью уравнений теплового баланса (1–3).

Годовая экономия условного топлива составит, т.у.т./год

$$\Delta B_{\text{год}} = \frac{Q_{\text{год}}}{Q_H^P \cdot \eta_K}, \quad (4)$$

где $Q_H^P = 29,33$ МДж/кг – теплотворная способность условного топлива; $Q_{\text{год}}$ – годовое количество утилизируемой теплоты, МДж/год; η_K – коэффициент полезного действия котла.

Экономия органического топлива определяется, т/год (тыс. м³/год)

$$\Delta B = \Delta B_{\text{год}} \cdot \frac{29,33}{1000 \cdot Q_H^P}. \quad (5)$$

Годовая экономия за счет сокращения расхода первичного топлива для подогрева воды составит для котлоагрегата, грн/год

$$E_{\Pi} = \Delta B \cdot C_{\Pi}, \quad (6)$$

где C_{Π} – стоимость первичного топлива, грн/т (грн/1000 м³).

Срок окупаемости теплоэнергетической системы горячего водоснабжения и отопления составит, год

$$T = S_C / (Q_T \cdot C_T), \quad (7)$$

где S_C – удельная стоимость теплоэнергетической системы горячего водоснабжения и отопления, грн/м²; Q_T – годовое количество теплоты, выработанное теплоэнергетической системой, Гкал/м²; C_T – стоимость теплоты от традиционного энергоисточника, грн/Гкал.

Были проведены расчеты эффективности использования предложенной теплоэнергетической системы водоснабжения для котельной с водогреющими котлами типа КВГ тепловой мощностью 40 Гкал/год. При количестве утилизируемой теплоты 0,432 Гкал /сутки и времени работы 5760 час/год, годовая экономия топлива составляет 7200 м³ у.т./год.

Поскольку предложенная система была смонтирована на частном подворье в Харьковской области при реконструкции коттеджа и проработала полных четыре года, то экономия топлива составила сто тысяч гривен за год. Срок окупаемости 1,5 года.

Выводы. Таким образом, применение теплоэнергетической системы снабжения: горячей водой и отоплением, в которой совместно с двухконтурной солнечной установкой используется геотермальный грунтовый тепловой насос, позволяет: уменьшить себестоимость тепловой энергии за счет снижения материалоемкости используемого оборудования; 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. Селихов Ю.А., Ведь В.Е., Бухкало С.И., Костин В.М. Конструкционные особенности увеличения эффективности работы гелиоустановок. Экотехнологии и ресурсосбережение.– Киев: Типография НАН Украины, № 3, 2004.– с. 70–75.
4. Селіхов Ю.А., Бухкало С.І., Селіхова Н.В., Селіхова Л.Ю. Двоконтурна геліоводонагрівна установка, Патент України, № 64198 А, Бюл. № 2, 2004.
5. Рей Д., Макмайл Д. Тепловые насосы: Пер. с англ. – М.:Энергоиздат, 1982. – 224 с.

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. Vikoristannya teploviy nasosiv // Holod M T, 2006, #2 p. 34–36.
3. Selihov Yu.A., Ved V.E., Buhkalo S.I., Kostin V.M. Konstruktsionnyye osobennosti uvelicheniya effektivnosti raboty gelioustanovok. Ekotekhnologii i resursosberezhenie. – Kiev: Tipografiya NAN Ukrainyi, # 3, 2004. – p. 70–75.
4. Selihov Yu.A., Buhkalo S.I., Selihova N.V., Selihova L.Yu. Dvokonturna geliiovodonagrivna ustanovka, Patent Ukrayini, # 64198 A, Byul. # 2, 2004.
5. Rey D., Makmaykl D. Teplovyie nasosy: Per. s angl. – M.: Energoizdat, 1982. – 224 p.

УДК 662.997

Селіхов Ю.А., Коцаренко В.О., Горбунов К.О., Давидов В.О.

**ПОНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ І
ОПАЛЮВАННЯ ПРИВАТНОГО БУДИНКУ**

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

Selikhov Yu. A., Kotsarenko V. A., Gorbunov K. A., Davydov V. A.

**RENEWABLE ENERGY SOURCES FOR HOT WATER-SUPPLY
AND HEATING OF PRIVATE HOUSE**

The warmly-power system of supply is offered: hot water and heating, in which jointly with two contour sun setting, a geothermal ground thermal pump. This system allows: to decrease the prime price of thermal energy due to the decline of material capacities and charges on an equipment; to save an organic fuel; to decrease the thermal loading and contamination of environment.

УДК 66 : 519.7

Бобух А.О., Дзевочко О.М., Подустов М.О., Переверзева А.М.

СИНТЕЗ КРИТЕРІЇВ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ВИБОРУ СТРУКТУРИ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ХІМІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Вступ

До складу більшості хімічних виробництв входять основні та допоміжні технології зі складними технологічними процесами та апаратами і замкненими циклами за матеріальними потоками [1–2]. Наявність замкнених циклів значно ускладнює ідентифікацію таких технологій та синтез критеріїв оцінювання якості вибору структури їх математичних моделей.

Сучасний розвиток науково-технічного прогресу дозволяє розглядати основні принципи покращання ефективності комп'ютерно-інтегрованих технологій хімічних виробництв за рахунок визначення адекватних математичних моделей та вибору необхідних критеріїв оцінювання якості структури цих моделей.

Мета роботи

Виконати синтез критеріїв оцінювання якості вибору структури математичних моделей хімічних технологій, які повинні бути економічними з точки зору необхідної для їх реалізації кількості операцій, сприяти підвищенню енергозбереження і покращанню ефективності комп'ютерно-інтегрованих хімічних технологій.

Основна частина

Процес визначення математичної моделі реальних технологій хімічних виробництв включає як їх експериментальне дослідження, так і розробку алгоритмів, які передбачають визначення структури моделі (структурна ідентифікація), оцінку параметрів математичної моделі визначеної структури (параметрична ідентифікація) та оцінку адекватності цієї моделі реальній технології.

Значні труднощі отримання адекватних математичних моделей технологій хімічних виробництв завдають неконтрольовані зміни значень параметрів технологічних процесів, які викликані старінням обладнання, нестабільністю характеристик сировини тощо. Вибір структури математичної моделі можна сформулювати як визначення оптимізаційної задачі [3–6]:

$$s^* = \arg \min_{s \in \Omega} CR(s), \quad (1)$$

де s^* – оптимальна структура математичної моделі; s – структура математичної моделі; Ω – численність усіх можливих структур, в яких перебувають деякі незалежні параметри із «повного» набору незалежних параметрів; $CR(s)$ – критерій оцінювання якості структури математичної моделі.

Математична модель із структурою, яка надає критерію якості оцінювання мінімальне значення незалежних параметрів, називається моделлю оптимальної складності [4–6], тобто моделлю, яка вміщує мінімальну кількість незалежних параметрів.

Зазначемо, що не всі підходи до вибору структури математичної моделі можуть бути сформульовані у вигляді задачі (1). Наприклад, якщо при добавлянні незалежних

параметрів до математичної моделі значення критерію якості оцінювання буде монотонно зменшуватися, то задача вибору структури цієї моделі може бути модифікована наступним чином: вибрати найбільш просту структуру s математичної моделі, критерій якості оцінювання якої задовольняє умові: $CR(s) \leq k$, де k – порогове значення [4]. Застосування комбінацій перевірки гіпотез і оптимізації представляють особливість підходу, який реалізований в методі покрокової регресії [6], де використовується критерій якості оцінювання вибору структури математичної моделі, заснований на F -критерії (Фішера) при порівнянні точності двох рядів вимірювань, при проверці стійкості технологічного процесу. Функція F – це відношення виборочних дисперсій:

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2} \quad (2)$$

Значення функції (2) для рівнів значимості 0,5 і 0,1 табулювані для відповідних ступеней свободи кожної із двох дисперсій. При порівнянні двох дисперсій в чисельнику критерію (2) має бути значення більшої дисперсії. Описаний підхід використовується при визначенні структури математичних моделей. В цьому разі якість визначення структури математичної моделі оцінюється за допомогою параметричного статистичного F – критерію, який перевіряє гіпотезу про те, що дисперсії двох випадкових величин X і Y , які представлені виборками X_s і Y_s , співпадають. Для достовірності необхідно виконання двох умов: ці дві випадкові величини повинні мати нормальне розподілення; виборки мають бути незалежними. Якщо ці умови виконуються, а визначені математичні моделі будуть лінійними, тоді застосування F –критерію дає добрі результати.

Взагалі критерії оцінювання, які розроблені для вибору структур математичних моделей, доцільно розділити на дві групи: критерії, які використовують екзаменаційну виборку, та критерії, які таку виборку не використовують.

Для критеріїв оцінювання першої групи використовується принцип [4–6], згідно яких параметри математичної моделі необхідно оцінювати за однією частиною виборки (навчальною), а якість її структури – за другою частиною виборки (екзаменаційною або перевірковою). До них відносяться критерії: регулярності, стабільності, несуперечності та варіативності. Для лінійних регресійних математичних моделей названі критерії отримують шляхом розбиття початкової виборки $W: \{Y, X\}$ на дві частини: $A: \{Y_A, X_A\}$ та $B: \{Y_B, X_B\}$. Введемо наступні позначення: $\hat{\theta}_W$, $\hat{\theta}_A$ та $\hat{\theta}_B$ – МНК-оцінки вектору параметрів θ , обчислені з використанням виборок W , A та B відповідно. Тоді ці критерії можна представити в наступному вигляді:

симетричний та несиметричний критерії регулярності – $Re\ g(A)$ та $Re\ g(B)$:

$$Re\ g(A) = (Y_A^* - X_A \hat{\theta}_B)^T (Y_A^* - X_A \hat{\theta}_B) + (Y_B^* - X_B \hat{\theta}_A)^T (Y_B^* - X_B \hat{\theta}_A), \quad (3)$$

$$Re\ g(B) = (Y_B - X_B \hat{\theta}_A)^T (Y_B - X_B \hat{\theta}_A) \quad (4)$$

симетричний та несиметричний критерії стабільності – $Stab(A)$ та $Stab(B)$:

$$Stab(A) = (Y - X \hat{\theta}_A)^T (Y - X \hat{\theta}_A) + (Y - X \hat{\theta}_B)^T (Y - X \hat{\theta}_B), \quad (5)$$

$$Stab(B) = (Y - X\hat{\theta}_A)^T (Y - X\hat{\theta}_A); \quad (6)$$

симетричний та несиметричний критерії несуперечності (мінімуму змішування рішення) – $NC(A)$ та $NC(B)$:

$$NC(A) = (\hat{\theta}_A - \hat{\theta}_B)^T X^T X (\hat{\theta}_A - \hat{\theta}_B), \quad (7)$$

$$NC(B) = (\hat{\theta}_A - \hat{\theta}_B)^T X^T X_B (\hat{\theta}_A - \hat{\theta}_B); \quad (8)$$

симетричний та несиметричний критерії варіативності (абсолютної перешкодостійкості критерії) – $V(A)$ та $V(B)$:

$$V(A) = (\hat{\theta}_W - \hat{\theta}_A)^T X^T X (\hat{\theta}_B - \hat{\theta}_W), \quad (9)$$

$$V(B) = (\hat{\theta}_W - \hat{\theta}_A)^T X_B^T X_B (\hat{\theta}_B - \hat{\theta}_W). \quad (10)$$

Зауважимо, що любий симетричний критерій (CR) дорівнює сумі двох несиметричних: $CR = CR(A) + CR(B)$.

При обчисленні критеріїв, які відносяться до другої групи [4–6], використовується критерій залишкової суми квадратів помилок моделі – RSS :

$$RSS = \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K [y(i) - \hat{y}(i)]^2, \quad (11)$$

де $y(i)$, $\hat{y}(i)$ – вимір та оцінки відповідно.

Сама ця величина не може слугувати критерієм оцінювання для вибору структури математичної моделі, оскільки зі збільшенням складності моделі S відбувається все більш точне приближення її до оригіналу, що можливо та допустимо тільки при відсутності перешкод. Якщо відомо, що шум має нормальне розподілення, тоді застосовують скоректований критерій $RSS(S)$ (12) або статистику Фішера (13):

$$RSS(S) = \frac{RSS}{K - S}; \quad (12)$$

$$F(S) = \frac{K}{K - S} \frac{RSS(S)}{\|y - \hat{y}\|^2}. \quad (13)$$

Якщо ж при цьому можливо отримання оцінки дисперсії перешкоди, тоді застосовують критерій Меллоуса – C_S :

$$C_S = \frac{1}{\hat{\sigma}^2} RSS + 2S - K. \quad (14)$$

Величина RSS використовується також в критерії фінальної помиилки прогнозування – $FPE(S)$:

$$FPE(S) = \frac{K+S}{K-S} RSS(S). \quad (15)$$

Широке розповсюдження мають інформаційні критерії якості оцінювання структури математичної моделі, зокрема [4–6]: Акаїке (AIC – Akaike’s information criterion) (16); Шварца-Риссанена (BIC – Bayesian information criterion) (17); Кульбака (KIC – Bayesian information criterion) (18); Хеннана-Куїнна (HQ) (19):

$$AIC = K \ln \left[\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K e^2(k) \right] + K \ln \frac{K+S}{K-S}; \quad (16)$$

$$BIC = K \ln \left[\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K e^2(k) \right] + S \ln K; \quad (17)$$

$$KIC = K \ln \left[\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K e^2(k) \right] + 3S \ln K; \quad (18)$$

$$HQ = K \ln \left[\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K e^2(k) \right] + 2S \ln(\ln K). \quad (19)$$

Треба зазначити, що використання будь-якого приведенного критерію оцінювання вибору структури математичної моделі не гарантує визначення її в якості оптимальної. Пошук найкращої залюбим критерієм оцінювання якості структури математичної моделі відноситься до задачі цілечисленого нелінійного програмування.

Гарантоване вирішення задачі можливо отримати тільки в результаті перебору всіх визначених структур математичних моделей. При цьому кількість структур (N) визначається за формулою $N = 2^m$, де m – кількість незалежних параметрів в «повному» наборі незалежних параметрів, із яких вибирається оптимальний їх набір. За цією причиною реально наведеним алгоритмом можливо скористуватися тільки при відносно невеликих значеннях m ($m \leq 5$) [5].

Другий спосіб заключається в перегляді тільки найбільше перспективних варіантів. При цьому використовують алгоритми направленного перебору [4], які виконують пошук мінімуму критерію оцінювання структури математичної моделі з суттєво меншими витратами, але в загальному випадку не завжди забезпечують знаходження її оптимальної структури. При цьому алгоритм «виключення» розпочинається з оцінки якості структури математичної моделі, в якій представлені всі незалежні параметри, та складається з кроків виділення з неї незалежних параметрів до тої пори, доки значення величини критерію якості моделі не перестане зменшуватися. Алгоритм «включення» діє в зворотньому напрямку. Розпочинається алгоритм із математичної моделі, яка містить в собі адитивну постійну (незалежний параметр «1»), та послідовно доповнює до неї незалежні параметри. Отже незалежний параметр, який доповнюється (виділяється) на кожному кроці, вибирається з умови найбільшого зменшення значення критерію оцінювання якості вибору оптимальної структури математичної моделі, при цьому пошук оптимальної структури закінчується.

Вельми важливими при синтезі критеріїв оцінювання якості виникають питання стійкості в задачах вибору структур математичних моделей, а тому необхідно виділити три аспекти стійкості [4].

Перший аспект пов'язаний зі стійкістю результатів моделювання до варіативності виборки. Якщо визначаються дві моделі з однаковою структурою за двома різними частинами виборки та результати моделювання виходять різними, тоді вибрана структура моделі не забезпечує стійкість результатів та, в цілому, приводе до суперечної моделі. Одним із засобів забезпечення стійкості в цьому випадку слугує застосування критеріїв, які використовують екзаменаційну виборку.

Другий аспект пов'язаний зі завадостійкістю критеріїв якості, тобто з їх спроможністю вибирати структури, які забезпечують задовільні в будь-яком сенсі результати моделювання, в умовах збільшення дисперсії похибок.

Третій аспект стійкості пов'язаний зі стійкістю процедур вибору моделі до відхилення від класичний припущень про властивості похибок наглядання. Традиційно процедури вибору структури спираються на МНК-оцінки та самі критерії визначаються на основі залишкових сум квадратів.

Розглянуті теоретичні підстави та виконаний синтез критеріїв оцінювання якості вибору структури математичних моделей можуть бути реалізовані при розробці комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва хімічної промисловості на базі сучасних багатофункціональних мікропроцесорних контролерів.

Висновок В результаті досліджень розглянуті теоретичні підстави та виконаний синтез критеріїв оцінювання якості вибору структури математичних моделей хімічних технологій, які повинні бути економічними з точки зору необхідної для їх реалізації кількості операцій, сприяли підвищенню енергозбереження і покращанню ефективності комп'ютерно-інтегрованих технологій виробництва хімічної промисловості на базі сучасних багатофункціональних мікропроцесорних контролерів.

Література

1. Процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов в 2 ч. Ч. 1 [Текст] / Л.Л. Тovaжнянский, А.П. Готлинская, В.А. Лещенко и др.; под общей ред. Л.Л. Тovaжнянского.Х.: НТУ «ХПИ». – 2004. – 632 с.
2. Процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов в 2 ч. Ч. 2 [Текст] / Л.Л. Тovaжнянский, А.П. Готлинская, В.А. Лещенко и др.; под общей ред. Л.Л. Тovaжнянского. – Х.: НТУ «ХПИ». – 2005. – 523 с.
3. Ивахненко А.Г. Долгосрочное прогнозирование и управление сложными объектами [Текст] / А.Г. Ивахненко. – К. : Техніка. – 1975. – 311 с.
4. Степашко В.С. Методы и критерии решения задач структурной идентификации [Текст] / В.С. Степашко, Ю.В. Кочерга. / Автоматика.–1985.–№5.– С. 29–37.
5. Бобух А.А. Компьютерно-интегрированная система автоматизации технологических объектов управления централизованным теплоснабжением: монография [Текст] / А.А. Бобух, Д.А. Ковалев; под ред. А.А. Бобуха. – Х.: ХНУГХ им. А.Н. Бекетова. – 2013. – 226 с.
6. Трегуб В.Г. Основы комп'ютерно-інтегрованого керування [Текст] / В.Г. Трегуб. – К. : НУХТ. – 2005.– 191 с.

Bibliography (transliterated)

1. Protsessyi i apparaty himicheskoy tehnologii : uchebnik dlya vuzov v 2 ch. Ch. 1 [Tekst] / L.L. Tovazhnyanskyy, A.P. Gotlinskaya, V.A. Leschenko i dr.; pod obschey red. L.L. Tovazhnyanskogo.H.: NTU «HPI». – 2004. – 632 p.

2. Protsessyi i apparaty himicheskoy tehnologii : uchebnyk dlya vuzov v 2 ch. Ch. 2 [Tekst] / L.L. Tovazhnyansky, A.P. Gotlinskaya, V.A. Leschenko i dr.; pod obschey red. L.L. Tovazhnyanskogo. – H.: NTU «HPI». – 2005. – 523 p.
3. Ivahnenko A.G. Dolgosrochnoe prognozirovaniye i upravleniye slozhnyimi ob'ektami [Tekst] / A.G. Ivahnenko. – K. : Tehnika. – 1975. – 311 p.
4. Stepashko V.S. Metody i kriterii resheniya zadach strukturnoy identifikatsii [Tekst] / V.S. Stepashko, Yu.V. Kocherga. / Avtomatitka.–1985.–#5.– P. 29–37.
5. Bobuh A.A. Kompyuterno–integrirovannaya sistema avtomatizatsii tehnologicheskikh ob'ektov upravleniya tsentralizovannym teplosnabzheniem: monografiya [Tekst] / A.A. Bobuh, D.A. Kovalev; pod red. A.A. Bobuha. – H.: HNUGH im. A.N. Beketova. – 2013. – 226 p.
6. Tregub V.G. Osnovy komp'yuterno–integrovanogo keruvannya [Tekst] / V.G. Tregub. – K. : NUHT. – 2005. – 191 p.

УДК 66 : 519.7

Бобух А.А., Дзевочко А.М., Подустов М.А., Переверзева А.Н.

СИНТЕЗ КРИТЕРИЕВ ОЦЕНИВАНИЯ КАЧЕСТВА ВЫБОРА СТРУКТУРЫ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ХИМИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ

В результате исследований рассмотрены теоретические основы и выполненный синтез критериев оценивания качества выбора структуры математических моделей химических технологий, которые должны быть экономичными с точки зрения необходимого для их реализации количества операций, способствовали повышению энергосбережения и улучшению эффективности компьютерно–интегрированных технологий производств химической промышленности на базе современных multifunctional микропроцессорных контроллеров.

Bobukh A.O., Dzevochko O.M., Podustov M.O., Pereverzieva A.M.

SYNTHESIS CRITERIA FOR EVALUATING THE QUALITY OF THE CHOICE OF THE STRUCTURE OF MATHEMATICAL MODELS OF CHEMICAL TECHNOLOGIES

The studies theoretical framework and synthesis of criteria of quality assessment of the choice of the structure of mathematical models of chemical technologies that must be economical from the point of view of the necessary number of operations, contributed to improving energy efficiency and improving the effectiveness of computer–integrated technologies of the production of the chemical industry on the basis of modern multifunctional microprocessor-based controllers.

Мацегора А.И.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Такое явление, как возникновение загрязнений в виде слоя отложений на теплопередающей поверхности, может значительно ухудшить интенсивность процесса теплопередачи и повлиять на работу теплообменника. Правильный прогноз загрязнений особенно важен в пластинчатых теплообменниках (ПТО) с гораздо более высокими коэффициентами теплоотдачи, чем в трубчатых теплообменниках. Предложена математическая модель теплообмена в пластинчатых теплообменниках при работе со средами склонными к образованию загрязнений. Модель представлена системой уравнений в частных производных, интегрирование которой позволяет оценить локальные параметры теплообменных потоков и рассчитать локальные значения толщины слоя осаждаемого вещества во времени. Скорость загрязнения определяется с использованием предложенной ранее модели. Модель проверена путем сравнения с данными, полученными для пластинчатых теплообменников, работающих в промышленности, и может быть использована для более точного расчета площади теплообмена пластинчатых теплообменников в условиях образования загрязнений, в отличие от методов, основанных на усредненных характеристиках процесса. Применение разработанной модели иллюстрируется на двух примерах работы пластинчатых теплообменников в сахарной промышленности и системе централизованного теплоснабжения.

Введение

Сокращение энергетической зависимости Украины от поставок ископаемого топлива требует широкого внедрения энергосбережения и использования альтернативных источников энергии [1]. Эффективная рекуперация тепла с использованием современного теплообменного оборудования чрезвычайно важна для экономии энергии, снижения загрязнения окружающей среды и оптимизации использования энергии с целью сокращения потребления ископаемого топлива и уменьшения опасных выбросов двуокиси углерода, парниковых газов и других вредных веществ [2]. Явления загрязнения могут значительно ухудшить интенсивность процесса теплопередачи и производительности теплообменника за счет создания дополнительного термического сопротивления слоя загрязнения [3]. Более того, площадь поперечного сечения каналов частично блокируется отложениями, что может привести к значительному увеличению перепада давления в теплообменнике и, наконец, к полному засорению каналов. Как кратко изложено в [4], по анализу различных публикаций, консервативная оценка загрязнения теплообменника позволяет сделать вывод, что дополнительные затраты из-за загрязнения в промышленно развитых странах составляют порядка 0,25 % от валового внутреннего продукта (ВВП). Загрязнение также является причиной около 2,5 % общих эквивалентных антропогенных выбросов углекислого газа. В большинстве производственных процессов загрязнение создает серьезную эксплуатационную проблему, которая ставит под угрозу процесс рекуперации энергии и создает дополнительные негативные

последствия для окружающей среды. Одним из эффективных способов уменьшения загрязнения является использование интенсифицированных поверхностей теплопередачи, как показал анализ различных работ, приведенный в [5]. Это в значительной степени характерно для ПТО, как показано в лабораторных исследованиях [6] и на базе анализа данных в [7]. ПТО является одним из наиболее энергоэффективных типов теплообменников с улучшенной теплопередачей [8]. Подтверждена высокая эффективность их применения в различных отраслях промышленности [9–11]. В таких компактных теплообменниках с высокими коэффициентами теплоотдачи и узкими каналами большое значение имеет прогнозирование образования отложения.

Образование отложения на поверхностях теплообмена определяется рядом факторов, среди которых одним из наиболее важных является температура. Температура теплоносителя и температура поверхности, на которой образуется слой загрязнения, оказывают большое влияние на скорость осаждения загрязнений, как показано рядом исследователей [12]. Это приводит к значительным различиям в осаждении загрязнений по поверхности теплообмена и существенно влияет на распределение общих коэффициентов теплопередачи и характеристик потерь давления в канале. Другим важным фактором, влияющим на осаждение загрязнений, является касательное напряжение сдвига на поверхности теплообмена. Увеличение напряжения сдвига на стенке может значительно уменьшить загрязнение и получить экономически целесообразные решения в конструкции теплообменника [13]. С развитием слоя отложения сдвиговое напряжение на его поверхности увеличивается за счет увеличения скорости потока через уменьшенную площадь поперечного сечения канала, частично перекрытую отложением. Температура жидкости и ее границы также изменяется вдоль поверхности теплообмена с изменением термического сопротивления отложения. Оба эти фактора приводят к значительным различиям в скорости образования отложения и его толщине по поверхности теплообмена. Эти факторы оказывают существенное влияние в целом на распределение коэффициентов теплопередачи и потерь давления в канале. В таких условиях предположение о постоянстве общего коэффициента теплопередачи не выполняется, и фактические разности температур между горячими и холодными потоками могут существенно отличаться от рассчитанных для средней логарифмической разности температур. Расчеты теплообменников с использованием усредненных коэффициента теплопередачи и падения давления не позволяют учесть эти явления и могут привести к существенным расхождениям в оценке площади поверхности теплообмена, необходимой для поддержания заданных условий процесса. В настоящем исследовании предложена математическая модель, учитывающая локальное распределение загрязнений вдоль поверхности теплообмена каналов ПТО, результаты моделирования проиллюстрированы на двух примерах.

Математическое моделирование ПТО с учетом образования загрязнений

Образование загрязнений на поверхности теплообмена существенно зависит от температуры самой поверхности и характеристики омывающего ее потока. В то же время растущий слой загрязняющего осадка приводит к изменениям в потоке за счет уменьшения площади поперечного сечения канала для свободного прохода теплоносителя и изменения шероховатости поверхности на границе потока. Загрязнение также вносит дополнительное термическое сопротивление, которое влияет на температуру

поверхности. Все эти особенности должны учитываться при математическом моделировании ПТО и создании методик расчета [14].

Математическая модель ПТО жидкость-жидкость разработана на основе следующих предположений:

1. ПТО имеет один ход с противотоком для обоих потоков.
2. Характеристики для всех каналов одного из потоков одинаковы.
3. Тепловыми потерями в окружающую среду можно пренебречь.
4. Параметры процесса изменяются только по длине канала.
5. Тепловым сопротивлением загрязнений на стороне горячего потока можно пренебречь.

Как отмечено в [15], во многих моделях механизмов засорения, таких как образование накипи, кристаллизация и осаждение осадка в виде частиц, скорость осаждения загрязнений выражается как разница между интенсивностью осаждения загрязнения φ_d и интенсивностью удаления загрязнения φ_r . Для каналов ПТО такая модель была предложена в [16] со скоростью осаждения загрязнений рассчитанной по уравнению:

$$\frac{\partial \delta_f}{\partial \theta} = \varphi_d - b \cdot \tau_w \cdot \delta_f, \quad (1)$$

где δ_f – толщина слоя загрязнений, м; θ – время, с; τ_w – напряжение сдвига стенки, Па; b – эмпирический коэффициент, $1/(\text{Па} \cdot \text{с})$.

Термическое сопротивление загрязнения:

$$R_f = \frac{\delta_f}{\lambda_f}, \quad (2)$$

где λ_f – коэффициент теплопроводности осаждаемого осадка, Вт/(м·К).

Интенсивность осаждения загрязнения выражается следующим образом:

$$\varphi_d = \frac{A_m \cdot P_{cu} \cdot T_s^{2/3} \cdot \rho^{2/3} \cdot \mu^{-4/3}}{1 + B_m \cdot P_{cu} \cdot 2 \cdot \tau_w \cdot \rho^{-4/3} \cdot \mu^{-1/3} \cdot T_s^{2/3} \cdot \exp(E / (R \cdot T_s))}; \quad (3)$$

$$P_{cu} = \frac{2 \cdot \tau_w^{1-\frac{1}{1.75}}}{\rho} \left(\frac{D_e^{0.25} \cdot 2}{\mu^{0.25} \cdot \rho^{0.75} \cdot 0.0791} \right)^{-\frac{1}{1.75}}, \quad (4)$$

где T_s – температура поверхности, К; ρ – плотность потока, кг/м³; μ – динамическая вязкость жидкости, Па·с, R – универсальная газовая постоянная, равная 8,314 Дж/(моль·К), P_{cu} рассчитывается согласно уравнению (4), в котором D_e – эквивалентный диаметр канала, м. В этом отношении эмпирические параметры A_m , B_m и E зависят от физической природы теплоносителя.

Для оценки изменения параметров процесса вдоль длины канала ПТО температура холодного потока определяется следующим уравнением:

$$\frac{\partial T_2}{\partial x} = \frac{q \cdot \Pi}{g_2 \cdot c_{p2}}, \quad (5)$$

где q – удельный тепловой поток, Вт/м²; g_2 – массовый расход холодного теплоносителя через один канал, кг/с; C_{p2} – удельная теплоемкость холодного потока, Дж/(кг·К); Π – периметр канала, м.

Для горячего теплоносителя:

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{\partial T_2}{\partial x} \cdot \frac{g_2 \cdot c_{p2}}{g_1 \cdot c_{p1}}, \quad (6)$$

где g_1 – массовый расход горячего потока через один канал, кг/с; C_{p1} – удельная теплоемкость горячего потока, Дж/(кг·К).

Удельный тепловой поток через поверхность теплопередачи:

$$q = U \cdot (T_1 - T_2), \quad (7)$$

где U – общий коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К).

$$U = \left(\frac{1}{h_1} + \frac{1}{h_2} + R_f + \frac{\delta_w}{\lambda_w} \right)^{-1}. \quad (8)$$

Здесь δ_w – толщина металла теплопередающей пластины, м; λ_w – теплопроводность теплопередающей пластины, Вт/(м·К); h_1 и h_2 – коэффициенты теплоотдачи для горячего и холодного теплоносителей, соответственно, Вт/(м²·К).

Температура поверхности слоя загрязнений:

$$T_s = \frac{U}{h_2} (T_1 - T_2) + T_2. \quad (9)$$

Коэффициенты теплоотдачи рассчитываются в соответствии с корреляционными уравнениями, предложенными в [17–19] для падения давления и теплоотдачи на основном гофрированном поле в зависимости от геометрии канала и теплофизических свойств жидкости. Для краткости здесь эти корреляции представлены в общем виде:

$$h_j = h_j(W_j, T_j, T_s, \beta, \gamma, d_e), \quad (10)$$

где W – скорость потока в канале, м/с; β – угол гофров к оси пластины, градусы; γ – отношение угла наклона гофра к высоте; d_e – эквивалентный диаметр канала.

Скорость потока и эквивалентный диаметр для стороны холодного теплоносителя рассчитываются с учетом изменения площади поперечного сечения канала с осаждением загрязнений:

$$W_2 = \frac{g_2}{(f_{ch} - \delta_f \cdot \Pi) \cdot \rho_2}; \quad (11)$$

$$de_2 = de_1 - 2 \cdot \delta_f. \quad (12)$$

Напряжение сдвига на стенке рассчитывалось следующим образом:

$$\tau_{wj} = \zeta_{sj} \cdot \psi_j \cdot \rho_j \cdot W_j / 8. \quad (13)$$

Здесь коэффициент трения ζ_s для полных потерь давления (из-за трения о стенку и сопротивления формы) оценивается по соотношению из [20], так же, как и доля потерь на трение ψ .

Уравнения (1)–(13) можно рассматривать как систему трех уравнений с частными производными (1), (5) и (6) с нелинейными правыми частями, выраженными через остальные алгебраические уравнения системы. Аналитическое решение невозможно из-за значительной нелинейности. Для численного решения этой системы используется метод конечных разностей. Он реализован как программное обеспечение для ПК в среде Mathcad. Результаты решения математической модели иллюстрируются двумя примерами, представленными в следующих разделах.

Пример 1. Сахарный завод

Результаты промышленных испытаний ПТО для нагрева слабого сока теплом конденсата пара после испарения раствора в первом корпусе представлены в [21]. Теплообменник работал 13 дней после последней очистки. Первые измерения проводились после запуска, что для этого случая занимало много времени из-за нескольких остановок оборудования. Стабильные условия начались после 96 часов работы. Используя эти данные, экспериментальный общий коэффициент теплопередачи оценивается уравнением (14) с экспериментальными значениями $t_{22} = t_{22\text{exp}}$ и $t_{12} = t_{12\text{exp}}$:

$$U_f = \frac{G_2 \cdot (t_{22} - t_{21}) \cdot c_{p2} \cdot \rho_2}{[(t_{11} - t_{22}) - (t_{12} - t_{21})] \cdot 3600} \cdot \ln \left(\frac{t_{11} - t_{22}}{t_{12} - t_{21}} \right) \quad (14)$$

Моделирование производилось для заданных входных температур потоков t_{11} и t_{22} , равных их экспериментальным значениям. Эмпирические константы модели загрязнения рассматриваются как определенные без учета распределения локальных параметров процесса:

$$A_m = 1.57 \cdot 10^{-12} \text{ кг}^{2/3} \text{ К}^{1/3} \text{ м}^{5/3} (\text{Вт})^{-1} \text{ с}^{-1/3} \text{ ч}^{-1}; B_m = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-13/3} \text{ кг}^{2/3} \text{ с}^{8/3} \text{ К}^{-2/3}; E = 52100 \text{ Дж/моль}^{-1} \text{ и } b = 2.31 \cdot 10^{-4} \text{ Па}^{-1} \text{ с}^{-1}.$$

Усредненные значения термического сопротивления загрязнения при моделировании R_{fm} также хорошо согласуются с экспериментальными R_{fe} , полученными без учета локальных параметров процесса. Эти значения также дают хорошие результаты (см. Таблицу 1) при получении среднего коэффициента теплопередачи по формуле (15):

$$U_f^* = \left(R_{fm}^{-1} + U_0^{-1} \right)^{-1}. \quad (15)$$

Анализ представленных результатов приводит к выводу о достоверности модели. Однако в данном конкретном случае нет большой разницы между расчетами по локальным и средним параметрам процесса. Это можно объяснить небольшими изменениями условий процесса вдоль поверхности теплообмена. Расчетное распределение по длине пластины локального термического сопротивления загрязнения представлено на рис. 1. Изменение значений не превышает 22 % в течение 13 дней работы и остается в этих пределах после работы в течение 28 дней. Такое изменение мало влияет на среднюю теплопередачу. Для более детального анализа следует рассмотреть процесс с большим изменением параметров.

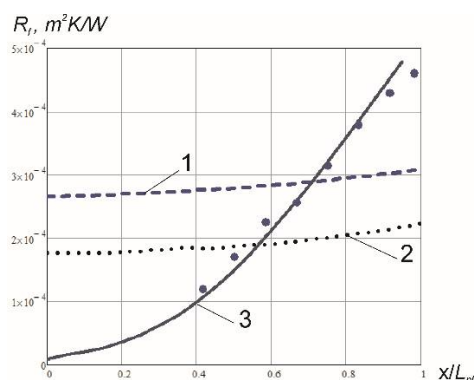


Рисунок 1 – Локальные значения термического сопротивления загрязнения вдоль пластины

Пример 1: (1) – после 28 дней работы; (2) – через 13 дней.

Пример 2: (3) – через 28 дней; Точки – экспериментальные данные

Пример 2. Централизованное теплоснабжение

Результаты обширного экспериментального исследования загрязнения поверхности теплопередачи ПТО при нагреве горячей воды для нужд горячего водоснабжения (ГВС) были опубликованы в [22]. Эксперименты проведены на ПТО, работающем в системе централизованного теплоснабжения (ЦТ) в городе Туле, РФ. Эта система ЦТ построена по «открытой» схеме, где горячая вода для ГВС в домах отбирается из контура радиаторного отопления. Такая система требует нагрева больших объемов водопроводной воды до температур 60–70 °С или даже выше. Предварительная обработка воды, как правило, плохая и, следовательно, масштабы отложений в теплообменниках обширны. Хотя такая схема ЦТ имеет много недостатков по сравнению с современными, она хороша для изучения явлений загрязнения теплопередающей поверхности.

Експерименти проводились с ПТО тип М10В производства Альфа Лаваль. Температура холодной воды на входе изменялась от 7.9 °С до 9.5 °С. Она нагревалась до 59.0–61.5 °С теплоносителем, температура которого постепенно повышалась от примерно 74 °С до 98 °С, чтобы поддерживать требуемую температуру нагретой воды при возрастающем загрязнении. Для нашей модели данные пластины М10В были измерены на оригинальной пластине: $\beta=60^\circ$, $\gamma=0.56$. Высота канала, как сообщается в цитируемой работе, равна 2.93 мм. Данные о температурах и расходах приняты согласно приведенным в источнике. Эмпирические параметры модели загрязнения определены методом наименьших квадратов по данным экспериментов для скорости течения $W = 0.57$ м/с как:

$$A_m = 6.29 \cdot 10^{-12} \text{ кг}^{2/3} \text{ К}^{1/3} \text{ м}^{5/3} (\text{Вт м})^{-1} \text{ с}^{-1/3} \text{ ч}^{-1}; B_m = 1.8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^{-13/3} \text{ кг}^{2/3} \text{ с}^{8/3} \text{ К}^{-2/3}; E = 52100 \text{ Дж моль}^{-1} \text{ и } b = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}.$$

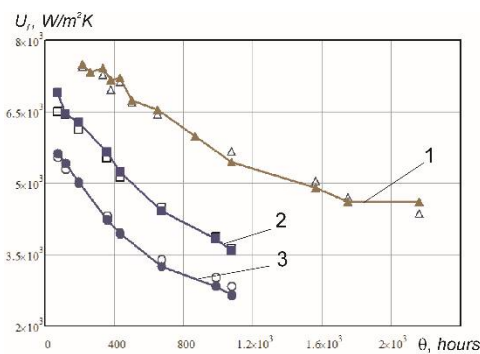


Рисунок 2 – Экспериментальный U_f (черные точки) и рассчитанный U_f (пустые точки):
1 – $W_2=0.57$ м/с; 2 – $W_2=0.40$ м/с; 3 – $W_2=0.26$ м/с

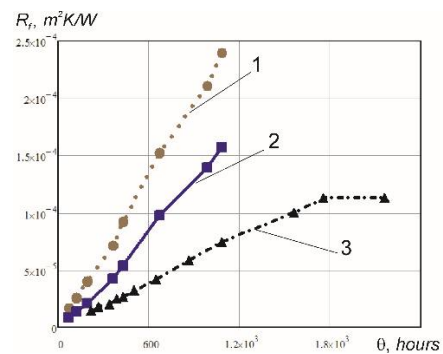


Рисунок 3 – Рассчитанное усредненное термическое сопротивление загрязнения:
1 – $W_2=0.26$ м/с; 2 – $W_2=0.40$ м/с;
3 – $W_2=0.57$ м/с

Сравнение данных для всех экспериментов с общими коэффициентами теплопередачи, рассчитанными по модели, представлено на рис. 2. Расхождения расчетных и экспериментальных значений не превышают $\pm 7\%$. Это подтверждает адекватность модели и ее способность прогнозировать загрязнение ПТО в исследуемом диапазоне скоростей и температур. Рассчитанные средние термические сопротивления представлены на рис. 3. Эти данные иллюстрируют существенное уменьшение термического сопротивления загрязнений с увеличением скорости потока. Однако попытка использовать эти данные для расчета среднего коэффициента теплопередачи U_f^* , используя данные о среднем коэффициенте теплопередачи при отсутствии загрязнений по формуле (15), дает заниженные значения. Это объясняется в результате анализа локального распределения термического сопротивления загрязнений, представленного на рис.1. Термическое сопротивление загрязнений по холодному потоку изменяется от $7 \cdot 10^{-6}$ Вт/(м²·К) на входе до 460 Вт/(м²·К) на выходе, или более чем в 60 раз. Усредненное значение термического сопротивления загрязнений $R_{fm}=171$ Вт/(м²·К), но рассчитанное по среднему общему коэффициенту теплопередачи $R_{fe}=138,6$ Вт/(м²·К), или на 19 % ниже. Это сильно отличается от примера 1 и показывает необходимость расчета по локальным параметрам процесса в случае значительных изменений температуры потоков.

Выводы

Представлена математическая модель ПТО с загрязнением на поверхности теплообмена. Модель учитывает изменение параметров процесса вдоль длины канала и во времени с развитием слоя загрязнений. Это позволяет более точно прогнозировать поведение ПТО, подверженного загрязнению, по сравнению с моделью, основанной на средних параметрах процесса, особенно в условиях, когда температура потока значительно изменяется между входом и выходом ПТО.

Модель загрязнения включает в себя четыре эмпирических параметра (A_m , B_m , E и b), которые могут быть идентифицированы с использованием данных мониторинга тепловых характеристик ПТО, работающих с конкретными загрязняющими средами. С помощью этих параметров модель может быть использована для моделирования тепловых характеристик ПТО, работающих с конкретным теплоносителем, и для анализа влияния на тепловые характеристики ПТО геометрии гофрировки пластин, температурной программы и скорости потока в каналах. Как показывают два приведенных примера, для такого загрязнения, как карбонат кальция и осаждение твердых частиц, только два параметра A_m и b могут быть идентифицированы, а другие два не изменены. Модель предсказывает изменение скорости потока вдоль канала. Это может быть важно для расчета увеличения падения давления в ПТО при росте загрязнения поверхности. Учет этого обстоятельства требует дальнейшего развития и экспериментального подтверждения предложенного метода.

Литература

1. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Хавин Г.Л., Арсеньева О.П. (2004). Пластинчатые теплообменники в промышленности. Харьков: НТУ «ХПИ».
2. Klemeš J.J., Varbanov P.S., Kapustenko P., 2013. New developments in heat integration and intensification, including total site, waste-to-energy, supply chains and fundamental concepts. *Applied Thermal Engineering*, 61, 1–6.
3. Мешалкин В.П., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А. (2006). Основы теории ресурсосберегающих интегрированных химико-технологических систем. Харьков: НТУ" ХПИ".
4. Malayeri M.R., Müller-Steinhagen, H., & Watkinson, A. P., 2017. 11th International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning–2015, Enfield, Republic of Ireland. *Heat Transfer Engineering*, 38 (7–8), 667–668.
5. Klemeš J.J., Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyanskyy L., 2015. Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
6. Crittenden B.D., Yang M., Dong L., Hanson R., Jones J., Kundu K., Klochok E., Arsenyeva O., Kapustenko, P., 2015. Crystallization Fouling With Enhanced Heat Transfer Surfaces. *Heat Transfer Engineering*, 36(7-8), 741–749.
7. Gogenko A.L., Anipko O.B., Arsenyeva O.P., Kapustenko P.O. (2007). Accounting for fouling in plate heat exchanger design. *Chemical Engineering Transactions*, 12, 207–212.
8. Капустенко П.А., Кузин А.К., Макаровский Е.Л., Товажнянский Л.Л., Ульев Л.М., Черная Е.Б. (2004). Альтернативная энергетика и энергосбережение: современное состояние и перспективы. ООО Издательский дом «Вокруг цвета.

9. Kapustenko P., Boldyryev S., Arsenyeva O., Khavin G. (2009). The use of plate heat exchangers to improve energy efficiency in phosphoric acid production. *Journal of Cleaner Production*, 17(10), 951–958.
10. Perevertaylenko O.Y., Gariev A.O., Damartzis T., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Arsenyeva O. P. (2015). Searches of cost effective ways for amine absorption unit design in CO₂ post-combustion capture process. *Energy*, 90, 105–112.
11. Arsenyeva O.P., Čuček L., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Savchenko Y.A., Kusakov S.K., Matsegora O.I. (2016). Utilization of waste heat from exhaust gases of drying process. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 10(1), 131–138.
12. Pääkkönen T.M., Riihimäki M., Simonson C.J., Muurinen E., Keiski R.L., 2015. Modeling CaCO₃ crystallization fouling on a heat exchanger surface—Definition of fouling layer properties and model parameters. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 83, 84–98.
13. Coletti F., Diaz-Bejarano E., Martinez J., Macchietto S. (2015). Heat exchanger design with high shear stress: reducing fouling or throughput. In *International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning-2015*. Enfield (Ireland). 27–33.
14. Arsenyeva O., Tovazhnyanskyy L., Kapustenko P., Khavin G. (2009). Mathematical modelling and optimal design of plate-and-frame heat exchangers. *Chemical Engineering Transactions*, 18, 791–796.
15. Panchal C.B., Knudsen J.G., 1998. Mitigation of Water Fouling Technology Status and Challenges. *Advances in Heat Transfer*, 31; 431–474.
16. Arsenyeva O.P., Crittenden B., Yang M., Kapustenko P.O., 2013. Accounting for the thermal resistance of cooling water fouling in plate heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 61(1), 53–59.
17. Arsenyeva O., Tovazhnyanskyy L., Kapustenko P., Khavin G. (2011). The generalized correlation for friction factor in crisscross flow channels of plate heat exchangers. *Chemical Engineering Transactions*, 25, 399–404.
18. Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyanskyy L., Khavin G., 2013b. The influence of plate corrugations geometry on plate heat exchanger performance in specified process conditions. *Energy*, 57, 201–207.
19. Arsenyeva O.P., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Demirskiy O.V. (2014). Generalised semi-empirical correlation for heat transfer in channels of plate heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 70(2), 1208–1215.
20. Arsenyeva O.P., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Demirskiy O.V., 2012. Heat transfer and friction factor in criss-cross flow channels of plate-and-frame heat exchangers. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 46(6), 634–641.
21. Demirskiy A., Kapustenko P. O., Khavin G. L., Arsenyeva O. P., Matsegora O., Kusakov S., Bocharnikov I., 2016, Investigation of fouling in plate heat exchangers at sugar factory, *Chemical Engineering Transactions*, 52, 583–588.
22. Chernyshov D.V., 2002. Prognosis of scaling in plate water heaters to increase reliability of their work. Thesis for Candidate of Technical Sciences. Tula State University, Tula, Russian.

Bibliography (transliterated)

1. Tovazhnyanskiy L.L., Kapustenko P.A., Havin G.L., Arseneva O.P. (2004). *Plastinchatyie teploobmenniki v promyshlennosti*. Harkov: NTU «HPI».

2. Klemeš J.J., Varbanov P.S., Kapustenko P., 2013. New developments in heat integration and intensification, including total site, waste-to-energy, supply chains and fundamental concepts. *Applied Thermal Engineering*, 61, 1–6.

3. Meshalkin V.P., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.A. (2006). *Osnovy teorii resursosberegayuschih integrirovannyih himiko-tehnologicheskikh sistem*. Harkov: NTU "HPI".

4. Malayeri M.R., Müller-Steinhagen, H., & Watkinson, A. P., 2017. 11th International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning–2015, Enfield, Republic of Ireland. *Heat Transfer Engineering*, 38 (7–8), 667–668.

5. Klemeš J.J., Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyanskyy L., 2015. *Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation*. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.

6. Crittenden B.D., Yang M., Dong L., Hanson R., Jones J., Kundu K., Klochok E., Arsenyeva O., Kapustenko, P., 2015. Crystallization Fouling With Enhanced Heat Transfer Surfaces. *Heat Transfer Engineering*, 36(7-8), 741–749.

7. Gogenko A.L., Anipko O.B., Arsenyeva O.P., Kapustenko P.O. (2007). Accounting for fouling in plate heat exchanger design. *Chemical Engineering Transactions*, 12, 207–212.

8. Kapustenko P.A., Kuzin A.K., Makarovskiy E.L., Tovazhnyanskiy L.L., Ulev L.M., Chernaya E.B. (2004). *Alternativnaya energetika i energosberezhenie: sovremennoe sostoyanie i perspektivy*. OOO Izdatelskiy dom «Vokrug tsveta».

9. Kapustenko P., Boldyryev S., Arsenyeva O., Khavin G. (2009). The use of plate heat exchangers to improve energy efficiency in phosphoric acid production. *Journal of Cleaner Production*, 17(10), 951–958.

10. Perevertaylenko O.Y., Gariev A.O., Damartzis T., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Arsenyeva O. P. (2015). Searches of cost effective ways for amine absorption unit design in CO₂ post-combustion capture process. *Energy*, 90, 105–112.

11. Arsenyeva O.P., Čuček L., Tovazhnyanskyy L.L., Kapustenko P.O., Savchenko Y.A., Kusakov S.K., Matsegora O.I. (2016). Utilization of waste heat from exhaust gases of drying process. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 10(1), 131–138.

12. Pääkkönen T.M., Riihimäki M., Simonson C.J., Muurinen E., Keiski R.L., 2015. Modeling CaCO₃ crystallization fouling on a heat exchanger surface–Definition of fouling layer properties and model parameters. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 83, 84–98.

13. Coletti F., Diaz-Bejarano E., Martinez J., Macchietto S. (2015). Heat exchanger design with high shear stress: reducing fouling or throughput. In *International Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning-2015*. Enfield (Ireland). 27–33.

14. Arsenyeva O., Tovazhnyanskyy L., Kapustenko P., Khavin G. (2009). Mathematical modelling and optimal design of plate-and-frame heat exchangers. *Chemical Engineering Transactions*, 18, 791–796.

15. Panchal C.B., Knudsen J.G., 1998. Mitigation of Water Fouling Technology Status and Challenges. *Advances in Heat Transfer*, 31; 431–474.

16. Arsenyeva O.P., Crittenden B., Yang M., Kapustenko P.O., 2013. Accounting for the thermal resistance of cooling water fouling in plate heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 61(1), 53–59.

17. Arsenyeva O., Tovazhnyanskyy L., Kapustenko P., Khavin G. (2011). The generalized correlation for friction factor in crisscross flow channels of plate heat exchangers. *Chemical Engineering Transactions*, 25, 399–404.

18. Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyansky L., Khavin G., 2013b. The influence of plate corrugations geometry on plate heat exchanger performance in specified process conditions. *Energy*, 57, 201–207.
19. Arsenyeva O.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Demirskiy O.V. (2014). Generalised semi-empirical correlation for heat transfer in channels of plate heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 70(2), 1208–1215.
20. Arsenyeva O.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Demirskiy O.V., 2012. Heat transfer and friction factor in criss-cross flow channels of plate-and-frame heat exchangers. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 46(6), 634–641.
21. Demirskiy A., Kapustenko P. O., Khavin G. L., Arsenyeva O. P., Matsegora O., Kusakov S., Bocharnikov I., 2016, Investigation of fouling in plate heat exchangers at sugar factory, *Chemical Engineering Transactions*, 52, 583–588.
22. Chernyshov D.V., 2002. Prognosis of scaling in plate water heaters to increase reliability of their work. Thesis for Candidate of Technical Sciences. Tula State University, Tula, Russian.

УДК 66.021.4

Мацегора О.І.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ УТВОРЕННЯ ВІДКЛАДНЕННЯ НА ПОВЕРХНІ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ПЛАСТИНЧАТОГО ТЕПЛООБМІННИКА

Представлена математична модель пластинчатого теплообмінника (ПТО) з забрудненням на поверхні теплообміну. Модель враховує зміну параметрів процесу вздовж довжини каналу і в часі з розвитком слою забруднень. Параметри моделі були ідентифіковані з використанням даних моніторингу теплових характеристик ПТО, працюючих в промисловості і комунальному теплозабезпеченні. Модель може бути використана для моделювання теплових характеристик ПТО, працюючих з конкретним теплоносієм, та для аналізу впливу на теплові характеристики ПТО геометрії гофрування пластин, температурної програми і швидкості потоку в каналах.

Matsegora O.

THE MATHEMATICAL MODELLING OF FOULING FORMATION ALONG PHE HEAT TRANSFER SURFACE

The mathematical model of plate heat exchanger (PHE) with fouling deposition on heat transfer surface is presented. The model is accounting for the change of process parameters along the channels length and in time with the development of fouling deposition layer. The model's parameters were identified using data of monitoring the thermal performance of PHEs operating in industry and District Heating. The model can be used to simulate thermal performance of PHEs working with specific media and to analyze the influence of plate's corrugation geometry, temperature program and flow velocity in channels on PHE thermal performance in conditions of fouling.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОДЕРЖАННЯ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБРІВ

Вступ

Важливою проблемою сучасних світових економічних відносин продовжує залишатися продовольча проблема, яка пов'язана із зростанням чисельності населення планети. Одним з варіантів розв'язання проблеми може стати підвищення врожайності на одиницю оброблюваної площі за рахунок використання високоефективних мінеральних добрив.

В останні роки почався випуск нового висококонцентрованого нітроген – фосфорного добрива NPS 10: 40: 5. Дане добриво містить в своєму складі нітроген амонійний, фосфати, сірку, а також додатково збагачене макроелементом кальцію.

Синтезоване мінеральне добриво характеризується високою агрохімічною ефективністю, його внесення в агрохімічної дозі забезпечує підвищення врожайності на 25–30 %. Широкомасштабний випуск даного добрива стримується високою собівартістю продукції, пов'язаною з низькою ефективністю і неможливістю одержання продукції необхідного фракційного складу.

У зв'язку з цим є необхідність в розробці науково обґрунтованих рекомендацій для підвищення енергоефективності технологічної схеми і основного обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Процес гранулоутворення фосфоровмісних мінеральних добрив складається з двох основних стадій – пульпоутворення та гранулювання.

Гранулоутворення являє собою поєднання фізико-хімічних та фізико-механічних процесів, що забезпечує утворення часток певного розміру, форми, структури та фізичних властивостей. Загалом, процес одержання добрив включає наступні технологічні етапи: підготовку сировини; пульпоутворення; гранулювання (агломерація, ламінування, окатування, кристалізація, сушіння, ущільнення, полімеризація і т.д.); сортування (сепарація за розміром частинок) і фрагментація основних фракцій з подальшим виділенням товарного продукту [1].

На зростання гранул на стадії пульпоутворення впливають кристалізаційні і агломераційні процеси. Сам агломераційний процес протікає на стадії гранулювання, але основою для його протікання закладається на взаємодії початкових компонентів. Так вологість пульпи, як джерело агломерації формується з початкової вологості сировини та температурного режиму. В основу кристалізаційного процесу закладені різні умови протікання хімічних реакцій для одержання різних солей: співвідношення вихідних компонентів, температурний режим, інтенсивність змішування та інші.

В процесі гранулювання проявляються майже всі відомі види фізико-механічних та фізико-хімічних зв'язків між частинками [2]. Існують такі сили, діючі на частинки при зростанні та формуванні гранул: капілярні та поверхнево-активні сили на границі розділу твердої і рідкої фаз; адгезійні сили, що виникають в адсорбованих шарах; сили тяжіння між твердими частинками; сили зв'язку, зумовлені утворенням матеріальних містків, що виникають при спіканні.

Відомі способи гранулоутворення [3] в основному забезпечують одержання готового продукту із заданими якісними показниками (гранулометричний склад, міцність

гранул, злежуваність, розсипчастість, пилимість тощо). У разі посилення якісних показників продукту доводиться шукати прийоми і методи вдосконалення відомих процесів гранулювання та розробляти нові, більш ефективні способи.

Існують загальні принципи підходу до вибору ефективних методів гранулоутворення залежно від агрегатного стану та фізичних властивостей вихідних речовин [4].

Однією з основних стадій процесу одержання фосфоровмісних добрив є процес пульпоутворення – розкладання фосфатної сировини сірчаної та фосфорної кислотою з подальшою нейтралізацією аміаком [5].

Одним з важливих параметрів на цій стадії є співвідношення рідкої та твердої фаз. Це співвідношення у краплі залежить від температури, вологості і хімічного складу пульпи. При надлишку рідини на поверхні частинок (причиною може бути велика локальна висока вологість або температура матеріалу) сили поверхневого натягу виявляють більше сил, що забезпечують взаємний рух частинок, при цьому і відбувається їх злипання. При подальшому зникненні рідкої фази в процесі сушіння або охолодження утворюються кристалічні містки, які міцно зв'язують шматочки агломерату між собою. Якщо кристалізації не відбувається, то при досить інтенсивному русі частинок агломерати руйнуються з утворенням вихідних часток. Аналогічний процес відбувається, якщо утворюється недостатня кількість кристалів і зв'язок між частинками агломерату неміцний.

Другою стадією одержання гранульованих фосфоровмісних добрив є процес гранулювання, який відбувається в барабанному грануляторі – сушарці (БГС) при зіткненні пульпи з «завісою», що складається з дрібних частинок готового продукту.

При потраплянні краплі рідини на поверхню відбувається деяке розтікання краплі, повільне її нагрівання і випаровування, в процесі якого плавно знижується температура гранули. Після випаровування розчину утворюється міцний наріст, що збігається за формою з краплею.

З підвищенням температури товщина міцної основи і розміри окремих наростів зменшуються. При співвідношенні розмірів краплі і гранули 1:1 відбувається обтікання гранули розчином для всіх досліджених температур, а надлишкова кількість розчину стікає з гранули [6].

Подальше підвищення температури викликає збільшення на гранулі речовини, яка наростає і утворення пористої поверхні, яка легко очищається.

Слід зазначити, що ці висновки одержані на основі аналізу взаємодії одиничних крапель і гранул. У реальних процесах це взаємодія ускладнене можливістю одночасного контакту гранули з декількома краплями, передачі частини рідини з однієї гранули на інші при їх контакті і терті, обертанні гранул, охолодженні їх агентом, який розпилює. Знання характеру взаємодії крапель і гранул, хоча і допомагає виявити фактори, що впливають на процес, але не дає однозначного пояснення закономірностей росту гранул в рухомому шарі і ускладнює опис інтенсивності тепло- і масообміну в реальному процесі.

Тому в кожному конкретному випадку потрібні або експериментальні дослідження або дослідження методом математичного моделювання, використання якого дасть можливість знайти нові значення технологічних параметрів, що дозволить збільшити вихід основної фракції добрив з вирішенням питань енергозбереження.

Мета роботи

Провести математичне моделювання процесу одержання мінеральних добрив для визначення оптимальних технологічних параметрів.

Основна частина

Математичне моделювання процесу проводилося на базі розробленої раніше математичної моделі [7]. Розробка моделі і математичне моделювання процесу проводилось з використанням теорії нечітких множин [8, 9].

Використання теорії нечітких множин для формалізації залежності коефіцієнта гранулоутворення від формуючих його факторів дає можливість отримати наступні переваги:

- оперувати з нечітко заданими вхідними параметрами (дані параметри можна уявити у вигляді діапазону можливих значень або які неможливо визначити однозначно в силу постійного впливу на них інших факторів); інформаційним забезпеченням побудови моделі шуканої залежності служить набір статистичної інформації, який визначає значення результативного показника – коефіцієнта гранулоутворення, при зміні одного з факторів при одночасній підтримці на постійному рівні інших параметрів;

- використовувати при проведенні математичної формалізації шуканої залежності нечітко заданих критеріїв оцінки відповідності між основними факторами і коефіцієнтом гранулоутворення; дана перевага дозволяє представити математичну модель шуканої взаємозв'язку у вигляді системи нечітко заданих величин, коли визначеного діапазону деякого фактору ставиться у відповідність функція його впливу на результативний ознака – коефіцієнт гранулоутворення;

- моделювати основні закономірності та взаємозв'язки досить складних динамічних систем шляхом їх формалізації на основі використання нечітко заданих величин, що є неможливим з допомогою точних значень вхідних факторів;

- отримати розподіл можливих значень коефіцієнта гранулоутворення в залежності від діапазону можливих значень кожного з факторів формування даного результативного показника, а також провести якісну оцінку як вихідних даних, так і нечітких отриманих результатів моделювання даного процесу.

Були визначені залежності коефіцієнта гранулоутворення (результативний ознака моделі) від розрідження в БГС, діаметра крапель розпилюючої пульпи, температури на виході з апарату БГС, співвідношення оксиду кальцію та сірчаного ангідриду, співвідношення оксиду фосфору та сірчаного ангідриду, а також вологості пульпи (величин факторних ознак).

Математична модель представлялася у вигляді залежностей окремих параметрів на коефіцієнт гранулоутворення із зазначенням діапазонів значень, в межах яких записані рівняння залишаються справедливими.

На базі математичної моделі розроблялись алгоритм і програма розрахунку процесу гранулоутворення мінеральних добрив. Програма була розроблена з використанням пакету прикладних програм MATLAB v 8.7.

В результаті математичного моделювання були отримані наступні залежності (рис. 1–6). Одночасно на відповідних рисунках наведені і результати експериментальних досліджень.

З отриманих результатів (рис. 1–6) видно, що для проведення процесу в оптимальному режимі можна рекомендувати такі технологічні параметри: співвідношення $P_2O_5 / SO_3 = 8,2\text{--}8,4$; співвідношення $CaO / SO_3 = 1,81\text{--}1,91$; вологість пульпи $W = 43,0\text{--}46,0$ % температура сушильного агента на виході з апарату БГС, $T_{вих} = 97,0\text{--}98,5$ °C; розрідження в БГС, $P_{разр} = 0,05\text{--}0,06$ кПа; діаметр крапель розпилюваної пульпи $d_k = 0,10\text{--}0,14$ мм.

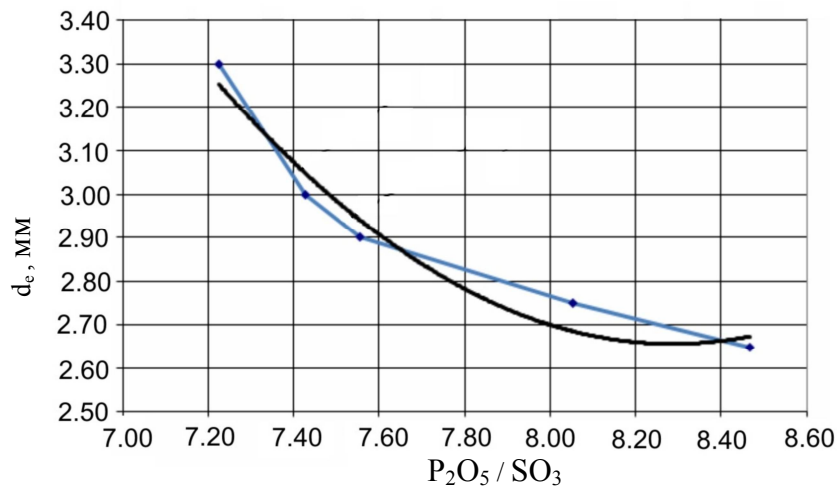


Рисунок 1 – Залежність еквівалентного діаметру гранул від P_2O_5/SO_3

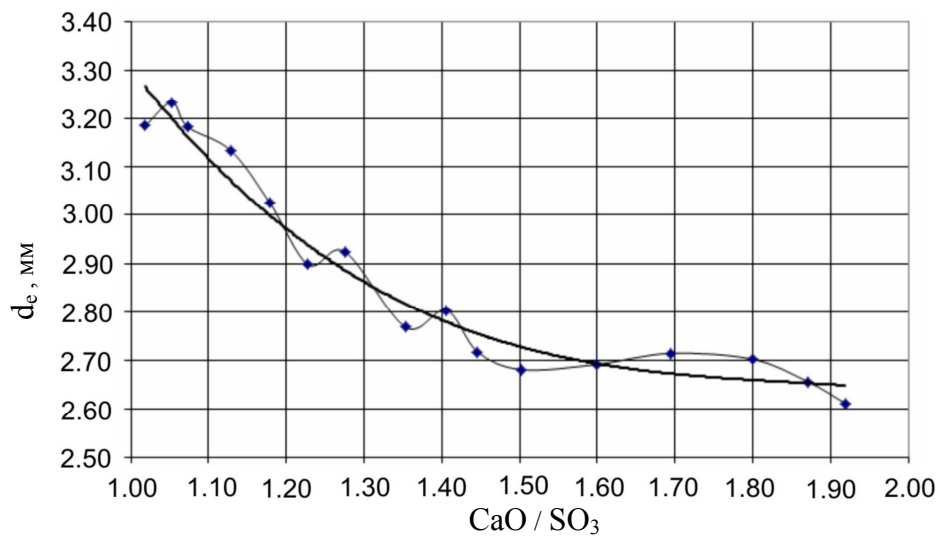


Рисунок 2 – Залежність еквівалентного діаметру гранул від CaO/SO_3

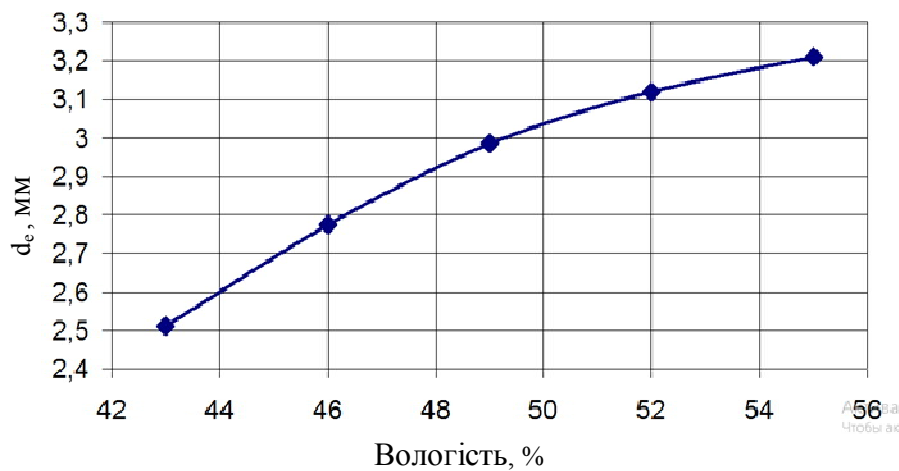


Рисунок 3 – Залежність еквівалентного діаметру гранул від вологості пульпи

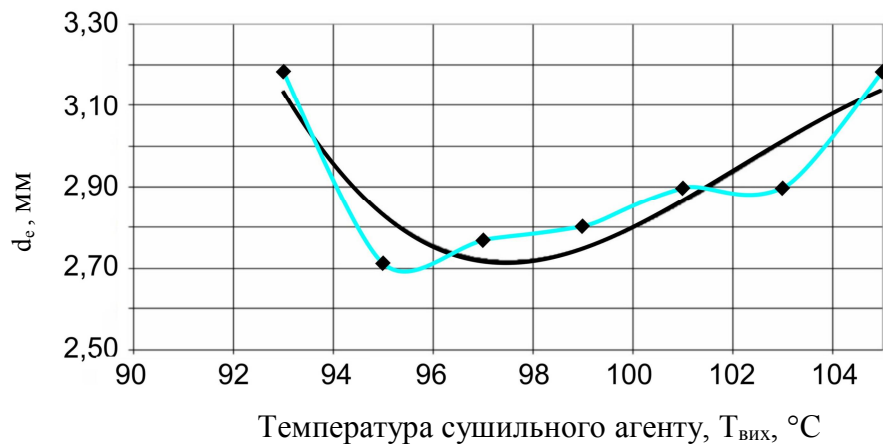


Рисунок 4 – Залежність еквівалентного діаметру гранул від температури сушильного агенту

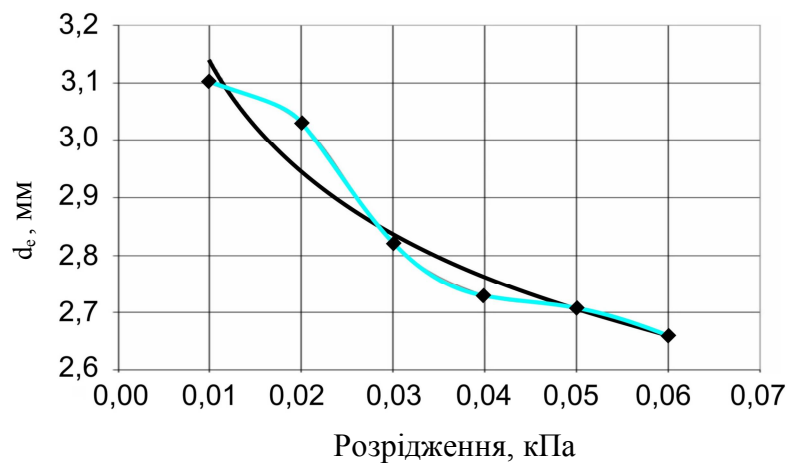


Рисунок 5 – Залежність еквівалентного діаметру гранул від розрідження у БГС

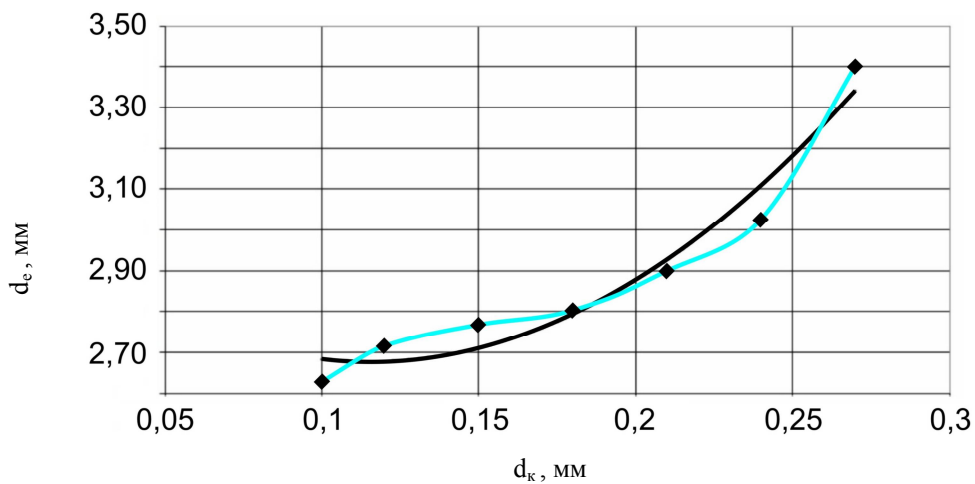


Рисунок 6 – Залежність еквівалентного діаметру гранул від діаметру крапель пульпи

У цьому випадку буде отримано максимальний вихід товарної фракції 1,5–4,0 мм на рівні 97 %. Збільшення виходу основної фракції з 90 % до 97 % дає можливість повніс-

тю виключити стадії класифікації та дроблення, а значить виключити подачу зовнішнього ретур в барабанний гранулятор – сушарку.

Крім того, звівши до мінімуму вміст дрібної фракції ми мінімізуємо кількість пилу в процесі і відповідно зменшуємо навантаження на систему пилогазоочищення, тим самим вирішуючи питання екологічної безпеки виробництва.

Висновки

Розроблено програму розрахунку процесу одержання мінеральних добрив. Наведено результати математичного моделювання даного процесу.

Розрахунки показали, що можна збільшити продуктивність установки на 30 %, підвищити енергоефективність за рахунок виключення систем класифікації, подрібнення і транспортування зовнішнього ретур на 15 %.

Література

1. Вилесов Н.Г. Процессы гранулирования в промышленности. / Н.Г. Вилесов. – К.: Техника, 1976. – 192 с.
2. Казакова Е.А. Гранулирование и охлаждение азотсодержащих удобрений / Е.А. Казакова. – М.: Химия, 1980. – 288 с.
3. Классен П.В. Гранулирование / П.В. Классен, И.Г. Гришаев, И.И. Шомин – М.: Химия, 1991. – 240 с.
4. Корнієнко Я.М. Виробництво гранульованих азотно-фосфорних добрив // Екотехнології та ресурсозбереження. – 2001. – № 3. – С. 35–39.
5. Дудка С.В. Исследование процесса пульпообразования в технологии гранулирования фосфоросодержащих удобрений марки «Суперагро NPS 10:40:5» / С.В. Дудка, В.И. Тошинский, Р.Н. Клименко // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків: НТУ «ХПІ», 2012. – № 3. – С. 97–104.
6. Подгорный Н.В. Управление качеством гранулирования минеральных удобрений / Н.В. Подгорный, Я.Н. Корниенко, А.Н. Сильвестров – К.: Такі справи. – 1998. – 200 с.
7. Дудка С.В. Розробка математичної моделі і програмного забезпечення процесу гранулоутворення мінеральних добрив / С.В. Дудка, М.О. Подустов, О.М. Дзевочко, І.М. Рищенко, С.І. Кушинський // Інтегровані технології та енергозбереження, – Харків: НТУ «ХПІ». – 2015. – № 1. – С. 37–41.
8. Раскин Л.Г. Нечеткая математика / Л.Г. Раскин, О.В. Серая / – Харьков: Парус, 2008. – 352 с.
9. Рыбин В.В. Основы теории нечетких множеств и нечеткой логики / В.В. Рыбин – М.: МАИ, 2007. – 96 с.

Bibliography (transliterated)

1. Vilesov N.H. Protsessy hranulirovaniia v promyshlennosti. / N.H. Vilesov. – K.: Tekhnika, 1976. – 192 p.
2. Kazakova E.A. Hranulyrovanie i okhlazhdenie azotsoderzhashchykh udobreni / E.A. Kazakova. – M.: Khimia, 1980. – 288 p.
3. Klassen P.V. Hranulyrovanie / P.V. Klassen, Y.H. Hryshaev, Y.Y. Shomyn – M.: Khymia, 1991. – 240 p.
4. Korniienko Ia.M. Vyrobnyststvo hranulovanykh azotno-fosfornykh dobryv // Eko-tekhnologii ta resursozberezhennia. – 2001. – № 3. – P. 35–39.

5. Dudka S.V. Yssledovanie protsessa pulpoobrazovania v tekhnologii hranulyrovaniia fosforosoderzhashchykh udobrenii marky «Superahro NPS 10:40:5» / S.V. Dudka, V.Y. Tishynskii, R.N. Klymenko // *Intehrovani tekhnologii ta enerhozberezhennia*. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2012. – № 3. – P. 97–104.

6. Podhornyi N.V. Upravlenie kachestvom hranulyrovania myneralnykh udobrenii / N.V. Podhornyi, Ia.N. Kornienko, A.N. Silvestrov – K.: Taki spravy. – 1998. – 200 p.

7. Dudka S.V. Rozrobka matematychnoi modeli i prohramnoho zabezpechennia protsesu hranuloutvorennia mineralnykh dobryv / S.V. Dudka, M.O. Podustov, O.M. Dzevochko, I.M. Ryshchenko, S.I. Kushynskiy // *Intehrovani tekhnologii ta enerhozberezhennia*, – Kharkiv: NTU «KhPI». – 2015. – № 1. – P. 37–41.

8. Raskin L.H. Nechetkaia matematika / L.H. Raskin, O.V. Seraia / – Kharkov: Parus, 2008. – 352 p.

9. Rybin V.V. Osnovy teorii nechetkikh mnozhestv y nechetkoi lohiki / V.V. Rybin – M.: MAI, 2007. – 96 p.

УДК 661.152.32

Подустов М.А., Дзевочко А.М., Дудка С.В.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ

Разработано программное обеспечение для расчета процесса получения минеральных удобрений с использованием пакета прикладных программ MATLAB. Приведены результаты математического моделирования данного процесса.

Podustov M.O., Dzevochko O.M., Dudka S.V.

MATHEMATICAL MODELING OF THE PROCESS OF PRODUCING MINERAL FERTILIZERS

A software has been developed for calculating the process of obtaining mineral fertilizers using the MATLAB software package. The results of mathematical modeling of this process are presented.

УДК 681.51:621.575:661.53

Бабіченко А.К., Подустов М.О., Кравченко Я.О., Лисаченко І.Г., Дзевочко О.М.,
Деменкова С.Д.

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПРОЦЕСУ ТЕПЛООБМІНУ У ВИПАРНИКАХ БЛОКУ ВТОРИННОЇ КОНДЕНСАЦІЇ ВИРОБНИЦТВ АМІАКУ

Вступ. Сучасні агрегати синтезу аміаку характеризуються широким застосуванням апаратів з повітряним і водяним охолодженням. Таке апаратне оформлення при зміні температури атмосферного повітря сприяє роботі технологічних об'єктів в умовах невизначеності. При цьому деякі з цих невизначеностей можна розрахувати чисельно. До такого класу об'єктів відноситься і блок вторинної конденсації. Основними апаратами цього блоку, де власне і відбувається остаточне вилучення продукційного аміаку з циркуляційного газу (ЦГ) за рахунок охолодження, є випарники. Робота цих випарників внаслідок застосування на стадії первинної конденсації повітряного охолодження здійснюється під впливом постійних збурень, що призводить до зміни на вході випарників температури ЦГ і концентрації аміаку у ЦГ відповідно в діапазоні $35\div 45$ °С і $9\div 12$ % об. Попередніми дослідженнями з використанням системного підходу було синтезоване апаратно-технологічне оформлення, що забезпечує охолодження ЦГ у випарниках тільки за рахунок водоаміачних абсорбційно-холодильних установок (АХУ) [1]. Однак функціонування самих АХУ також відбувається в умовах невизначеності внаслідок застосування повітряних конденсаторів та абсорберів з водяним охолодженням, що призводить до зміни температурного режиму охолодження ЦГ в діапазоні від -8 до 5 °С. Підвищення ж цієї температури навіть на 1 °С згідно існуючих досліджень [2] знижує енергоефективність агрегату синтезу в цілому за рахунок збільшення річних витрат природного газу і глибоко знесоленої води у додатковий паровий котел на $307,3$ тис м^3 / рік для отримання водяної пари високого тиску ($10,5$ МПа), що забезпечує привод відцентрового компресора стиску ЦГ і свіжої азотно-водневої суміші. Тому мінімізація температурного режиму охолодження ЦГ у випарниках в умовах невизначеності (зміни зовнішнього теплового навантаження) за рахунок створення високоякісної системи автоматичного управління набуває особливої актуальності у загальному процесі підвищення енергоефективності виробництва аміаку. При цьому для належного функціонування такої системи необхідна математична модель для корекції оптимальної траєкторії системи та для корекції параметрів моделі, тобто її ідентифікації в умовах існуючих невизначеностей. Найбільша невизначеність пов'язана з коефіцієнтом теплопередачі, величина якого, згідно існуючих досліджень [1] залежить суттєво від конденсаційного термічного опору. Чисельне значення цього опору постійно змінюється внаслідок коливань температури первинної конденсації, а отже і концентрації аміаку у ЦГ. Недооцінка величини конденсаційного опору обумовлює, як показує практика, прорахунки у розрахунках коефіцієнта теплопередачі більше ніж на 50 % [1,3].

Мета роботи. Дослідження ефективності процесів теплообміну у випарниках блоку вторинної конденсації та створення алгоритмічного і програмного забезпечення

для автоматизованої системи ідентифікації в умовах існуючої невизначеності коефіцієнта теплопередачі.

Методика проведення досліджень. Дослідження виконувались в промислових умовах із застосуванням широко відомого методу пасивного реєстраційного експерименту. Збір інформації про параметри здійснювався за допомогою засобів контролю інформаційно-керуючого комплексу TDC-3000 центрального пункту управління та лабораторних аналізів.

За допомогою лабораторних аналізів визначався вміст аміаку у ЦГ за стандартною методикою [4]. Кількісний склад відібраних проб ЦГ на вміст в них метану, аргону, водню і азоту визначався за допомогою хроматографу «Цвет-102». Відбір проб для лабораторних аналізів відбувався один раз за зміну, тому період збору усіх інших даних по роботі випарника складав 8 годин. В ході пасивного експерименту якість отриманої інформації оцінювалась за загально відомим алгоритмом [5]. Остаточне формування виборки здійснювалось після оцінки збіжності теплового балансу випарника з метою вилучення динамічних режимів.

Ефективність процесу теплообміну в промислових умовах оцінювалась коефіцієнтом теплопередачі K_E ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$), який визначався за рівняннями [6]:

$$K_E = \Phi_O / F \cdot \Delta \Theta_{CP}; \quad (1)$$

$$\Phi_O = M_G \cdot C_G^{CP} \cdot (\Theta_{Ц}^{BX} - \Theta_{Ц}^{BIX}) + M_{KC} \cdot C_K^{CP} \cdot (\Theta_{Ц}^{BX} - \Theta_{Ц}^{BIX}) + M_K \cdot r^{CP} + M_{П} \cdot C_{П}^{CP} \cdot (\Theta_{Ц}^{BX} - \Theta_{Ц}^{BIX}); \quad (2)$$

$$M_K = 0,771 \cdot V_{Ц} \cdot (a_{NH_3}^{BX} - a_{NH_3}^{BIX}), \quad (3)$$

де Φ_O – холодопродуктивність, Вт; $F = 520 \text{ м}^2$ – поверхня теплопередачі випарника; Θ_{CP} – середньологарифмічна різниця температур, $^{\circ}\text{C}$; M_G , M_{KC} , M_K , $M_{П}$ – масова витрата відповідно газової фази ЦГ, середня аміачного конденсату, сконденсованого аміаку та парової фази аміаку у ЦГ, кг/с; C_G^{CP} , C_K^{CP} , $C_{П}^{CP}$ – середні питомі теплоємності відповідно газової фази ЦГ, аміачного конденсату та пари аміаку, $\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; r^{CP} – теплота конденсації аміаку середня, $\text{кДж}/\text{кг}$; $\Theta_{Ц}^{BX}$, $\Theta_{Ц}^{BIX}$ – температура ЦГ відповідно на вході та виході випарника, $^{\circ}\text{C}$; $V_{Ц}$ – об'ємна витрата ЦГ, $\text{нм}^3/\text{с}$.

Для оцінки розбіжності між проектними та реальними показниками ефективності теплообміну визначався загальний термічний опір R_T^E ($\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$) за формулою:

$$R_T^E = 1/K_E - [1/\alpha_{MTP} + 1/\alpha_{TP}]. \quad (4)$$

При цьому величина коефіцієнтів тепловіддачі з боку циркуляційного газу (трубний простір) α_{TP} та киплячого аміаку (міжтрубний простір) α_{MTP} визначалась за загально відомими рівняннями Краусольда і Купріянової, прийнятими при проектуванні. Основні рівняння для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі мають вигляд:

$$\alpha_{TP} = A \cdot W_{TP}^{0,8} \cdot d_{BH}^{-0,2}; \quad (5)$$

$$\alpha_{MTP} = 2,2 \cdot q_F^{0,7} \cdot P_{MTP}^{0,21}; \quad (6)$$

$$A = 16,28 \cdot (\lambda_{\text{ц}}/\mu_{\text{ц}}^{0,8}) \cdot (Pr/0,73)^{0,4}, \quad (7)$$

де $W_{\text{ТР}}$ – вагова швидкість ЦГ на одиницю поверхні у трубному просторі, $\text{кг}/\text{м}^2 \cdot \text{с}$; $d_{\text{ВН}}$ – внутрішній діаметр труб, м; q_F – питомий тепловий потік, $\text{Вт}/\text{м}^2$; $\lambda_{\text{ц}}$ – теплопровідність ЦГ, $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$; $\mu_{\text{ц}}$ – динамічна в'язкість ЦГ, $\text{Па} \cdot \text{с}$; Pr – критерій Прандтля.

Результати досліджень та їх обговорення. За даними експериментальних досліджень була сформована вибірка по 12 режимам роботи випарника, окремі з яких представлені в табл. 1.

Таблиця 1 – Експериментальні дані по режимам роботи випарника при підключенні до схеми двох АХУ

№ режиму	Трубний простір									Міжтрубний простір					
	Витрата ЦГ $V_{\text{ц}} \cdot 10^{-3}$, $\text{м}^3/\text{год}$	Тиск ЦГ $P_{\text{ц}}$, МПа	Температура ЦГ, $^{\circ}\text{C}$		Склад ЦГ a_i , % об.					Тиск кипіння холодоагенту $P_{\text{МТР}}$, МПа	Температура кипіння холодоагенту $\Theta_{\text{МТР}}$, $^{\circ}\text{C}$	Концентрація холодоагенту на вході $\xi_{\text{Х}}$, $\text{кг}/\text{кг}$	Витрата флегми $M_{\text{ф}}$, т/год	Витрата холодоагенту на вході $M_{\text{Х}}^{\text{ВХ}}$, т/год	Температура рідкого холодоагенту на вході $\Theta_{\text{Х}}^{\text{ВХ}}$, $^{\circ}\text{C}$
			на вході $\Theta_{\text{ц}}^{\text{ВХ}}$	на виході $\Theta_{\text{ц}}^{\text{ВІХ}}$	водень	азот	метан	аргон	аміак						
1	316,2	23,0	23	-1	56,0	18,9	8,3	6,9	9,9	0,25	-8	0,991	1,158	19,174	28
2	321,7	23,0	15	-8	55,6	19,2	8,7	6,7	9,8	0,17	-15	0,993	0,541	16,885	29
3	315,5	22,7	18	-6	56,8	17,6	8,8	6,8	10,0	0,20	-13	0,995	0,465	17,507	27
4	319,6	24,2	16	-5	55,7	18,9	8,4	6,9	10,1	0,19	-13	0,989	0,902	15,995	26
5*	311,7	23,5	13	-3	57,2	19,0	8,0	6,9	8,9	0,20	-8	0,997	0,102	10,878	20
6*	320,0	23,8	18	-4	56,2	19,5	7,7	6,8	9,8	0,25	-2	0,996	0,142	10,410	25
7	317,4	23,0	18	-6	56,2	20,0	8,4	7,3	8,1	0,20	-12	0,995	0,937	17,313	27

Примітка: * в роботі знаходилась одна АХУ

В табл. 2 наведені результати розрахунків згідно рівнянь (1–7), номери режимів в якій відповідають номерам в табл. 1.

Як видно з табл. 2, коефіцієнт теплопередачі в реальних умовах K_E в середньому майже в 1,8 рази менше коефіцієнту $K_{\text{П}} = 1130,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, розрахованого за рівняннями (5–7) закладеними при проектуванні та прийнятого загального коефіцієнту термічного опору $R_{\text{Т}}^{\text{П}}$ на рівні $0,000356 (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$. Така невідповідність, як і у випадку з конденсаційною колоною [7], може бути обумовлена наявністю додаткового конденсаційного термічного опору. Отримані розрахункові показники табл. 2 доводять, що між загальним коефіцієнтом $R_{\text{Т}}^{\text{Е}}$ термічного опору і середньою витратою аміачного конденсату $M_{\text{КС}}$ існує не випадкова залежність, яка наведена на рис. 1.

Таблиця 2 – Експериментальні показники ефективності теплообміну випарника АХУ

№ режиму	Питомий тепловий потік q_F , кВт/м ²	Середня витрата аміачного конденсату $M_{КС}$, т/год	Коефіцієнт тепловіддачі з боку міжтрубного простору $\alpha_{мтр}$, Вт/(м ² ·К)	Коефіцієнт тепловіддачі з боку трубного простору $\alpha_{тр}$, Вт/(м ² ·К)	Загальний термічний опір $R_T^E \cdot 10^4$, м ² ·К/Вт	Коефіцієнт теплопередачі K_E , Вт/(м ² ·К)	Середньогарифмічна різниця температур $\Delta\Theta_{ср}$, °С
1	10,64	16,78	1581,6	3889,6	6,6236	660,4	16,12
2	9,65	18,54	1360,5	3932,1	6,4841	610,1	15,81
3	10,08	17,66	1453,2	3779,7	6,4540	625,7	16,12
4	8,84	19,11	1310,3	3917,3	8,2631	541,6	16,31
5*	6,52	15,82	1069,3	3783,9	5,1315	584,2	11,14
6*	6,22	17,37	1085,3	3915,8	6,9836	533,2	11,66
7	10,05	13,21	1448,8	3929,7	5,3671	673,8	14,91

Примітка: * в роботі знаходилась одна АХУ

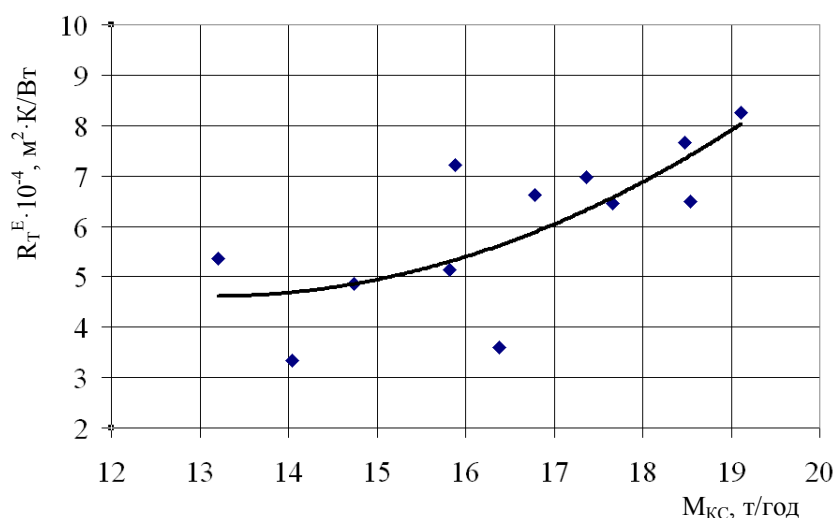


Рисунок 1 – Залежність загального коефіцієнту термічного опору R_T^E від середньої кількості аміачного конденсату $M_{КС}$

На підставі проведення кореляційного і регресійного аналізу з використанням пакету програми Statistica було встановлено апроксимуюче рівняння:

$$R_T^E = (0,0956 \cdot M_{КС}^2 - 2,5111 \cdot M_{КС} + 21,081) \cdot 10^{-4}. \quad (8)$$

Коефіцієнт регресії для рівняння (8) склав 0,74, а середньоквадратичне відхилення розрахункових значень відносно експериментальних складає $1,5 \cdot 10^{-4}$ м²·К/Вт.

При цьому похибка апроксимації не перевищує 14 %. Такий підхід дозволяє періодично за наведеною вище методикою вносити корективи у загальний термічний опір R_T , тобто ідентифікувати процес теплообміну в цілому.

Остаточна перевірка на можливість застосування запропонованого алгоритму ідентифікації здійснювалась шляхом розв'язання рівнянь математичної моделі, опис невизначеностей в якій обумовлений також низкою припущень. Серед них можна виділити наступні: насиченість пари аміаку в усьому об'ємі міжтрубного простору, теплота гідрравлічних втрат зневажливо мала, рівномірний розподіл концентрації аміаку в об'ємі киплячої рідини, відсутність утворення в об'ємі міжтрубного простору випарника області не киплячої рідини, середньологарифмічний розподіл температури ЦГ. За таких невизначеностей математичний опис випарника утворюють загально відомі рівняння матеріального і енергетичного балансу та теплообміну, основні з яких мають наступний вигляд:

$$\Phi_O = M_\Phi \cdot i_\Phi + M_{y^{BIX}} \cdot i_{y^{BIX}} - M_X^{BX} \cdot i_X^{BX}, \quad (9)$$

$$M_X^{BX} \cdot \xi_X^{BX} = M_\Phi \cdot \xi_\Phi + M_{y^{BIX}} \cdot \xi_{y^{BIX}}, \quad (10)$$

$$M_X^{BX} = M_\Phi + M_{y^{BIX}}, \quad (11)$$

$$\Phi_{MTP} = \alpha_{MTP} \cdot F_{MTP} \cdot (\Theta_{MTP}^{CT} - \Theta_{MTP}); \quad (12)$$

$$\Phi_{TP} = \alpha_{TP} \cdot F_{TP} \cdot (\Theta_{\Pi}^{CP} - \Theta_{\Pi}^{CT}); \quad (13)$$

$$\Phi_{CT} = F_{CT}^{CP} \cdot (\Theta_{\Pi}^{CT} - \Theta_{MTP}^{CT}) / R_T^E; \quad (14)$$

$$\Theta_{\Pi}^{CP} - \Theta_{MTP} = ((\Theta_{\Pi}^{BX} - \Theta_{MTP}) - (\Theta_{\Pi}^{BIX} - \Theta_{MTP})) / (\ln[(\Theta_{\Pi}^{BX} - \Theta_{MTP}) / (\Theta_{\Pi}^{BIX} - \Theta_{MTP})]), \quad (15)$$

де M_Φ , $M_{y^{BIX}}$, M_X^{BX} – масова витрата відповідно флегми, пари аміаку на виході та рідкого холодоагенту на вході, кг/с; i_Φ , $i_{y^{BIX}}$, i_X^{BX} – ентальпія відповідно флегми, пари аміаку на виході та рідкого холодоагенту на вході, кДж/кг; ξ_Φ , $\xi_{y^{BIX}}$, ξ_X^{BX} – вагова концентрація відповідно флегми, пари аміаку на виході та рідкого холодоагенту на вході, кг/кг; Φ_{CT} , Φ_{MTP} , Φ_{TP} – теплові потоки відповідно крізь стінку труб, з боку міжтрубного і трубного простору, Вт; F_{CT}^{CP} , F_{MTP} , F_{TP} – поверхня відповідно середня стінки, міжтрубного і трубного простору, м²; Θ_{Π}^{CP} , Θ_{Π}^{CT} , Θ_{MTP} , Θ_{MTP}^{CT} – температура відповідно середня ЦГ та стінки з боку трубного простору, киплячого холодоагенту та стінки з боку міжтрубного простору, °С.

Наведені рівняння (1–15) разом з формулами для розрахунку теплофізичних властивостей речовин і рівноважних залежностей складають повну математичну модель випарника. Можливість застосування цієї моделі для розв'язання задачі параметричної ідентифікації за перелічених вище невизначеностей здійснювалась шляхом перевірки моделі на адекватність реальному процесу теплообміну. В табл.3 представлені окремі результати розрахунку цільових показників роботи випарника у відповідності з розробленим алгоритмом ідентифікації, у якому згідно проведених досліджень можна виділити три основних етапи: формування виборки шляхом оцінки якості отриманої інформа-

ції; розрахунок значень величин Φ_0 , M_K , M_{KS} , α_{MTP} , α_{TP} , $\Delta\Theta_{CP}$, K_E , R_T^E за отриманими експериментальними даними та визначення функціональної залежності $R_T^E = f(M_{KS})$; розрахунок цільових показників ефективності роботи випарника (коефіцієнт теплопередачі, температура ЦГ на виході, температура кипіння холодоагенту, холодопродуктивність) та визначення похибки розрахунків за моделлю у порівнянні з експериментальними даними.

Програмне забезпечення за виведеним алгоритмом ідентифікації реалізоване в пакеті MATLAB, за якого на третьому етапі початкове завдання наближення визначалось за умови $\Theta_{Ц}^{BIX} \leq \Theta_{Ц}^{BX} - 5$, величина похибки розрахунку оцінювалась за збіжністю теплового балансу і приймалась на рівні 0,2 %. Значення кроку наближення $\Delta\Theta_{Ц}^{BIX}$ з достатньою точністю для практичних розрахунків обиралась на рівні 0,2 °C. Порівняння наведених у табл.1 і табл.2 експериментальних даних та отриманих у табл. 3 за математичною моделлю свідчить, що похибка обчислень не перевищує похибки апроксимації R_T^E за рівнянням (8). Така збіжність дозволяє зробити висновок про можливість застосування моделі для побудови адаптивної системи програмного управління для мінімізації температурного режиму роботи випарника.

Таблиця 3 – Розрахункові показники режимів роботи випарника (номери режимів відповідають номерам табл. 1 і 2)

№ режиму	Холодопродуктивність Φ_0 , МВт	Коефіцієнт теплопередачі K , Вт/(м ² ·К)	Температура кипіння холодоагенту Θ_{MTP} , °C	Температура ЦГ на виході $\Theta_{Ц}^{BIX}$, °C	Витрата пари холодоагенту на виході $M_{у-вих}$, т/год
1	5,54	643,7	-10,1	-1,3	18,01
2	5,02	575,3	-16,5	-7,5	16,34
3	5,27	594,9	-14,0	-5,8	17,04
4	4,6	554,8	-14,4	-4,9	15,05
5	3,36	553,8	-8,2	-2,7	10,77
6	3,24	534,9	-3,9	-2,1	10,27
7	5,24	703,4	-12,6	-6,1	16,91

Ідентифікатор такої системи для чисельного розрахунку невизначеності, яка пов'язана зі зміною коефіцієнта теплопередачі, наведено на рис. 2 у вигляді структурної схеми. Відзначимо, що збір даних для обчислення моделі здійснюється за допомогою апаратно-програмних засобів. По-перше, це використання модуля введення аналогових сигналів, наприклад, модуля серії I-7000 виробництва компанії ICP DAS (Тайвань). Модулі цієї серії забезпечують перетворення аналогових сигналів у цифровий вигляд та передавання до ПК по послідовному інтерфейсу RS-485 за протоколом Mod-Bus. По-друге, в системі збору даних використано програмний метод доступу до даних в модулі, а саме OPC-сервер, який вбудований в пакет MATLAB. Всі розрахунки математичної моделі виконуються в даному середовищі. На цей час такий підхід вирішує задачу контролю та моніторингу. В подальшому передбачається доповнення цієї структури зворотним зв'язком, тобто реалізацією функції керування технологічним процесом охолодження ЦГ з урахуванням обчислених параметрів моделі для переналаштування регуляторів на базі контролерів вільного програмування.

Слід відзначити, що похибка усунення невизначеності для K_E може бути значно знижена за умови зниження діапазону параметрів стану об'єкта, тобто за рахунок збільшення частоти опитування датчиків. У зв'язку з цим забезпечення функціонування ідентифікатора вимагає визначення періоду опитування інформаційної системи. Однак за відсутності автоматичного контролю складу ЦГ і особливо концентрації аміаку у ЦГ цей період визначається лише умовами виконання лабораторних аналізів. Тому подальші дослідження мають бути спрямовані на подолання цього недоліку.

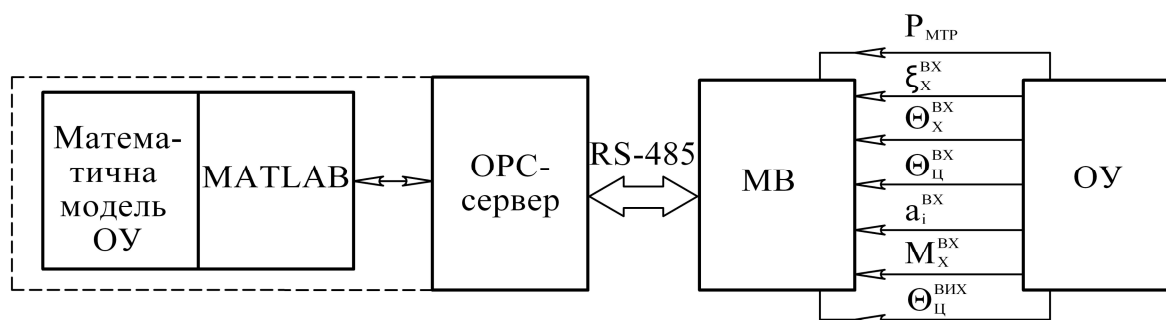


Рисунок 2 – Узагальнена структурна схема ідентифікатора:
ОУ – об'єкт управління (випарник); МВ – модуль вводу інформаційних сигналів

Висновки. Проведено аналіз умов функціонування блоку вторинної конденсації, зокрема, випарників. За результатами цього аналізу обґрунтована необхідність створення високоякісної системи автоматичного управління для розв'язання задачі мінімізації температурного режиму охолодження циркуляційного газу, належне функціонування якої вимагає побудови автоматизованої системи оперативного отримання математичної моделі та ідентифікації в умовах існуючих невизначеностей, що впливають на випарники. Показано, що найбільша невизначеність обумовлена коефіцієнтом теплопередачі. Розроблено алгоритмічне і програмне забезпечення ідентифікатора автоматизованої системи для чисельної оцінки цієї невизначеності. Обґрунтована необхідність скорочення періоду опитування датчиків інформаційної системи ідентифікатора з метою зниження похибки у визначенні коефіцієнта теплопередачі, що може бути забезпечено за рахунок автоматизованої оперативної системи ідентифікації невизначеності, обумовленої зміною теплового навантаження випарників по циркуляційному газу.

Література

1. Babichenko A. System analysis of the secondary condensation unit in the context of improving energy efficiency of ammonia production [Text] / A. Babichenko, V. Velma, J. Babichenko, Y. Kravchenko, I. Krasnikov // Eastern-European Journal of Enterprise technologies. – 2017. – Vol. 2/6 (86). – P. 18–26. doi 10.15187/1729-4061.2017.96464.
2. Бабіченко А.К. Застосування математичного моделювання для діагностики показників ефективності процесів тепло- і масообміну в абсорберах тепловикористовуючих холодильних установок агрегатів синтезу аміаку [Текст] / А.К. Бабіченко, В.І. Тошинський // Вопросы химии и химической технологии. – 2009. – № 6. – С. 107–111.

3. Сучасні методи автоматизації технологічних об'єктів [Текст] / А.П. Ладанюк, О.А. Ладанюк, Р.О. Бойко та ін. – К.: Інтегр. Логістик Україна, 2015. – 408 с.
4. Аналитический контроль производства в азотной промышленности. – М.: Госхимиздат, 1958. – Вып.7. – 115 с.
5. Грубов В.И. Математическое моделирование непрерывных технологических процессов [текст] / В.И. Грубов. – К.: Киевский университет, 1971. – 170 с.
6. Ефимов В.Т. Повышение эффективности абсорбционных холодильных установок в агрегате синтеза аммиака большой мощности [текст] / В.Т.Ефимов, С.А.Ерошников, А.К.Бабиченко // Холодильная техника. – М.: Пищевая промышленность. – 1979. – №2. – С. 23–26.
7. Бабиченко А.К. Исследование эффективности процессов теплообмена конденсационной колонны крупнотоннажных агрегатов синтеза аммиака [текст] / А.К. Бабиченко, Я.О. Кравченко, Ю.А. Бабиченко, И.Л. Красников // Інтегровані технології та енергозбереження. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2016. – №2. – С. 3–9.

Bibliography (transliterated)

1. Babichenko A. System analysis of the secondary condensation unit in the context of improving energy efficiency of ammonia production [Text] / A. Babichenko, V. Velma, J. Babichenko, Y. Kravchenko, I. Krasnikov // Eastern–European Journal of Enterprise technologies. – 2017. – Vol. 2/6 (86). – P. 18–26. doi 10.15187/1729-4061.2017.96464.
2. Babichenko A.K. Zastosuvannja matematychnogho modeljuvannja dlja diaghnostyky pokaznykiv efektyvnosti procesiv teplo- i masoobminu v absorberakh teplovykorystovujuchykh kholodyl'nykh ustanovok aghreghativ syntezu amiaku [tekst] / A.K. Babichenko, V.I. Toshynskyj // Voprosy khimii i khimicheskoy tekhnologii. – K.: «Vishcha shkola», 2009. – Vyp. 6. – P. 107–111.
3. Ladanjuk A.P. Suchasni metody avtomatyzaciji tekhnologichnykh ob'ektiv [tekst] / A.P. Ladanjuk, O.A. Ladanjuk, R.O. Bojko, V.V. Vashhuk, D.O. Kronikovskij, D.A. Shumyghaj. – K.: Integhr. Loghistik Ukrajina, 2015. – 408 p.
4. Analiticheskij kontrol proizvodstva v azotnoy promyshlennosti. – M.: Goshimizdat, 1958. – Vyip.7. – 115 p.
5. Grubov V.I. Matematicheskoe modelirovanie nepreryvnykh tekhnologicheskikh protsessov [tekst] / V.I. Grubov. – K.: Kievskii universitet, 1971. – 170 p.
6. Efimov V.T. Povyshenie effektivnosti absorbtionnykh kholodil'nykh ustanovok v agregate sinteza ammiaka bol'shoi moshchnosti [tekst] / V.T. Efimov, S.A. Eroshchenkov, A.K. Babichenko // Kholodil'naya tekhnika. – M.: Pishchevaya promyshlennost'. – 1979. – №2. – P. 23–26.
7. Babichenko A.K. Issledovanie effektivnosti protsessov teploobmena kondensatsionnoy kolonny krupnotonnazhnykh agregatov sinteza ammiaka [tekst] / A.K. Babichenko, Y.O. Kravchenko, J.A. Babichenko, I.L. Krasnikov // Інтегровані технології та енергозбереження. – Kh.: NTU «KhPI». – 2016. – №2. – P. 3–8.

УДК 681.51:621.575:661.53

Бабиченко А.К., Подустов М.А., Кравченко Я.О., Лысаченко И.Г., Дзевочко А.М.,
Деменкова С.Д.

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА
ТЕПЛООБМЕНА В ИСПАРИТЕЛЯХ БЛОКА ВТОРИЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ
ПРОИЗВОДСТВ АММИАКА**

В статье приведены результаты анализа функционирования испарителей блока вторичной конденсации. Обоснована необходимость создания высококачественной системы автоматического управления для решения задачи минимизации температурного режима охлаждения циркуляционного газа. Установлено, что наибольшая неопределенность обусловлена коэффициентом теплопередачи. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение идентификатора автоматизированной системы для численной оценки этой неопределенности. Обоснована необходимость сокращения периода опроса датчиков информационной системы идентификатора с целью снижения погрешности в определении коэффициента теплопередачи.

Babichenko A.K., Podustov M.O., Kravchenko Y.O., Lysachenko I.G., Dzevochko O.M.,
Demenkova S.D.

**AUTOMATED SYSTEM OF IDENTIFICATION OF THE HEAT EXCHANGE
PROCESS IN THE EVAPORATORS OF THE BLOCK OF SECONDARY
CONDENSATION OF AMMONIA PRODUCTION**

The article presents the results of the analysis of the functioning of the evaporators of the secondary condensation unit. The necessity of creating a high-quality automatic control system for solving the problem of minimizing the temperature regime of cooling of the circulating gas is substantiated. It is determined that the greatest uncertainty is due to the coefficient of heat transfer. The algorithmic and software of the identifier of the automated system for numerical estimation of this uncertainty is developed. The necessity of shortening the survey period of the sensors of the identifier information system is substantiated with the purpose of reducing the error in determining the heat transfer coefficient.

Ситнік Н.С., Демидов І.М., Мазасєва В.С., Голодняк В.О.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРОЦЕСУ ПЕРЕЕТЕРИФІКУВАННЯ НА ТРИАЦИЛГЛІЦЕРОЛЬНИЙ СКЛАД ЖИРОВОЇ СИРОВИНИ З РІЗНИМ ЖИРНОКИСЛОТНИМ СКЛАДОМ

Вступ. Жировмісна продукція має важливе значення у раціоні харчування людини, оскільки жири характеризуються високою калорійністю, наявністю поживних речовин. Рослинні олії та жири – одна із основних складових продуктів здорового харчування. Вимоги до якості олійножирових продуктів та їх обґрунтованість впливають із фізіологічної ролі окремих груп ліпідів та їх жирнокислотного складу у життєдіяльності організму людини. Остання пов'язана з впливом окремих жирних кислот на синтез загального холестеролу, що являє собою суму холестеролів низької та високої густини, а також співвідношенням останніх, що визначає направленість фізіологічних процесів в організмі людини. Основне завдання виробництва харчових рослинних олій та жирів різного призначення на їх основі – розробка повноцінних жирових продуктів з урахуванням їх біологічних властивостей, високої стабільності до окиснення і забезпечення показників безпеки продуктів харчування, що виробляються [1, 2]. Зважаючи на сучасний розвиток виробництва продовольчих товарів, системи громадського харчування, удосконалення та розширення асортименту продуктів кондитерської, хлібопекарської, молочної промисловості, все більше виникає потреба у жирах, що мають певні технологічні характеристики [3, 4]. За умов обмеженого асортименту вітчизняної жирової сировини (рідкі рослинні олії лінолево-олеїнової групи, зокрема соняшникова, ріпакова, соєва, а також тверді або напівтверді тваринні жири – свинячий, яловичий тощо) особливо актуальним є виробництво модифікованих жирів, які відповідають як технологічним потребам, так і вимогам безпечності та користі для організму людини. Серед сучасних інструментів модифікації олій та жирів важливе місце займає переетерифікування (хімічне або ферментативне) [5, 6]. Властивості жирів зумовлюються їх жирнокислотним та триацилгліцерольним складом. Підбираючи рецептури з різних за складом жирів, одержують потрібні властивості кінцевого жиру для застосування у певній галузі промисловості.

Постановка проблеми. Жирнокислотний склад певним чином впливає на фізичні та хімічні властивості жирів. Найчастіше жири класифікують саме за жирнокислотним складом, зокрема, за складом жирних кислот, які містяться у найбільшій кількості (20 % мас. і більше) [7, 8]. Так, виділяють наступні групи: лауринова, пальмітинова, олеїнова, олеїново-лінолева, лінолева, ліноленова. Жирнокислотний склад є вирішальним фактором у виборі жирів з урахуванням харчової цінності, технологічних властивостей, а також служить підставою для прогнозування фізико-хімічних показників харчових жирів та їх стабільності до окиснення [9–11]. Як відомо, процес переетерифікування жирів супроводжується перерозподілом залишків жирних кислот між молекулами триацилгліцеролів, в ході якого триацилгліцерольний склад наближується до рівноважного [7, 12, 13]. У даному дослідженні проаналізовано вплив жирнокислотного складу олій на досягнення ними рівноважного триацилгліцерольного складу у результаті переетерифікування.

Предметом наукового дослідження є процес хімічного переестерифікування рослинних олій різного жирнокислотного складу.

Матеріали та методи. У даному дослідженні використано наступну жирову сировину – соєву, соняшникову, пальмову олії та пальмовий олеїн. Жирнокислотний та триацилгліцерольний склад зразків олій визначено методом газорідинної хроматографії.

Результати. Масова частка жирних кислот, вміст яких є найбільшим у кожному експериментальному зразку, представлена у табл. 1, 2.

Таблиця 1 – Склад головних жирних кислот зразків соняшnikової та соєвої олій

№ п/п	Жирні кислоти	Позначення	Вміст жирної кислоти, %	
			Соняшnikова олія	Соєва олія
1	Лінолева C _{18:2}	L	62,3	53,9
2	Олеїнова C _{18:1}	O	26,9	22,4
3	Пальмітинова C _{16:0}	P	5,8	9,7
4	Стеаринова C _{18:0}	S	3,6	5,1

Таблиця 2 – Склад головних жирних кислот зразків пальмової олії та пальмового олеїну

№ п/п	Жирні кислоти	Позначення	Вміст жирної кислоти, %	
			Пальмова олія	Пальмовий олеїн
1	Пальмітинова C _{16:0}	P	43,5	39,2
2	Олеїнова C _{18:1}	O	40,4	43,9
3	Лінолева C _{18:2}	L	9,4	10,4
4	Стеаринова C _{18:0}	S	4,3	4,1

На рис. 1–4 наведено триацилгліцерольний склад переестерифікованих зразків та рівноважний склад (р), розрахований на основі жирнокислотного складу. Показано границі сумарної абсолютної похибки вимірювання експериментально визначеного триацилгліцерольного складу, а також границі похибки визначення рівноважного триацилгліцерольного складу. Цифрами позначено наступні триацилгліцероли: на рис. 1, 2: 1 – PPS, 2 – POP, 3 – PLP, 4 – POS, 5 – PLS, 6 – POO, 7 – PLO, 8 – PLL, 9 – PLLn, 10 – OOO+SLS, 11 – SLO, 12 – OOL, 13 – SLL, 14 – SOO, 15 – OLL, 16 – LLL, 17 – LLLn; на рис. 3, 4: 1 – MPP, 2 – MOM, 3 – PPP, 4 – MOP, 5 – MLP, 6 – PPS, 7 – POP, 8 – PLP, 9 – MLO, 10 – PSS, 11 – POS, 12 – POO, 13 – PLS, 14 – PLO, 15 – PLL, 16 – SOS, 17 – SOO, 18 – OOO, 19 – SLO, 20 – OLO. Залишки жирних кислот: P – пальмітинової, S – стеаринової, O – олеїнової, L – лінолевої, Ln – ліноленової, M – міристинової.

Похибка розрахункового триацилгліцерольного складу складається з похибки приведення результатів розрахунку у відповідність з експериментальним складом триацилгліцеролів, і похибки визначення жирнокислотного складу. Перша похибка є наслідком того, що з усієї розрахункової кількості триацилгліцеролів залишено тільки ті, які відповідають експериментально виміряним триацилгліцеролам, і їх концентрацію приведено до одиниці (до суми концентрацій, що дорівнює 100 %) перерахунком, ви-

ключивши зайві триацилгліцероли. Друга складова є результатом накопичення похибки визначення жирнокислотного складу під час розрахунку рівноважного триацилгліцерольного складу. Під час розрахунку цієї похибки використовують дані ДСТУ ISO 5508-2001 щодо величини відносної похибки вимірювання жирнокислотного складу. Для кожної жирної кислоти визначають абсолютну похибку вимірювання її концентрації.

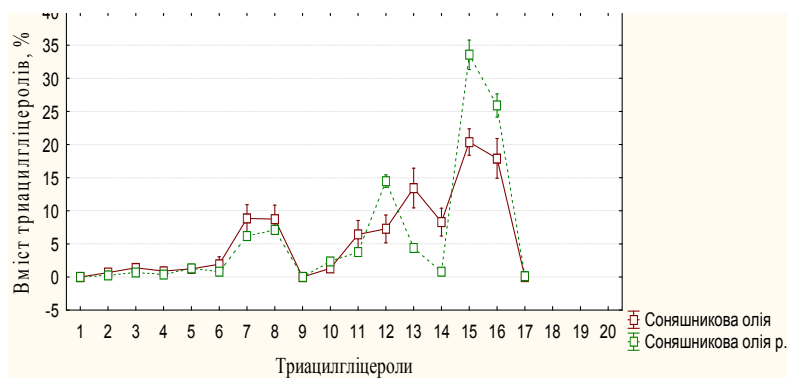


Рисунок 1 – Експериментально визначений та рівноважний триацилгліцерольний склад соняшникової олії

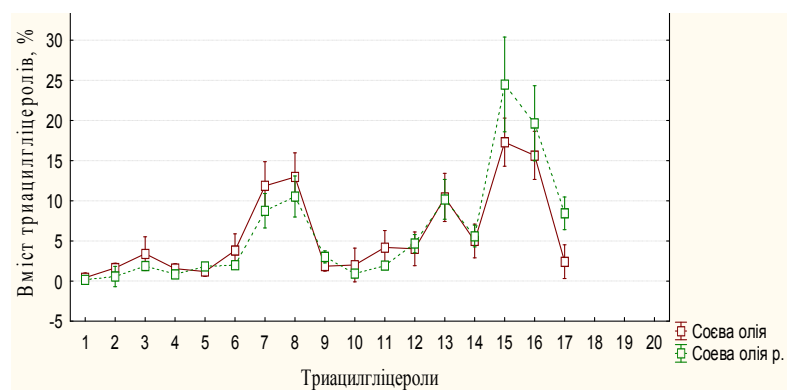


Рисунок 2 – Експериментально визначений та рівноважний триацилгліцерольний склад соєвої олії

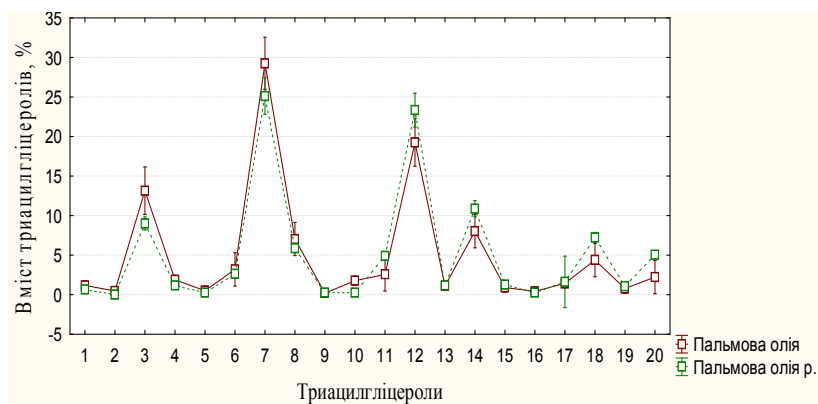


Рисунок 3 – Експериментально визначений та рівноважний триацилгліцерольний склад пальмової олії

Оскільки розрахунок вмісту триацилгліцеролів зводиться до перемножування трьох концентрацій жирних кислот в кожному триацилгліцеролі, то сумарна похибка дорівнює сумі похибок визначення вмісту жирних кислот, що входять в даний триацилгліцерол [14]. Критерієм збіжності експериментального та розрахункового триацилгліцерольного складу буде той факт, що різниця між ними менша за напівсуму похибок визначення вмісту триацилгліцеролів експериментальним і розрахунковим методом. Для дослідних олій виконано перевірку за вказаним вище критерієм. На рис. 5 представлено результати розрахунку для пальмової олії.

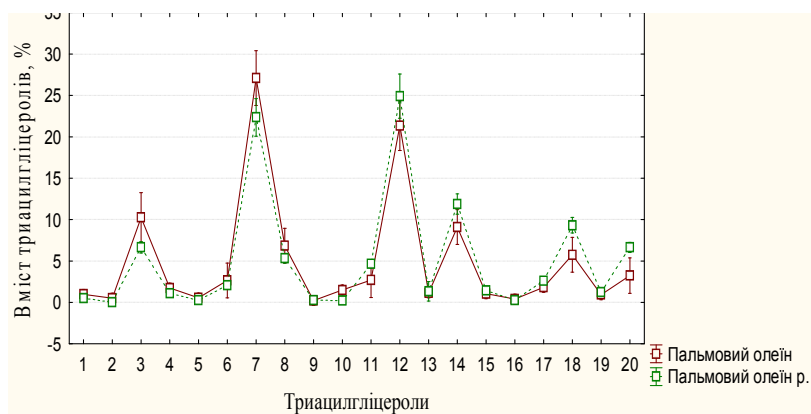


Рисунок 4 – Експериментально визначений та рівноважний триацилгліцерольний склад пальмового олеїну

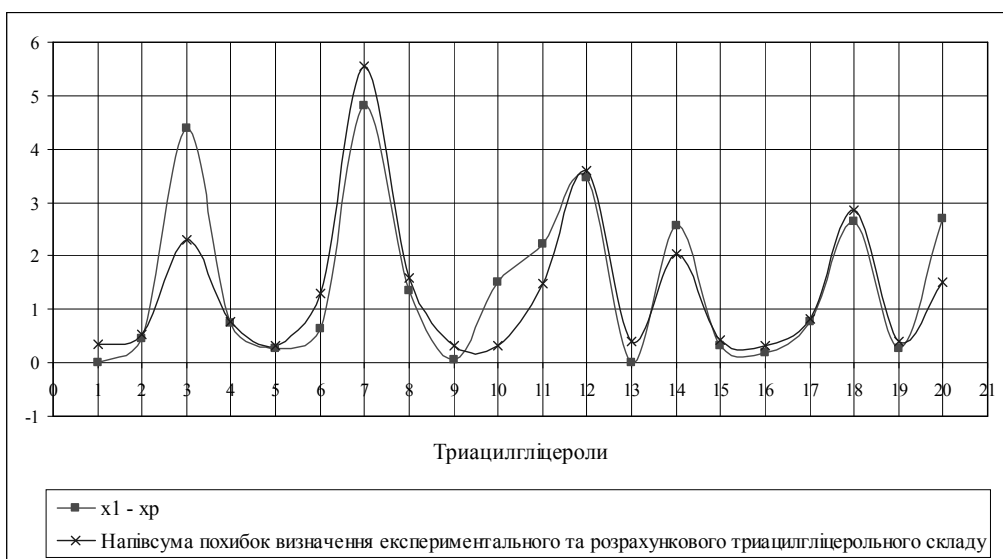


Рисунок 5 – Різниця експериментального (x_1) та розрахункового (x_p) триацилгліцерольного складу пальмової олії, а також напівсума похибок визначення експериментального та розрахункового триацилгліцерольного складу пальмової олії

Отже, за даними рис. 3 та 5 встановлено, що для пальмової олії кількість триацилгліцеролів, масова частка яких після переетерифікування відповідає рівноважному складу, становить 15. За результатами для пальмового олеїну кількість таких триацилгліцеролів становить 16, для соняшникової олії – 10, для соєвої олії – 13.

Таким чином, з урахуванням похибок вимірювання експериментального та визначення розрахункового триацилгліцерольного складу проаналізовано відповідність складу триацилгліцеролів переестерифікованих зразків до розрахованого рівноважного.

Для пальмового олеїну, який, як відомо, має властивість підвищувати температуру плавлення у результаті переестерифікування, проведено дослідження початкового та переестерифікованого зразків з використанням диференційної скануючої калориметрії. На рис. 6 представлено криві плавлення та кристалізації початкового та переестерифікованого пальмового олеїну.

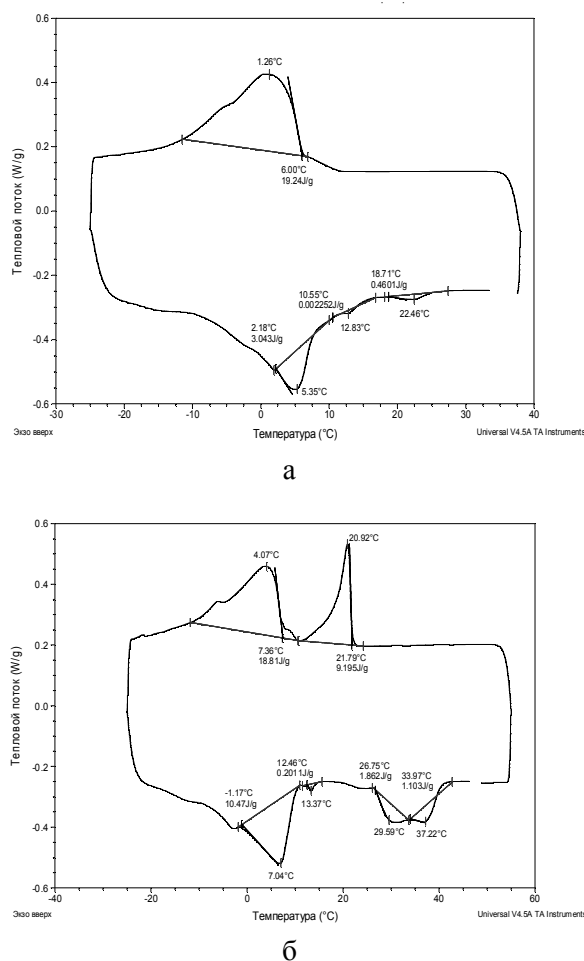


Рисунок 6 – ДСК – грама початкового (а) та переестерифікованого (б) пальмового олеїну

На кривих плавлення та кристалізації можна спостерігати піки, різні за характеристиками для початкового та переестерифікованого зразків. Поряд із наближенням триацилгліцерольного складу пальмового олеїну до статистичного розподілу у результаті переестерифікування, що супроводжується зростанням його температури плавлення [13], відбувається поява піків з іншими характеристичними температурами, що свідчить про утворення груп триацилгліцеролів з новими характеристиками плавлення та застигання, що має дуже важливе значення у виробництві жирів з потрібними властивостями.

Висновок. Таким чином, триацилгліцерольний склад переестерифікованих зразків твердої рослинної олії – пальмової – та її фракції (пальмового олеїну) у більшій мірі наближується до статистичного розподілу жирних кислот у молекулах триацилгліцеролів у порівнянні з рідкими рослинними оліями лінолево-олеїнової групи (соняшникова та соєва). Цей факт експериментально підтверджено порівнянням триацилгліцерольного складу зразків після переестерифікування та рівноважного, з урахуванням сумарної абсолютної похибки вимірювання концентрації триацилгліцеролів та похибок визначення розрахункового рівноважного триацилгліцерольного складу.

На прикладі пальмового олеїну з використанням диференційної скануючої калориметрії показано зміну характеристик плавлення та застигання у результаті переестерифікування, що свідчить про утворення нових груп триацилгліцеролів, концентрація яких стає відповідною до рівноважного триацилгліцерольного складу.

Література

1. Ефименко С.Г. Новые виды подсолнечного масла с измененным жирнокислотным составом / С.Г. Ефименко, С.К. Ефименко, С.Ф. Быкова, Е.К. Давиденко // Масложировая промышленность. – 2012. – №4. – С. 16–18.
2. Бессонов В.В. Гигиенические принципы применения растительных масел в производстве пищевых продуктов / В.В. Бессонов, С.Н. Кулакова, В.Г. Байков // Масложировая промышленность. – 2012. – №1. – С. 7–9.
3. Шеманская Е.И. Производство спредов сбалансированного состава на сливочно-растительной жировой основе / Е.И. Шеманская, И.Г. Радзиевская, В.В. Манк, И.В. Левчук // Масложировой комплекс. – 2015. – №3 (50). – С. 40–42.
4. Голубева Л.В. Применение растительных масел в технологии молочножировых консервов / Л.В. Голубева, О.И. Долматова, А.А. Губанова, Т.А. Гузеева, В.Ф. Бандура // Масложировой комплекс. – 2015. – №3 (50). – С. 42–43.
5. Costales-Rodriguez R. Chemical and enzymatic interesterification of a blend of palm stearin:soybean oil for low trans-margarine formulation / R. Costales-Rodriguez, V. Gibon, R. Verhe, W. De Greyt // J. Am. Oil Chemists' Soc. – 2009. – No. 86. – P. 681–697.
6. Noor Lida H.M.D. TAG composition and solid fat content of palm oil, sunflower oil and palm kernel olein blends before and after chemical interesterification / H.M.D. Noor Lida, K. Sundram, W.L. Siew, A. Aminah, S. Mamot // J. Am. Oil Chemists' Soc. – 2002. – Vol. 79. – No. 86. – P. 1137–1139.
7. Хімія жирів [Текст] / [Б.Н. Тютюнников, З.І. Бухштаб, Ф.Ф. Гладкий та ін.]; за ред. Гладкого Ф.Ф. – Харків: НТУ «ХПІ», 2002. – 432 с.
8. Долголюк И.В. Растительные масла – функциональные продукты питания / И.В. Долголюк, Л.В. Терещук, М.А. Трубникова, К.В. Старовойтова // Техника и технология пищевых производств. – 2014. – №2. – С. 122–125.
9. Ефименко С.Г. Устойчивость к окислению высокоолеинового подсолнечного масла в зависимости от содержания линолевой кислоты и токоферолов / С.Г. Ефименко, С.К. Ефименко // Масложировой комплекс. – 2010. – №2 (29). – С. 41–43.
10. Криволапов О.М. Підвищення ефективності технології переестерифікації жирів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.18.06 «Технологія жирів, ефірних масел і парфумерно-косметичних продуктів» / Криволапов Олексій Миколайович. – Харків, 2007. – 20 с.

11. Zambiasi R.C. Fatty acid composition of vegetable oils and fats / R.C. Zambiasi, R. Przybylski, M.W. Zambiasi, C.B. Mendonca // B. Ceppa, Curitiba. – 2007. – Vol. 25. – No. 1. – P. 111–120.
12. Демидов И.Н. Ацилглицерольный состав жиров и реакция переэтерификации / И.Н. Демидов, В.С. Мазаева, Н.С. Сытник, В.А. Голодняк, В.А. Кищенко, О.В. Голубец // Масложировой комплекс. – 2013. – № 4(43). – С. 28–29.
13. Голодняк В.А. Определение активности катализатора химической переэтерификации жиров / В.А. Голодняк, И.Н. Демидов, В.С. Мазаева, Н.С. Сытник, П.Ф. Петик // Уральский научный вестник. – №8 (87). – 2014. – С. 187–193.
14. Крылов А.Н. Лекции о приближенных вычислениях / А.Н. Крылов. – М.: Гостехиздат, 1954. – 400 с.

Bibliography (transliterated)

1. Efimenko S.G. Novyye vidy podsolnechnogo masla s izmenennym zhirnokislotsnym sostavom / S.G. Efimenko. S.K. Efimenko. S.F. Bykova. E.K. Davidenko // Maslozhirovaya promyshlennost. – 2012. – №4. – P. 16–18.
2. Bessonov V.V. Gigiyenicheskiye printsipy primeneniya rastitelnykh masel v proizvodstve pishchevykh produktov / V.V. Bessonov. S.N. Kulakova. V.G. Baykov // Maslozhirovaya promyshlennost. – 2012. – №1. – P. 7–9.
3. Shemanskaya E.I. Proizvodstvo spredov sbalansirovannogo sostava na slivochno-rastitelnoy zhirovoy osnove / E.I. Shemanskaya. I.G. Radziyevskaya. V.V. Mank. I.V. Levchuk // Maslozhirovoy kompleks. – 2015. – №3 (50). – P. 40–42.
4. Golubeva L.V. Primeneniye rastitelnykh masel v tekhnologii molokosoderzhashchikh konservov / L.V. Golubeva. O.I. Dolmatova. A.A. Gubanova. T.A. Guzeyeva. V.F. Bandura // Maslozhirovoy kompleks. – 2015. – №3 (50). – P. 42–43.
5. Costales-Rodriguez R. Chemical and enzymatic interesterification of a blend of palm stearin:soybean oil for low trans-margarine formulation / R. Costales-Rodriguez. V. Gibon. R. Verhe. W. De Greyt // J. Am. Oil Chemists' Soc. – 2009. – No. 86. – P. 681–697.
6. Noor Lida H.M.D. TAG composition and solid fat content of palm oil, sunflower oil and palm kernel olein blends before and after chemical interesterification / H.M.D. Noor Lida. K. Sundram. W.L. Siew. A. Aminah. S. Mamot // J. Am. Oil Chemists' Soc. – 2002. – Vol. 79. – No. 86. – P. 1137–1139.
7. Khimiya zhiriv [Tekst] / [B.N. Tyutyunnikov, Z.I. Bukhshtab, F.F. Gladkiy ta in.]; za red. Gladkogo F.F. – Kharkiv: NTU «KhPI». 2002. – 432 p.
8. Dolgolyuk I.V. Rastitelnyye masla – funktsionalnyye produkty pitaniya / I.V. Dolgolyuk. L.V. Tereshchuk. M.A. Trubnikova. K.V. Starovoytova // Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv. – 2014. – №2. – P. 122–125.
9. Efimenko S.G. Ustoychivost k okisleniyu vysokooleinovogo podsolnechnogo masla v zavisimosti ot sodержaniya linolevoy kisloty i tokoferolov / S.G. Efimenko. S.K. Efimenko // Maslozhirovoy kompleks. – 2010. – №2 (29). – P. 41–43.
10. Krivolapov O.M. Pidvishchennya efektyvnosti tekhnologii pereyeterifikatsii zhiriv: avtoref. dis. na zdobuttya nauk. stupenya kand. tekhn. nauk: spets. 05.18.06 «Tekhnologiya zhiriv, efirnykh masel i parfumerно-kosmetichnykh produktiv» / Krivolapov Oleksiy Mikolayovich. – Kharkiv. 2007. – 20 p.

11. Zambiasi R.C. Fatty acid composition of vegetable oils and fats / R.C. Zambiasi. R. Przybylski. M.W. Zambiasi. C.B. Mendonca // B. Ceppa. Curitiba. – 2007. – Vol. 25. – No. 1. – P. 111–120.
12. Demidov I.N. Atsilglitserolnyy sostav zhirov i reaktsiya pereeterifikatsii / I.N. Demidov. V.S. Mazayeva. N.S. Sytnik. V.A. Golodnyak. V.A. Kishchenko. O.V. Golubets // Maslozhirovoy kompleks. – 2013. – № 4(43). – P. 28–29.
13. Golodnyak V.A. Opredelenye aktivnosti katalyzatora khymicheskoi pereeteryfikatsyy zhyrov / V.A. Holodniak, I.N. Demydov, V.S. Mazaeva, N.S. Sytnyk, P. F. Petyk // Uralskiy nauchnyi vestnyk. – №8 (87). – 2014. – P. 187–193.
14. Krylov A.N. Lekcii o priblizhyonnyh vychisleniyah / A.N. Krylov. – M.: Gostehizdat, 1954. – 400 p.

УДК 665.1

Сытник Н.С., Демидов И.Н., Мазаева В.С., Голодняк В.А.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА ПЕРЕЭТЕРИФИКАЦИИ НА ТРИАЦИЛГЛИЦЕРОЛЬНЫЙ СОСТАВ ЖИРОВОГО СЫРЬЯ С РАЗЛИЧНЫМ ЖИРНОКИСЛОТНЫМ СОСТАВОМ

В статье представлено сравнение равновесного триацилглицерольного состава образцов различных масел с полученным после переэтерификации и установлено, что триацилглицерольный состав переэтерифицированного пальмового масла и его фракции – пальмового олеина – в большей степени совпадает с равновесным в сравнении с жидкими растительными маслами (подсолнечное и соевое). С помощью дифференциальной сканирующей калориметрии показаны изменения в составе триацилглицеролов начального и переэтерифицированного пальмового олеина, которые представлены характеристиками пиков плавления и кристаллизации на ДСК – граммах.

Sytnik N.S., Demidov I.N., Mazaeva V.S., Golodnyak V.A.

STUDY OF THE INFLUENCE OF INTERESTERIFICATION PROCESS ON TRIACYLGLICEROL STRUCTURE OF RAW FAT WITH DIFFERENT FATTY ACID COMPOSITION

The paper presents a comparison of the equilibrium triacylglycerol composition of samples and obtained after interesterification of various oils and found that the triacylglycerol composition of interesterified palm oil and its fractions – palm olein – largely coincides with the equilibrium in comparison with liquid vegetable oils (soybean and sunflower). Using differential scanning calorimetry changes in the initial and triacylglycerols of interesterified palm olein, which presents characteristics of melting and crystallization peaks in the DSC – grams, was shown.

Пугановський О.В., Подустов М.О., Дзевочко О.М., Шутинський О.Г., Печенко Т.І.

ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ОКИСЛЮВАЛЬНОГО ТА АБСОРБЦІЙНОГО ОБ'ЄМІВ НА ПРОЦЕС АБСОРБЦІЇ NO_x В ТЕХНОЛОГІЇ НІТРАТНОЇ КИСЛОТИ

Вступ. В даний час єдиним промисловим способом одержання нітратної кислоти є каталітичне окислення аміаку киснем повітря з подальшим поглинанням отриманих оксидів азоту водою. На стадії окислення аміаку оптимальним є низький тиск, а для стадії абсорбції оксидів нітрогену – високий. Це протиріччя усувається застосуванням комбінованих схем. На різних етапах розвитку виробництва нітратної кислоти застосування різних технологічних схем залежало від різних факторів, що і визначило розмаїтість таких схем.

В Україні діють установки під атмосферним тиском на стадії окислення аміаку і при 0,343 МПа на стадії абсорбції, установки під єдиним тиском 0,716 МПа і нарешті, великотоннажні установки АК-72, АК-72М за енерготехнологічною схемою (тиск на стадіях конверсії та абсорбції відповідно 0,392 і 1,079 МПа).

В останніх двох схемах включена високотемпературна каталітична очистка вихлопних газів від оксидів нітрогену з використанням природного газу в якості відновника і в поєднанні з газовою турбіною для рекуперації енергії. Вміст в вихлопних газах оксидів нітрогену досягається не більше 0,005 %.

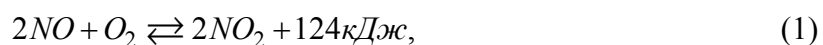
Основний недолік високотемпературного каталітичного очищення вихлопних газів - викид в атмосферу значних кількостей оксиду вуглецю. Цей недолік набуває все більшого значення в міру зростання вимог до охорони повітряного басейну.

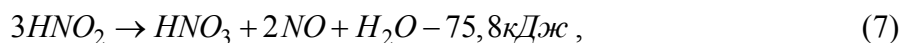
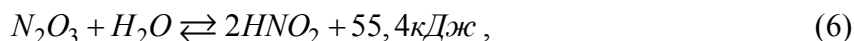
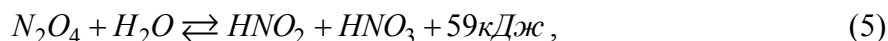
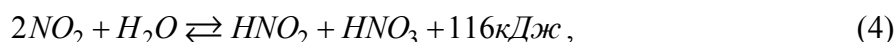
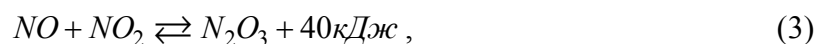
Крім того, зі зростанням вартості природного газу та збільшення попиту на нього призводить до необхідності виключення його споживання в схемах одержання нітратної кислоти і одночасно вирішення екологічних завдань (в агрегатах під тиском 0,716 МПа на 1 т кислоти витрачається 120 м³ природного газу, а в агрегаті АК-72–82 м³ газу).

Одними з можливих варіантів вирішення проблем є проведення глибокої водно-кислотної абсорбції з метою зменшення вмісту нітрогену в газах, після абсорбційної колони.

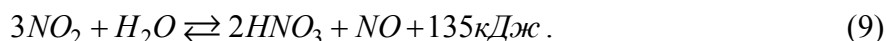
Аналіз останніх досліджень і публікацій. Абсорбція оксидів нітрогену являє собою складний фізико-хімічний процес, який супроводжується цілою низкою послідовних і паралельних реакцій, оскільки газ, що надходить на абсорбцію, є багатокомпонентним. Даному процесу були присвячені роботи багатьох дослідників [1-3]. Результати досліджень і варіанти технічних рішень щодо проведення технологічного процесу абсорбції оксидів нітрогену відображені також в роботах [4, 5].

За даними більшості дослідників процес отримання неконцентрованої нітратної кислоти можна описати наступними рівняннями:





Узагальнену реакцію отримання нітратної кислоти можна надати в наступному вигляді:



В ході зазначених реакцій проходять наступні фізико-хімічні процеси:

- 1) окислення оксиду нітрогену (II) в газовій фазі і частково в рідкій;
- 2) дифузія оксидів нітрогену з газового потоку до кордону розділу фаз;
- 3) абсорбція оксидів нітрогену водою і утворення нітратної і нітритної кислот;
- 4) часткове взаємодія вищих оксидів нітрогену з водяною парою в газовій фазі;
- 5) розкладання нітритної кислоти і повернення утвореного оксиду нітрогену (II) в газову фазу;
- 6) дифузія кисню з газового потоку до кордону розділу фаз;
- 7) десорбція NO в газову фазу.

Кожен із зазначених процесів надає певний вплив на загальну швидкість кислотоутворення.

Кількісний опис кінетики реакції, що протікає за рівнянням (1), було дано в роботі М. Боденштейна [6], де автор досліджував швидкість реакції окислення оксиду нітрогену (II) в статичній системі по падінню тиску газової суміші в реакційному посудині. Було встановлено, що реакція (1) відповідає третьому порядку, процес є гомогенним, а його швидкість визначається рівнянням:

$$\frac{dC_{NO_2}}{d\tau} = K \cdot C_{O_2} \cdot C_{NO}^2 . \quad (10)$$

В даний час швидкість окислення оксиду азоту (II) визначають за рівнянням М. Боденштейна в інтегральному вигляді:

$$Kp \cdot P^2 \cdot \tau = \frac{1}{(b-a)^2} \cdot \left[\frac{\alpha \cdot (b-a)}{(1-\alpha) \cdot a} + 2,3 \cdot \lg \frac{1-\alpha}{1-\frac{a}{b} \cdot \alpha} \right] , \quad (11)$$

де K_p – константа швидкості окислення NO; P – тиск, МПа; τ – час окислення, с; b – початкова об'ємна частка кисню, ч.о.; $2a$ – початкова об'ємна частка оксиду азоту (II), ч.о.; α – окисленість газу, д.е.

Атрощенко і Каргін [7] вказують, що в міру накопичення оксиду нітрогену поряд з утворенням двооксиду та чотирьохоксиду нітрогену відбувається збільшення вмісту трьохоксиду нітрогену і максимальна кількість його утворюється при окисленні оксиду нітрогену на 50 %. При подальшому окисленні зміст її наближається до нуля. При тривалому окисленні і при низьких температурах можна перевести всі оксиди в чотирьохоксиди нітрогену.

Істотний вплив на швидкість процесу окислення оксиду азоту (II) чинить тиск. Розрахунки показали: для досягнення 95 % окислення при атмосферному тиску необхідно 300 с., під тиском 4 атм – 20 с.

До теперішнього часу серед дослідників в галузі технології нітратної кислоти поки немає єдиної думки з питання, яка форма оксидів нітрогену N_2O_4 , N_2O_3 або NO_2 є найбільш активною при взаємодії з водою.

На думку В.І. Атрощенко, В.І. Конвісар, Л.В. Конвісар [8, 9], процес абсорбції оксидів нітрогену здійснюється за двома основними реакціями (4) і (7).

Складність процесів, що протікають при абсорбції оксидів нітрогену, зумовила і суперечливість в поясненнях механізму процесу [10, 11].

Таким чином, можна зробити висновок, що в виробничих умовах в абсорбційній колоні швидкість утворення нітратної кислоти контролюється реакцією абсорбції оксиду нітрогену і реакцією багаторазового окислення оксидів нітрогену (II).

Мета роботи. Визначити вплив окислювального та абсорбційного об'ємів на процес абсорбції NO_x в абсорбційній колоні в технології нітратної кислоти.

Основна частина. Слід зазначити, що до цього часу переважає емпіричний підхід до конструювання промислових абсорбційних колон. Це пов'язано з тим, що існує кілька оксидів нітрогену з яких оксиди NO, N_2O_3 , NO_2 і N_2O_4 грають важливу роль в реакціях і дифузійних процесах, що відбуваються як в газовій, так і в рідкій фазах.

Залишається невирішеним питання про швидкість утворення HNO_3 і HNO_2 в газовій фазі, а також переходу їх в рідку фазу.

У загальному процесі отримання нітратної кислоти стадія (1) є лімітуючою і протікає в основному в дифузійній області в газовій фазі (між тарілками абсорбційної колоні). Зміщенню рівноваги в бік продукту реакції сприяє: зниження температури, підвищення тиску, концентрації оксиду нітрогену (II) і кисню в нітрозному газі. В процесі реакції, внаслідок зменшення концентрації оксиду нітрогену (II), швидкість окислення знижується, і інтенсивність його в промисловому масштабі можна збільшити, використовуючи концентрований нітрозний газ. У разі розведеного газу реакція протікає повільно.

Розрахунки показали: газ, що містить 0,5 об % оксиду нітрогену (II) окислюється за 200 с на 76 % при вмісті в ньому кисню 7–8 об.% і температурі 293 К. У верхній частині колоні в промислових умовах кисню значно менше, отже, і швидкість окислення там невисока. Введення в абсорбер підвищеної кількості повітря для інтенсифікації реакції окислення не вирішує проблеми, оскільки азот повітря розбавляє концентрацію нітрозних газів. Помітне прискорення процесу (1) можливо додаванням надлишкової кількості кисню в колону.

У виробництві нітратної кислоти істотне значення має визначення максимальної швидкості реакції окислення оксиду нітрогену (II) і мінімального обсягу реактора.

Результати розрахунку показали, що максимальна швидкість окислення киснем повітря досягається при концентрації кисню 6,9 %, а мінімальний об'єм апарату – при концентрації кисню в газовій суміші 5,2 %.

Наші розрахунки щодо впливу концентрації оксиду нітрогену, тиску та температури на швидкість окислення NO в NO₂ дали наступні результати для 95 % окислення NO до NO₂:

1 – початковий вміст газу NO – 8,85 % об, O₂ – 7,15 % об. Час окислення при 1 атм і 20 °C – 252,5 с; при 1 атм і 50 °C – 401 с;

2 – початковий склад газу колишній. При 1 атм. і 20°C – 252,5 с; при 5 атм і 20 °C – 10,25с.

Такі дані показують, що швидкість окислення NO в NO₂ пропорційна квадрату концентрації оксиду нітрогену і прямо пропорційна концентрації кисню, загалом буде пропорційна кубу тиску.

Таким чином можна рекомендувати наступні рішення: необхідно змінювати окислювальні об'єми між тарілками колони, залишаючи загальний окислювальний об'єм постійним, при окислювальні об'єми необхідно змінювати в залежності від зміни складу газу по висоті колони.

Зміни абсорбційних об'ємів необхідно ув'язувати зі зміною окислювальних об'ємів. Аналіз абсорбційних процесів показав, що абсорбція оксидів нітрогену водними розчинами нітратної кислоти досить складний процес, пов'язаний не тільки з взаємодією оксидів з водою, але і з розкладанням утворюючих продуктів.

Кінетика абсорбції є об'єктом вивчення багатьох дослідників. Велика частина з них вважають, що процес абсорбції контролюється швидкістю дифузії оксиду нітрогену (IV) через плівку кислотного туману, яка утворюється на кордоні розділу газової і рідкої фаз.

В умовах кращого поглинання оксидів нітрогену при низькій температурі, прискорити розкладання азотистої кислоти в розчині можна інтенсивним перемішуванням. У цих умовах прискорюється виділення оксидів нітрогену (II) з рідкої фази і їх окислення.

Механізм абсорбції оксидів нітрогену і кислотоутворення – один з найважливіших питань наукового та прикладного значення. І, якщо механізм утворення азотної кислоти шляхом поглинання оксиду нітрогену (III), або газової суміші з рівних обсягів NO і NO₂ цілком встановлений, то механізм абсорбції в разі оксиду нітрогену (IV) є предметом дискусій.

Великі відомості з питання отримання азотної кислоти ще не дозволяють вичерпно оцінити роль дифузійних і кінетичних факторів в процесі абсорбції оксидів нітрогену, оскільки швидкість процесу повинна визначатися також гідродинамічними і апаратними умовами.

Вплив тиску на процес абсорбції слід оцінювати спільно з процесом окислення оксидів нітрогену, особливо, в разі малих парціальних тисків, коли зміна останнього стає значним фактором в інтенсифікації процесу кислотоутворення.

Відомо про позитивний вплив підвищеного тиску на всі стадії процесу, в тому числі і на окислення оксиду нітрогену (II). Результати досліджень дозволяють зробити узагальнення – підвищення тиску інтенсифікує рідинофазні окислювальні процеси, оскільки при цьому зростає вміст кисню в розчині, і, як наслідок, отримує прискоренні

процес окислення оксиду нітрогену (II), що виділяється в ході реакції [3], а також окислення систем $\text{HNO}_2 \cdot \text{NO}$, $\text{HNO}_3 \cdot \text{NO}$, що знаходяться в рідкій фазі.

Підвищений тиск сприятливо позначається на процесі абсорбції в цілому: так, збільшення тиску до 1,5–2 МПа призводить до утворення азотної кислоти масової частки 65–68 %.

Для системи АК-72 були проведені розрахунки для абсорбційної колони. Абсорбційна колона діаметром 4 м, число тарілок 45.

На рис. 1 наведена залежність вмісту нітратної кислоти по тарілках абсорбційної колони.

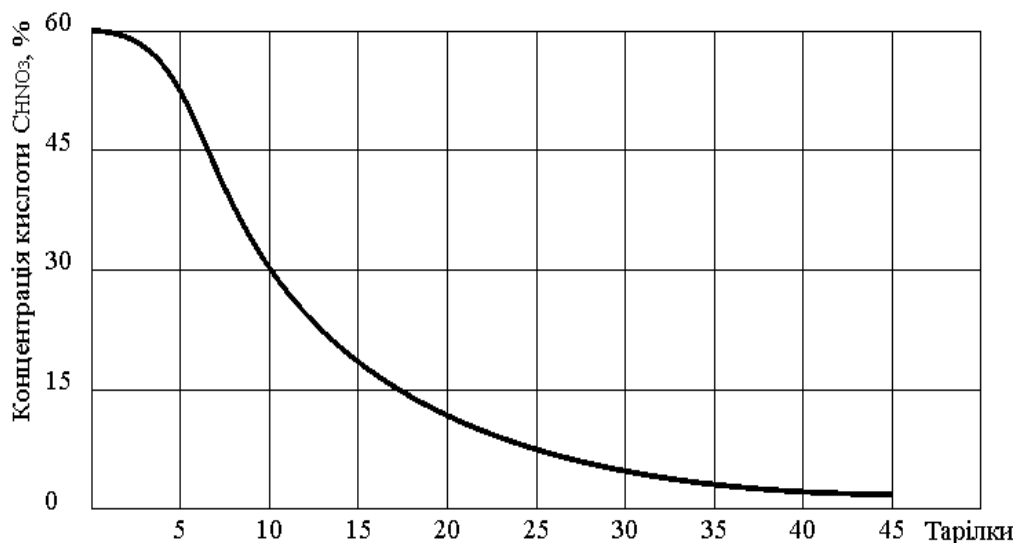


Рисунок 1 – Залежність концентрації нітратної кислоти по тарілкам абсорбційної колони

Як видно із рис. 1 з 45 тарілки до 25 тарілки абсорбція NO_x змінюється повільно.

На рис. 2 наведені залежності ступеня окиснення і ступеня абсорбції NO_x по тарілках абсорбційної колони.

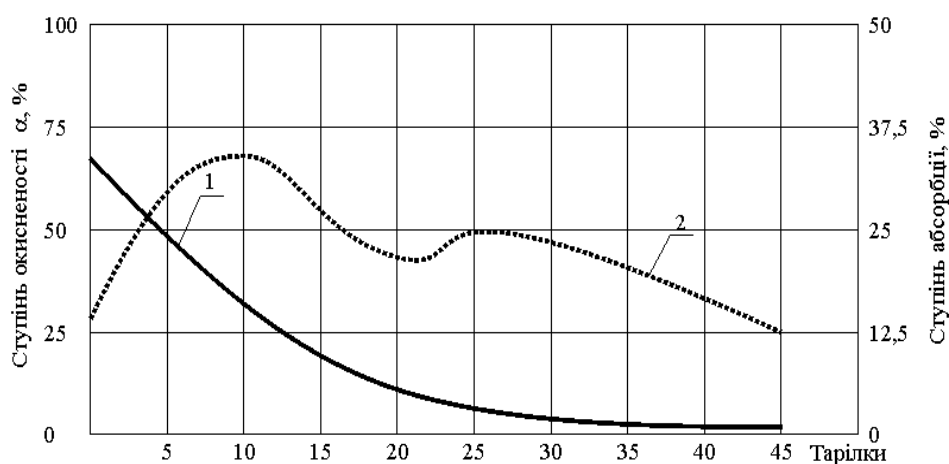


Рисунок 2 – Залежності ступеня окисненості і ступеня абсорбції NO_x по тарілках абсорбційної колони

1 – ступінь окисненості
2 – ступінь абсорбції

Як видно із рисунку 2 ступінь абсорбції з 15 по 25 тарілки знижується, а потім знову зростає.

В той же час ступінь окислення NO знижується постійно, але на тарілках з 30 по 45 ступінь окислення практично знижується до мінімуму.

З рисунку 2 також видно, що на початку процесу абсорбція відстає від окислення, а в кінці, навпаки, окислення починає відставати від абсорбції. Найважливішими є процеси, що протікають у верхній частині колони, так як у нижній частині (до 15–17 тарілки) поглинання і окиснення є досить високими. Тобто, можна стверджувати, що основні зміни потрібно робити у верхній частині для зниження концентрації оксидів у скидних газах.

Основними факторами, що зумовлюють представлені процеси є:

- концентрація кислоти в рідкій фазі;
- температура на тарілках;
- величина поверхні зіткнення;
- концентрація оксидів нітрогену і кисню;
- тиск в апараті;
- швидкість газів.

Змінювати тиск і концентрацію реагентів, що надходять в апарат на промислових абсорбційних установках дуже складно – ці параметри пов'язані з параметрами попередньої виробничої стадії відділення конверсії аміаку. Якщо прийняти незмінними висоту і діаметр абсорбційної колони, то для підвищення ефективності роботи апарату залишаються концентрація кисню та зміна часу контакту у процесах абсорбції і окислення.

У найбільш активній частині колони температурний режим підтримують за рахунок теплообмінних елементів на тарілках, тоді як у верхній частині температура змінюється довільно і залежить в основному від температури води, що подають на зрошення. Підтримання температури води на мінімально можливому рівні також може забезпечити підвищення ефективності процесів абсорбції. Доцільність такого рішення залежить від способів отримання холодної води і може бути визначена тільки точними розрахунками.

Використання чистого кисню для підвищення ступеню окислення оксиду NO у верхній частині колони недоцільне через досить високі економічні витрати на кисень та через низьку ефективність процесу – у верхній частині занадто низька концентрація реагентів.

Збільшення висоти поглинаючого шару рідини обмежене гідродинамічними параметрами. Також на гідродинамічний режим впливає і кількість тарілок.

Таким чином найбільш вільним параметром для оптимізації роботи абсорбційної колони можна вважати окислювальні об'єми та у деякій мірі абсорбційні об'єми.

Висновки. Можна вважати, що для інтенсифікації процесу абсорбції NO_x в абсорбційній колоні необхідно змінювати окислювальні і абсорбційні об'єми по висоті абсорбційної колони. Спочатку процесу при збільшенні окислювального об'єму швидкість поглинання NO_x буде збільшуватися. В кінці процесу необхідно зменшувати окислювальний об'єм. З огляду на зміни окислювального об'єму необхідно змінювати і абсорбційний об'єм для збереження загальної висоти колони. Також потрібно визначитись із джерелами отримання води із температурою близькою до 0–5 °C

Однак, остаточні технічні рішення необхідно прийняти після математичного моделювання процесу абсорбції NO_x .

Література

1. Атрощенко В.И. Окисление окиси азота кислородом в растворах азотной кислоты / В.И. Атрощенко, А.В. Шапка, А.Н. Цейтлин // Химическая промышленность. – 1969. – № 1. – С. 37–38.
2. Терещенко Л.Я. К вопросу о расчете условий равновесия и процессов взаимодействия окислов азота с растворами азотной кислоты / Л.Я. Терещенко, В.П. Панов, М.Е. Позин // Журнал прикладной химии. – 1972. – Т. 45. – № 1. – С. 189–192.
3. Шапка А.В. Исследование процесса окисления окиси азота кислородом в жидкой фазе в растворах азотной кислоты: дис. канд. техн. наук: 05. 17. 01 / А.В. Шапка. – Харьков, 1968. – 135 с.
4. Бочарова В.П. Исследование взаимодействия окислов азота с водными растворами азотной кислоты под давлением: автореф. дис. канд. техн. наук: 08.01.00 / В.П. Бочарова. – Харьков. – 1970. – 22 с.
5. Ворожбян М.И. Окислительные и абсорбционные процессы в технологии азотной кислоты: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.17.01 / М.И. Ворожбян. – Харьков, 2002. – 33 с.
6. Bodenstein M. Bildung und Zerlegung von Stickstoffoxyd / Z. Phys. Chem. – 1922. – Vol. 100. – P. 63–72.
7. Атрощенко В.И. Технология азотной кислоты / В.И.Атрощенко, С.И. Каргин. – М.: Химия, 1970. – 496 с.
8. Конвисар Л.В. Исследование абсорбции окислов азота в процессе производства азотной кислоты под давлением до 40 атм : дис. канд. техн. наук: 05.17.01 / Л.В. Конвисар – Харьков, ХПИ, 1969. – 165 с.
9. Конвисар Л.В. Абсорбция окислов азота растворами азотной кислоты под давлением / Л.В. Конвисар, В.И. Конвисар // Кинетика абсорбционных процессов. Под ред. акад. В.И. Атрощенко – Харьков: Вища школа, 1976. – 176 с.
10. Панов В.П. Разработка теоретических основ и технологического оформления новых методов интенсификации процессов переработки нитрозных газов: дис. докт. техн. наук: 08.01.00 / В.П. Панов – Л., 1981. – 350 с.
11. Ворожбіян М.І. Вплив гетерогенних умов на окислювальні процеси в технології азотної кислоти / М.І. Ворожбіян, О.Я.Лобойко, О.В. Кобзев // Хімічна промисловість України. – 2001. – № 4(45). – С. 36–39.

Bibliography (transliterated)

1. Atroshchenko V.Y. Okyslenye okysy azota kyslorodom v rastvorakh azotnoi kysloti / V.Y. Atroshchenko, A.V. Shapka, A.N. Tseitlyn // Khymycheskaia promishlennost. – 1969. – № 1. – P. 37–38.
2. Tereshchenko L.Ia. K voprosu o raschete uslovyi ravnovesiya y protsessov vzaymodeistviya okyslov azota s rastvoramy azotnoi kysloti / L.Ia. Tereshchenko, V.P. Panov, M.E. Pozyn // Zhurnal prykladnoi khymyy. – 1972. – Т. 45. – № 1. – P. 189–192.
3. Shapka A.V. Yssledovanye protsessa okysleniya okysy azota kyslorodom v zhydkoi faze v rastvorakh azotnoi kysloti: dys. kand. tekhn. nauk: 05. 17. 01 / A.V. Shapka. – Kharkov, 1968. – 135 p.
4. Bocharova V.P. Yssledovanye vzaymodeistviya okyslov azota s vodnimy rastvoramy azotnoi kysloti pod davlenyem: avtoref. dys. kand. tekhn. nauk: 08.01.00 / V.P. Bocharova. – Kharkov. – 1970. – 22 p.

5. Vorozhbyian M.Y. Okyslytelnie y absorbtsonnie protsessi v tekhnolohyy azotnoi kysloti: avtoref. dys. dokt. tekhn. nauk: 05.17.01/M.Y. Vorozhbyian. – Kharkov, 2002. – 33 p.
6. Bodenstein M. Bildung und Zerlegung von Stickstoffoxyd / Z. Phys. Chem. – 1922. – Vol. 100. – P. 63–72.
7. Atroshchenko V.Y., Karhyn S.Y. Tekhnolohyia azotnoi kysloti. – M.: Khymyia, 1970. – 496 p.
8. Konvysar L.V. Yssledovanye absorbtssy okyslov azota v protsesse proyzvodstva azotnoi kysloti pod davlenyem do 40 atm. // Kand. dys. – Kharkov, KhPY, 1969. – 165 p.
9. Konvysar L.V., Konvysar V.Y. Absorbtssyia okyslov azota rastvoramy azotnoi kysloti pod davlenyem // Kynetyka absorbtsonnykh protsessov. Pod red. akad. V.Y. Atroshchenko – Kharkov: Vyshcha shkola, 1976. – 176 p.
10. Panov V.P. Razrabotka teoreticheskykh osnov y tekhnolohycheskoho oformleniya novikh metodov yntensyfykatsyy protsessov pererabotky nytroznikh hazov: dys. dokt. tekhn. nauk: 08.01.00 / V.P. Panov – L., 1981. – 350 p.
11. Vorozhbiiian M.I. Vplyv heterohennykh umov na okysliuvalni protsesy v tekhnolohii azotnoi kysloty / M.I. Vorozhbiiian, O.Ia.Loboiko, O.V. Kobziev // Khimichna promysl – 2001. – № 4(45). – P. 36–39.

УДК 661.56

Пугановский О.В., Подустов М.А., Дзевочко А.М., Шутинский А.Г., Печенко Т.И.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ОКИСЛИТЕЛЬНОГО И АБСОРБЦИОННОГО ОБЪЕМОВ НА ПРОЦЕСС АБСОРБЦИИ NO_x В ТЕХНОЛОГИИ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ

Проведен анализ влияния окислительного и абсорбционного объемов на процесс абсорбции оксидов азота в технологии азотной кислоты. Показано, что для интенсификации абсорбции оксидов азота необходимо изменять окислительный и абсорбционный объемы по высоте абсорбционной колонны.

Puhanovskyi O.V., Podustov M.O., Dzevochko O.M., Shutynskyi O.H., Pechenko T.Y.

TO DETERMINE THE INFLUENCE OF OXIDATION AND ABSORPTION VOLUMES FOR THE ABSORPTION PROCESS OF NO_x IN THE TECHNOLOGY OF NITRIC ACID

The influence of the oxidation and absorption volumes for the absorption process of nitrogen oxides in the technology of nitric acid. It is shown that in order to intensify the absorption of nitrogen oxides is necessary to change the oxidation and absorption volumes for the absorption column height.

Гончаренко П.Д., Щепцов О.В.

ЗМІНА ЯКОСТІ ВИБУХОВИХ РЕЧОВИН ПРИ ЇХ ДОВГОТРИВАЛОМУ ЗБЕРІГАННІ

Найбільш поширеним типом артилерійського снаряда сучасних ствольних артилерійських систем є осколково-фугасний снаряд. Бризантні вибухові речовини, що є основою його розривного заряду, з зору фізичної хімії, є хімічними сполуками з кінцевою в часі стійкістю. Це пояснює процеси розкладання, що повільно протікають в зарядах при довготривалому зберіганні, що призводить до поступової зміни хімічного складу вибухової речовини, зменшення маси та середньої щільності зарядів.

Недосконалість технології виробництва вибухівки та спорядження нею боєприпасів призводить до того, що всередині розривного заряду мають місце аномалії щільності, а різниця величин максимальної та мінімальної щільності вибухової речовини знову виробленого боєприпасу може складати 3–5 і більше відсотків. На рис. 1 і 2 зображені аномалії щільності заряду тротилу, який отриманий способами шнекування (рис. 1) та заливки (рис. 2).

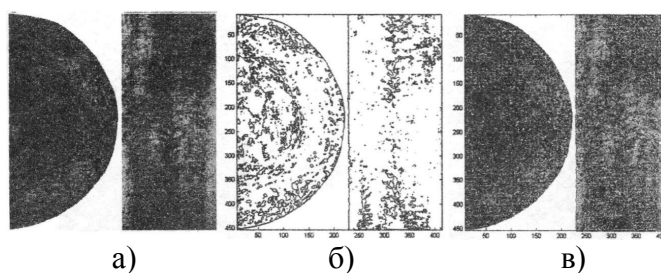


Рисунок 1 – Аномалії щільності розривного заряду, метод спорядження – шнекування (фрагмент а – початкове зображення; б – лінії однакового рівня; в – накладення (а і б) для підвищення контрасту)

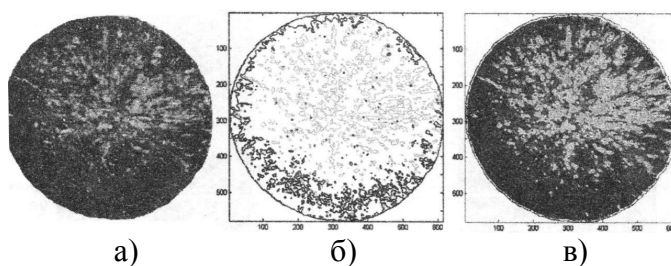


Рисунок 2 – Аномалії щільності розривного заряду, метод спорядження – заливка (фрагмент а – початкове зображення; б – лінії однакового рівня; в – накладення (а і б) для підвищення контрасту)

При довготривалому зберіганні боєприпасів процеси зміни фізико-хімічного стану вибухової речовини розвиваються повільно, проте не зупиняються. Протікання прихованих фізико-хімічних явищ фіксується за допомогою таких ознак: висип, що розкиданий по всій поверхні вибухової речовини; утворення тріщин, відколи вибухової речовини та нещільності; ефект «зростання» та «усадки» вибухової речовини [1–4].

Зважаючи на залежність швидкості детонації та теплоти вибухового перетворення від щільності заряду, різні його частини будуть характеризуватися неоднаковим енерговиділенням.

Дефекти структури литих розривних зарядів наведені на рис. 3: фрагмент *a* – відколювання вибухової речовини й висип, зосереджений по всьому розривному заряду; фрагмент *б* – поперечні та подовжні тріщини в розривному заряді; фрагмент *в* – свищ в розривному заряді; фрагмент *г* – раковина в розривному заряді. Кожен із фрагментів зображений в трьох видах:

- крайній лівий рисунок – початкове зображення;
- в середині – контур максимально поширеного на рисунку відтінку сірого кольору;
- справа – накладення перших двох зображень з метою підвищення контрасту первинної фотографії.

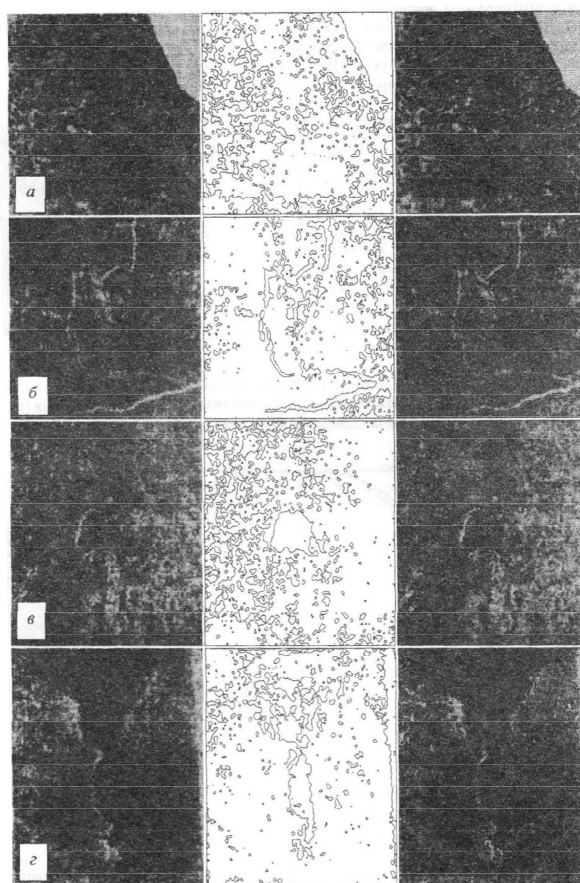


Рисунок 3 – Аномалії щільності розривних зарядів бризантної вибухової речовини

Перебування вибухової речовини в герметичній зарядній камері снаряда не зупиняє, а уповільнює протікання процесів старіння (деградації), що призводить до рівноваги кількості початкової речовини та продуктів розпаду, а отже, маса розривного заряду практично не змінюється [3,4].

Тривале зберігання снарядів супроводжується розгерметизацією їх зарядних камер. У цих умовах процес розкладання вибухової речовини доповнюється процесом

переносу маси деякої частини продуктів розпаду за межі реакційної зони, тобто із зарядної камери в закупорювання боєприпасу.

Так, для снарядів, що споряджені тринітротолуолом (тротилом), однією з ознак процесу розкладання є поява маслоподібної речовини. Вона дістала узагальнену назву «тротилового масла». Ця речовина може накопичуватися в гніздах головного (донного) підривача або шару вибухової речовини, що прилягає до дна, що вгвинчується. При досягненні певної кількості «тротилового масла» починає витікати за межі корпусу через наріз підривача або дна, що вгвинчується. Ця стадія процесу розкладання, що визначається візуально, дістала умовну назву «теча» тротилу. Вона визначається наявністю потьоків рідини на корпусі або в закупорюванні. При цьому шар вибухової речовини, що прилягає до місця течі, стає менш щільним, а при візуальному огляді зрізів розривного заряду видно пористість, а отже, зменшення щільності (розшарування) [5,7].

Теча тротилу в артилерійських снарядах може бути причиною передчасних вибухів при пострілі або неповних вибухах. Останні, зазвичай, пояснюються тим, що маслянисті домішки, заповнюючи проміжок між підривачем та розривним зарядом, екранують (пом'якшують) ініціюючу дію першого, а при проникненні маслянистої домішки в підривач вона просочує детонатор і робить його менш сприйнятливим до капсуля-детонатора. Причину передчасних розривів пояснюють тим, що при витіканні зі снарядів маслянистих домішок порушується монолітність розривного заряду, в результаті чого при пострілі можуть статися небезпечні переміщення вибухової речовини в зарядній камері снаряда [6].

Для снарядів, що споряджені багатокомпонентними вибуховими речовинами з домішками алюмінію, характерне явище «зростання» вибухової суміші. Так, наприклад, у суміші А-ІХ-2 (80/20) при тривалому зберіганні має місце прихований процес окислення алюмінієвої порошкоподібної складової з утворенням інертного продукту – оксиду алюмінію (Al_2O_3). При середньому розмірі частки алюмінієвої пудри, що дорівнює $45-10^{-6}$ м, оксидний шар може сягати товщини 1×10^{-6} м.

За умов припущення про кулястість часток алюмінієвої пудри та рівномірність оксидної плівки, частці з діаметром 45×10^{-6} м відповідатиме об'єм $4,77 \times 10^{-14}$ м³, а частка об'єму оксидної плівки при її товщині в 1×10^{-6} м складатиме 6,52 %. При щільності алюмінію 2,7 г/см³ відповідна щільність його оксиду (Al_2O_3) залежно від його модифікації складе такі величини: α – Al_2O_3 – 3,99 г/см³, θ – Al_2O_3 – 3,61 г/см³, γ – Al_2O_3 – 3,68 г/см³, κ – Al_2O_3 – 3,77 г/см³, що відповідає збільшенню щільності (частини речовини, що складає 6,52 %) в діапазоні 34–48 %, а отже, призводить до ефекту «зростання» речовини та перерозподілу її середньої щільності та енергонасиченості [3].

Таким чином, взаємодія процесів розкладання та переносу маси продуктів розпаду, які повільно протікають за межі зарядної камери призводить до поступової зміни вибухо-технічних характеристик розривного заряду за рахунок трансформації природи вибухової речовини.

У межах гарантійного терміну ці явища мають незначний вплив на боєприпаси. Однак за границями терміну гарантії процеси такого роду можуть прискорюватися і тоді їх впливом зневажати не можна.

Виходячи з цього маємо зробити висновок, що характеристики боєприпасів залежать не тільки від їх конструкції, раціональність якої обґрунтовується при проектуванні, але й від їхнього технічного стану, який у процесі тривалого зберігання має тенденцію погіршуватися. Таким чином, початкові характеристики засобів ураження, які

досягаються на етапах проектування та серійного виробництва, під впливом кліматичних факторів з часом повільно видозмінюються. Це явище необхідно враховувати при оцінюванні якості боєприпасів, реалізації програм подовження терміну їх експлуатації, плануванні створення їх запасів.

Литература

1. Carlucci D., Jacobson S. Ballistics – theory and design of guns and ammunition. 1 st ed. US: CRC Press; 2008. – 512 p.
2. Lanz W., Odermatt W., Weihrauch G. Kinetic energy projectiles: development history, state of the arts, trends. 19th International Symposium on Ballistics, Interlaken (CH), 2001.
3. Анипко О.Б., Бусяк Ю.М. Внутренняя баллистика ствольных систем при применении боеприпасов длительного хранения. – Харьков: Академия внутренних войск МВД Украины, 2010. – 130 с.
4. Гончаренко П.Д., Катасонов Ю.І., Хайков В.Л. Моделювання процесів вражаючої дії артилерійських боєприпасів з використанням комп'ютерного обчислювального експерименту. – Севастополь: Академія військово-морських сил імені П.С. Нахімова, 2012. – 215 с.
5. Запорожец В.И., Афанасенко Ф.П. Теоретические основы испытаний и контроля качества боеприпасов. – СПб: БГТУ «Военмех», 2008. – 315 с.
6. Козырев А.В., Соловьев В.С. Эффекты неидеальности иницирования и распространения детонации в снаряжении боеприпасов как фактор снижения стабильности характеристик их поражающего действия. / Наука и образование. № 11, ноябрь 2011. Электронный интернет ресурс – <http://www.Tehnomag/edu.ru/doc/291153.html>.
7. Zecevic B., Terzic J., Catovic A., Serdarevic-Kadic S. Characterization of distribution parameters of fragment mass and number for conventional projectiles./ New Trends in research of Energetic Materials, Czech Republic, 2011. Электронный интернет ресурс www.Dtd/ba/portal/index2.php.

Bibliography (transliterated)

1. Carlucci D., Jacobson S. Ballistics – theory and design of guns and ammunition. 1 st ed. US: CRC Press; 2008. – 512 p.
2. Lanz W., Odermatt W., Weihrauch G. Kinetic energy projectiles: development history, state of the arts, trends. 19th International Symposium on Ballistics, Interlaken (CH), 2001.
3. Anipko O.B., Busyak Yu.M. Vnutrennyaya ballistika stvolnyih sistem pri primeneni boepripasov dlitel'nogo hraneniya. – Harkov: Akademiya vnutrennih voysk MVD Ukrainyi, 2010. – 130 p.
4. Goncharenko P.D., Katasonov Yu.I., Haykov V.L. Modelyuvannya protsesiv vrazhayuchoyi diyi artileriysskih boepripasiv z vikoristannyam komp'yuternogo obchislyval'nogo eksperimentu. – Sevastopol: Akademiya viyskovo-morskih sil imeni P.S. Nahimova, 2012. – 215 p.
5. Zaporozhets V.I., Afanasenko F.P. Teoreticheskie osnovyi ispytaniy i kontrolya kachestva boepripasov. – SPb: BGTU «Voenmeh», 2008. – 315 p.

6. Kozyrev A.V., Solovev V.S. Effekty neidealnosti initsirovaniya i rasprostraneniya detonatsii v snaryazhenii boepripasov kak faktor snizheniya stabilnosti harakteristik ih porazhayuschego deystviya. / Nauka i obrazovanie. # 11, noyabr 2011. Elektronnyy internet resurs – [http: www. Tehnomag/edu.ru/doc/291153. html](http://www.Tehnomag/edu.ru/doc/291153.html).

7. Zecevic B., Terzic J., Catovic A., Serdarevic-Kadic S. Characterization of distribution parameters of fragment mass and number for conventional projectiles./ New Trends in research of Energetic Materials, Czech Republic, 2011. Elektronnyy internet resurs [www. Dtd/ba/portal/index2.php](http://www.Dtd.ba/portal/index2.php).

УДК 623.417

Гончаренко П.Д., Щепцов А.В.

ИЗМЕНЕНИЕ КАЧЕСТВА ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ИХ ДЛИТЕЛЬНОМ ХРАНЕНИИ

Показана зависимость свойств бризантных взрывчатых веществ от их плотности. Изменение физико-химического состояния бризантных взрывчатых веществ при длительном хранении, а также влияние этих изменений на основные тактические характеристики боеприпасов.

Goncharenko P.D., Scheptsov A.V.

CHANGES IN EXPLOSIVE MATERIALS QUALITY WHEN THEIR LONG – TERM STORAGE

The article displays the dependency of HEM's properties from their density. Changes in HEM's physical and chemical state when their long – term storage as well as the influence of these changes on ammunition's tactical characteristics and technical parameters.

Тихомирова Т.С., Быканов С.Н., Горбунова О.В.

РАЗДЕЛЬНЫЙ СБОР ТВЕРДЫХ БЫТОВЫХ ОТХОДОВ: ОПЫТ И ПЕРСПЕКТИВЫ В УКРАИНЕ

Введение

Проблема уменьшения количества бытового мусора на полигонах остро стоит в Украине последние 20 лет. Она связана с постоянно увеличивающимся объемом твердых бытовых отходов (ТБО), складируемых на полигонах, а также с переполненностью самих старых полигонов и отсутствием строительства новых [1]. Общая площадь полигонов для ТБО в Украине составляет, по официальным данным, 7,4 тыс. га (без учета несанкционированных свалок). Однако эксперты называют цифру в несколько десятков раз больше – более 160 тысяч гектаров земли переданы под полигоны для мусора, на которых хранится около 35 млрд. тонн отходов [2]. Плюс каждый год создается более 10 тысяч незаконных мусорных свалок, и, по самым скромным оценкам, 4 % территории Украины находятся под свалками. Проблему утилизации ТБО могли бы решить мусороперерабатывающие и мусоросжигающие заводы, но из 3х построенных на территории Украины только 1 (в Киевской области) на сегодня функционирует, но только на 50 % проектной мощности. Основная причина – дисбаланс в тарифах, ведь переработать 1 тонну мусора стоит на 30 % дороже, чем просто отвезти ее на полигон. Тем не менее, Украина не единственная страна в мире, столкнувшаяся с подобной проблемой. При этом существует несколько способов существенно уменьшить количество ТБО на полигонах, которые успешно опробованы как в развитых, так и развивающихся странах. Среди всех способов необходимо выделить главный – это раздельный сбор ТБО с последующей переработкой в новые изделия пластика, бумаги, стекла и металла.

Цель работы

Целью данной работы является разработка реальной программы внедрения раздельного сбора ТБО, который может быть реализован силами территориальных объединений граждан при минимальной финансовой поддержки со стороны государства. Также в работе приведены результаты собственных социологических исследований и результаты внедрения информационных проектов, связанных с раздельным сбором ТБО.

Основные проблемы внедрения раздельного сбора ТБО в Украине

Среди всех причин отсутствия действительно раздельного сбора ТБО в Украине можно выделить следующие:

- 1) отсутствие государственной информационно политике по данному вопросу – официальные публикации и комментарии носят периодический, несистематический характер и появляются только в связи с крупными экологическими акциями, днем экологии или чрезвычайного происшествия, связанного с ТБО (или полигоном);
- 2) отсутствие источников финансирования для установки нескольких мусорных контейнеров для раздельного сбора ТБО;

3) отсутствие системы штрафов за неразделенный выброс ТБО наравне с отсутствием поощрений за отдельный сбор ТБО для жильцов;

4) незаинтересованность местных властей в отдельном сборе ТБО;

5) отсутствие экономических механизмов взаимодействия между частными предпринимателями (ЧП) готовых вывозить на переработку многие виды ТБО и предприятиями, которые такую переработку осуществляют;

6) низкий уровень экологического образования и самосознания у населения, в том числе среди школьников и студентов.

Подробно остановимся на 5 и 6 пункте. Скрытой проблемой внедрения отдельного сбора ТБО является, в 75 % случаев, невозможность ЧП, который за свои деньги установил контейнеры для отдельного сбора ТБО и который сам его вывозит, получить расчет за вторсырье сразу «на проходной» завода, который перерабатывает данный вид ТБО. Например, в Харьковской области, только один крупнейший завод по производству стеклянной тары, производит расчет за бывшее в употребление стекло «день в день». Остальные стекольные заводы работают по принципу отсрочки платежа на 30–45 дней. Такая же ситуация практически со всеми предприятиями, покупающими полимерные отходы для их вторичной переработки. При этом более 95 % предприятий различных форм собственности не имеют в своей структуре отделов транспортной логистики, в связи с чем, почти вся потенциальная прибыль от продажи вторсырья уходит на горюче-смазочные материалы.

О низкой экологической культуре населения уже написано не мало [3], тем не менее, за последние несколько лет произошел качественный скачок в общественном мнении касательно вопросов отдельного сбора мусора (табл. 1, приведены результаты для различных возрастов).

Проанализировав факторы, которые привели к этому, авторы выделили основной – информационная кампания, развернутая на центральных ТВ-каналах, информирующая населения о европейском подходе к решению проблем, связанных с мусором. Очень эффективным, согласно проведенных авторами исследований, стал призыв не выбрасывать использованные батарейки вместе с обычным мусором, а относить их в специальные контейнеры или устанавливать такие контейнеры самостоятельно с целью дальнейшей передачи накопленных батареек специальным предприятиям. Так, за 5 лет, число пунктов приема батареек возросло в 25 раз, такие пункты появились в школах, магазинах, офисах крупных компаний.

Особенно существенным является изменение готовности населения всех возрастов сортировать мусор при создании условий для этого (практически в два раза для молодых людей, табл. 1) и готовность установить мусорные ведра у себя дома для отдельного сбора пищевых отходов.

Программа внедрения отдельного сбора мусора с целью его дальнейшей переработки

Для эффективного внедрения отдельного сбора ТБО в г. Харькове и Харьковской области авторы разработали и предлагают следующую программу, состоящую из ____ пунктов.

Шаг 1. Анализ фракционного состава мусора, который выбрасывают жильцы в зависимости от расположения дома и возраста проживающих людей. Для экономии бюджетных средств на проведение подобного мониторинга можно привлекать студентов в рамках научных исследований, как собственно и поступили авторы статьи. При этом студенты становятся важным звеном в развитии и реализации программы, что повышает их активность и развивает научный потенциал.

Таблица 1 – Результаты социологического опроса населения Харькова в 2011 и 2016 годах

Формулировка вопроса	Варианты ответов, в % от общего числа опрошенных								
	Скорее да, чем нет			Возможно, если будет материальный стимул			Скорее нет, чем да		
	до 35 лет	35–55 лет	старше 55 лет	до 35 лет	35–55 лет	старше 55 лет	до 35 лет	35–55 лет	старше 55 лет
Вы выбрасываете отдельно ПЭТ-бутылки в специальные контейнеры ² ?	$\frac{60^1}{85}$	$\frac{50}{75}$	$\frac{10}{25}$	$\frac{30}{10}$	$\frac{40}{15}$	$\frac{70}{50}$	$\frac{10}{05}$	$\frac{10}{10}$	$\frac{20}{25}$
Вам известно как сортируют мусора в других странах?	$\frac{50}{76}$	$\frac{62}{95}$	$\frac{30}{65}$	–	–	–	$\frac{50}{24}$	$\frac{38}{05}$	$\frac{70}{35}$
Готовы вы установить отдельные мусорные ведра дома для пищевых отходов и пластика	$\frac{28}{63}$	$\frac{15}{52}$	$\frac{25}{35}$	$\frac{56}{25}$	$\frac{35}{40}$	$\frac{45}{55}$	$\frac{16}{12}$	$\frac{50}{08}$	$\frac{30}{10}$
Вы готовы сортировать мусор, если возле домов будут установлены специальные контейнеры?	$\frac{20}{45}$	$\frac{30}{55}$	$\frac{16}{28}$	$\frac{25}{35}$	$\frac{40}{35}$	$\frac{48}{58}$	$\frac{55}{20}$	$\frac{30}{10}$	$\frac{36}{14}$
Вы знаете стоимость вторичных материалов	$\frac{55}{75}$	$\frac{18}{32}$	$\frac{35}{85}$	–	–	–	$\frac{45}{25}$	$\frac{82}{68}$	$\frac{65}{15}$

Примечание: 1) числитель для 2011 года, знаменатель для 2016

2) опрос проводился возле крупнейших торговых точек в г. Харькове в выходные дни в летний период, опрошено 5500 людей, статистическая погрешность не более 2,8 %

Подобный анализ необходим также для образовательных, социальных и медицинских учреждений различного уровня. Собственные исследования показали (табл. 2), что отдельный контейнер для упаковки типа Тетра Пак нет необходимости устанавли-

вать возле каждого подъезда даже многоэтажного относительно «молодого» дома, а для районов с «хрущовками» таких контейнеров достаточно установить 2 в разных концах улиц. Возле школ необходимо установить контейнеры и для Тетра Пак (в столовых продают соки в таких упаковках), и для алюминиевых банок и для ПЭТ-бутылок и для одноразовых полиэтиленовых пакетов. Возле точек общественного «уличного» питания контейнер для одноразовой посуды необходим большего размера, чем например, возле многоквартирных домов. Рациональный подход к установке контейнеров помогает сэкономить финансовые ресурсы, а в будущем оптимизировать транспортные потоки, т.н. логистику.

Таблица 2 – Фракционный состав ТБО в различных точках

Описание контрольной точки	Распределение по фракциям, %							
	ПЭТ-тара	Стекло	Тетра Пак	Бумага	Одноразовая посуда	Полиэтилен (пакеты)	Пищевые отходы	Другое
Пятиэтажные дома типа «хрущовка», средний возраст проживающих старше 55 лет ¹	2	12	1	3	—	8	25	49
Многоквартирный многоэтажный дом, средний возраст проживающих до 55 лет	8	22	4	6	5	18	22	15
Школа ²	15	1	25	15	2	20	12	10
Уличный fast food	20	6	10	10	30	2	7	15
Частный сектор	3	18	1	8	10	12	13	35

Примечание: 1) усредненные данные по 5ти районам города Харькова

2) фракционный состав ТБО в школах сильно зависит от ассортимента, предлагаемого в столовой и близлежащих магазинах и ларьках

Шаг 2. Создание единой базы предприятий и предпринимателей в г. Харькове и области, занимающихся вторичной переработкой ТБО. База должна быть открытой и доступной, на разных носителях (электронный вариант, размещенный в сети Интернет; бумажный справочник), содержать точную информацию о контактных лицах и условиях сотрудничества. Анализ, проведенный авторами, показал, что даже при современных технологиях поиска невозможно получить исчерпывающую информацию, например о

минимально необходимых объемах вторичного сырья, которое принимает перерабатывающее предприятие и условиях оплаты. Или об объемах отсортированного мусора, которые забирает посредник, а также о формах сотрудничества.

Шаг 3. Создание муниципального механизма финансовой поддержки ЧП, занимающихся сбором и доставкой отсортированных ТБО. Т.е., ЧП привез отсортированные ТБО на перерабатывающее предприятие и сразу получил положенную сумму денег. А перерабатывающее предприятие на эту сумму денег получило от города беспроцентный кредит, который погашается после реализации изготовленной из вторичного сырья продукции. Такой механизм достаточно сложен в реализации из-за громоздких бухгалтерских проводок и несовершенных норм налогообложения, однако при определенных условиях весьма практичен. В рамках создания эффективных экономических рычагов для стимулирования раздельного сбора ТБО авторам не представляется целесообразным повышение оплаты за не отсортированный мусор с населения. В отечественных экономических реалиях уровень неплатежей за коммунальные услуги и так составляет более 10 % [4]. Помимо финансовой поддержки ЧП необходимо предусмотреть и внедрить на уровне государства льготное налогообложение для перерабатывающих ТБО предприятий. Наиболее эффективным мировым опытом является освобождение от уплаты НДС и снижение ставки на прибыль (в том числе до 0%) для товаров, произведенных из ТБО (в том числе полуфабрикатов).

Шаг 4. Альтернативный шагу 3. В условиях Харьковской области целесообразным является создание общегородского и нескольких областных пунктов-накопителей отсортированного вторичного сырья. Такие пункты находятся в коммунальной собственности. Городские власти не занимаются сортировкой и вывозом отсортированных ТБО, а накапливают их с целью дальнейшей продажи переработчикам. Расчет с поставщиками отсортированных ТБО происходит также сразу после доставки отходов. Таким образом естественным путем сокращается объем ТБО, поступающий на полигоны для складирования, что в условиях отсутствия мусоросжигательного завода и финансирования на строительство нового современного полигона в Харьковской области является хорошим выходом из ситуации. При этом пункты-накопители не требуют капитального строительства и могут быть расположены в не эксплуатирующихся помещениях заводов, ангаров или складов (при условии оснащения их системами оповещения о возгорании или задымлении и системами пожаротушения).

Шаг 5. «Зеленый тариф» на топливо для перевозки отсортированного мусора. Это шаг может быть реализован несколькими путями:

- 1) льготный тариф на топливо для перевозчиков отсортированных ТБО
- 2) лизинг автомобилей на альтернативном топливе (газ, электромобили)

В долгосрочной перспективе второй путь является более выгодным, так как при льготных тарифах на обычное топливо кто-то, в данном случае бюджет города и области, все равно вынужден покрывать затраты на предоставляемую льготу. Передача в лизинг автомобилей на альтернативном топливе позволяет не тратить финансовые ресурсы каждый год и помогает делать воздух в городе чище.

Шаг 6. Информационная компания с целью популяризации идеи раздельного сбора мусора среди населения. Такая компания должна четко показать выгоду жильцов от раздельного сбора ТБО. Т.е. вырученные от продажи для переработки ТБО средства должны направляться на благоустройство придомовой территории, ремонт подъездов и т.д. Прозрачным и привлекательным такой механизм становится при объединении граждан в ОСМД. Муниципальные власти в качестве рекламного хода могут предоставить контейнеры для раздельного сбора мусора на льготных условиях и таким образом продемонстрировать заинтересованность в решении проблемы. Также при проведении кампании возможно наглядно демонстрировать произведенные из вторичного сырья изделия и предлагать их населению по себестоимости. Например, те же контейнеры для некоторых видов ТБО могут быть изготовлены из вторичных полимерных материалов.

Выводы

Главными шагами на пути реализации концепции раздельного сбора ТБО в Украине является не системность принимаемых решений и отсутствие «дорожной карты» решения проблемы. Предложенные авторами шаги могут послужить опорными точками при составлении стратегии решения проблемы, особенно учитывая тот факт, что они базируются на реальных исследованиях. Основным авторы считают шаг 1 и шаг 3 или шаг 4. В данной статье не приведены механизмы уменьшения количества ТБО на полигонах путем снижения потребления всевозможных упаковочных материалов, пакетов и прочее, что также является основополагающим элементом концепции устойчивого развития мегаполисов. Такие исследования проведены и их результаты будут опубликованы.

Литература

1. Матвеев Ю.Б., Пухнюк А.Ю. Полигоны бытовых отходов: ситуация и перспективы // Твердые бытовые отходы, № 6.– 2013.– С. 37–42.
2. Проект Тасис – Совершенствование системы управления твердыми бытовыми отходами в Донецкой области Украины : Пособие по мониторингу полигонов ТБО. Thales E&C – GKW – Consult –271 с.
3. Тихомирова Т.С., Стадник В.Ю. Екологічне виховання школярів шляхом створення екологічних клубів: власний досвід // Матеріали ІІ Всеукр. науково-техн. конф. «Актуальні проблеми науково-промислового комплексу регіонів». – Рубіжне: видавець О.Зень, 2016. – С. 158–159.
4. Долги населения по оплате услуг ЖКХ растут каждый месяц // код доступа http://banker.ua/bank_news/govregulations/2015/03/31/1180473023/dolgi-naselenija-popolate-uslug-zhkkh-rastut-kazhdyy-mesjac/.

Bibliography (transliterated)

1. Matveev Yu.B., Puhnyuk A.Yu. Poligonyi byitovyih othodov: situatsiya i perpektivy // Tverdyie byitovyie othodyi, # 6.– 2013.– P. 37–42.

2. Proekt Tasis – Sovershenstvovanie sistemyi upravleniya tverdyimi bytovyimi othodami v Donetskoy oblasti Ukrainyi : Posobie po monitoringu poligonov TBO. Thales E&C – GKW – Consult –271 p.

3. Tihomirova T.S., Stadnik V.Yu. Ekologichne vihovannya shkolyariv shlyahom stvorennia ekologichnih klubiv:vlasniy dosvid // Materiali II Vseukr. naukovu-tehn. konf. «Aktualni problemi naukovu-promislovogo kompleksu regioniv». – Rubizhne: vidavets O.Zen, 2016. – P. 158–159.

4. Dolgi naseleniya po oplate uslug ZhKH rastut kazhdyiy mesyats // kod dostupa http://banker.ua/bank_news/govregulations/2015/03/31/1180473023/dolgi-naseleniya-po-oplate-uslug-zhkkh-rastut-kazhdyj-mesjac/.

УДК 658

Тихомирова Т.С., Биканов С.М., Горбунова О.В.

РОЗДІЛЬНИЙ ЗБІР ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ: ДОСВІД ТА ПЕРСПЕКТИВИ В УКРАЇНІ

У статті розглянуті основні економічні та соціальні складові, що впливають на повільне поширення роздільного збору твердих побутових відходів в Україні в цілому і в Харківській області зокрема. Проаналізовано дані власних досліджень про причини, які негативно впливають на впровадження роздільного збору побутового сміття в Харківській області. Запропоновано реальні економічні і соціальні важелі для вирішення поставленої проблеми.

Tykhomyrova T.S., Bykanov S.N., Gorbunova O.V.

HOUSEHOLD WASTES SEPARATING: EXPERIENCE AND PROSPECTS IN UKRAINE

The main economic and social components that influence the slow spreading of separate collection of household waste in Ukraine in general and in the Kharkiv region in particular is considered. The data of own researches about the reasons which negatively influence introduction of separate gathering of household dust in the Kharkov area are analyzed. Real economic and social levers are proposed to solve the problem.

«ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Ежеквартальный научно-практический журнал

Редколлегией к опубликованию принимаются статьи по следующим научным направлениям:

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

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

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

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

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ:

Размер бумаги А4 (210х297 мм); левое и правое поля – 25 мм, верхнее и нижнее – 30 мм; рекомендуемый шрифт Times New Roman Суг; размер шрифта – 12; межстрочный интервал – 1.

ПОРЯДОК РАЗМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛА:

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

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

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

АДРЕС РЕДКОЛЛЕГИИ

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

Тел. (057) 707-69-58.

Факс (057) 720-22-95.

Email: gor.kona2016@gmail.com

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

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

Наукове видання

Щоквартальний науково-практичний журнал

ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

2'2017

Технічний редактор *К. О. Горбунов*

Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики, телебачення
та радіомовлення України: Серія КВ № 5212 від 18.06.2001 р.

Підп. до друку 19.06.2017 р. Формат 60 × 84 1/8. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 5,2. Наклад 300 пр. 1-й з-д 1–60.
Зам. № 110. Ціна договірна.

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

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3657 від 24.12.2009 р.