

УДК 624.57:661.53

Бабиченко А.К., Тошинский В.И., Красников И.Л., Подустов М.А.

### ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОФОРМЛЕНИЕ БЛОКА ВТОРИЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ КРУПНОТОННАЖНЫХ АГРЕГАТОВ СИНТЕЗА АММИАКА

К одним из самых энергоемких процессов в химической промышленности относится производство аммиака. Поэтому основная тенденция его развития на современном этапе связана с повышением энергетической эффективности. Среди особо энергоемких участков крупнотоннажных агрегатов синтеза серии АМ1360 по проекту ГИАП, являющихся базовыми для постсоветского пространства, следует выделить блок вторичной конденсации, потребление электроэнергии в котором в основном за счет использования в схеме аммиачного турбокомпрессорного холодильного агрегата (АТК) составляет около 40% от общего объема потребляемого агрегатом. Исключение из схемы АТК холодопроизводительностью 4,88 МВт как раз и является одной из основных задач повышения энергоэффективности агрегата синтеза, позволяющей обеспечить снижение потребления электроэнергии на 3 тыс.квт.ч.

Наиболее эффективным способом решения поставленной задачи является утилизация низкопотенциальной теплоты. Такой подход нашел отражение в использовании в схеме блока вторичной конденсации двух теплоиспользующих абсорбционно-холодильных установок (АХУ) холодопроизводительностью 6,28 МВт, которые совместно с АТК обеспечивают охлаждение циркуляционного газа до регламентной температуры не более 0°C с целью выделения продукционного аммиака. При этом работа АХУ связана с утилизацией теплоты материальных потоков сравнительно высокого потенциала – свыше 100 °С, которая практически полностью используется в агрегате. Однако имеется в достаточно большом количестве неиспользуемая теплота очень низкого потенциала (менее 100 °С) и, в частности, теплота водяных паров турбоприводов с давлением 0,04 МПа и температурой 90 °С, на охлаждение которых в цикле отделения парообразования затрачивается дополнительно электроэнергия на привод вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения (АВО).

Анализ существующих энергосберегающих технологий свидетельствует о возможности утилизации столь низкого потенциала в циклах парозежекторных холодильных установок (ПХУ), работающих на легкокипящем веществе [1]. В качестве хладагента, как нельзя кстати в аммиачном производстве, может быть использован тот же аммиак, широкое применение которого в циклах ПХУ различных отраслей промышленности ограничивалось его вредными свойствами.

Ранее проведенные исследования [2,3] позволили сделать заключение о возможности отключения АТК с обеспечением регламентной температуры вторичной конденсации в осенне-зимний период при температуре атмосферного воздуха ниже 0 °С и работе двумя АХУ на два испарителя вследствие снижения тепловой нагрузки по циркуляционному газу за счет уменьшения его температуры до 37 °С на входе блока вторичной конденсации. Внедрение этого предложения на одном агрегате позволило сэкономить более 7 млн. кВт электроэнергии [4]. Поэтому дальнейшие исследования и разработки были направлены на создание энерготехнологического оформления блока вторичной конденсации, обеспечивающего на его входе снижение тепловой нагрузки по циркуляционному газу.

Результаты исследований по эксплуатации блока вторичной конденсации позволили установить, что в летний период максимальная температура циркуляционного га-

за на входе блока не превышает 50 °С, а значит, необходимое снижение температуры должно составлять не более 15 °С. Расчет холодопроизводительности, результаты которого представлены в табл. 1 в соответствии с апробированной в промышленных условиях методикой [5] показал, что для обеспечения такого снижения требуется установка высокотемпературного испарителя с температурой кипения хладагента 29 °С при давлении  $P_H = 1,154$  МПа перед конденсационной колонной (рис. 1), включенного в схему ПХУ холодопроизводительностью не более 7,8 МВт (6,7 Гкал/ч). При этом, со стороны выхода циркуляционного газа из высокотемпературного испарителя будет и достаточно высокая разность температур 6 °С, соответствующая реальным условиям эксплуатации испарителей блока вторичной конденсации.

Таблица 1 – Результаты расчета потребной холодопроизводительности ПХУ по проектным и эксплуатационным показателям циркуляционного газа на входе блока вторичной конденсации

Водо-род	Состав, % об.				Расход, $\text{м}^3/\text{ч}$	Давление, МПа	Температура, °С		Холодо-производительность, МВт
	Азот	Метан	Аргон	Аммиак			Вход	Выход	
53,25	17,84	13	4,61	11,3	666990	30	50	35	7,8
56,0	18,9	8,3	6,9	9,9	632450	23	50	37	7,0*

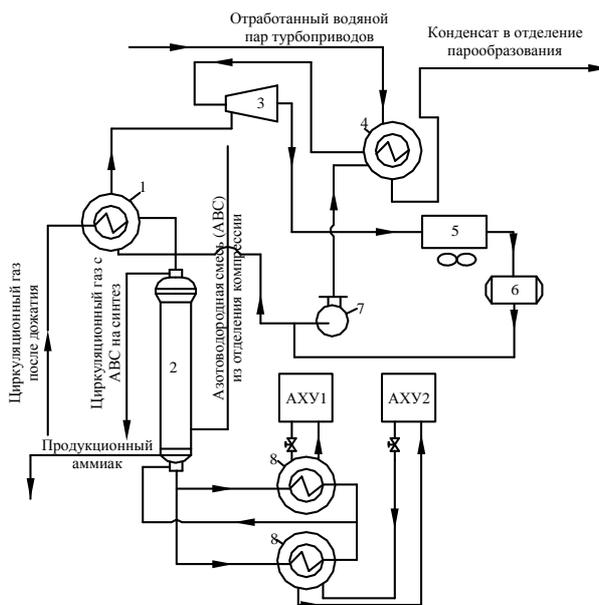


Рисунок 1 – Энергосберегающее технологическое оформление блока вторичной конденсации [7]

Как известно, работа ПХУ обеспечивается паровым эжектором 3, парогенератором 4, конденсатором 5 с воздушным охлаждением, ресивером жидкого аммиака 6 и насосом 7 подачи жидкого хладагента в парогенератор. Эксплуатация ПХУ с повышенным давлением кипения аммиачного хладагента в испарителе 1 позволяет повысить коэффициент инжекции цикла ПХУ. Величина достижимого коэффициента инжекции ( $\mu$ ) струйного компрессора определялась в соответствии с хорошо отработанным на практике алгоритмом [6]. Вследствие применения в ПХУ аппаратов АВО коэффициент ( $\mu$ ) устанавливался по величине достижимого давления сжатия  $P_C$ , значение которого ограничивалось давлением 1,6 МПа, что позволит даже в летний период обеспечить высокую температуру (40 °С) конденсации паров аммиака после струйного компрессора. При этом степень сжатия  $P_C/P_H$  и давление сжатия определялись по уравнению:

$$\frac{P_C}{P_H} = \frac{k_1 \lambda_{PH} + \varphi_3 \frac{P_{PH}}{\Pi^* k q_{PH}} + u \sqrt{\theta} \left[ k_2 \lambda_{H2} + \varphi_3 \frac{P_{H2}}{\Pi^* k q_{H2}} \right] - (1 - u \sqrt{\theta}) \lambda_{C3}}{\varphi_3 \Pi_{C3} \left[ \frac{P_{PH}}{\Pi^* k q_{PH}} + u \sqrt{\theta} \frac{1}{\Pi^* k q_{PH}} \right]}, \quad (1)$$

где  $\Pi^* = [2/(k+1)]^{1/(k-1)}$  – приведенное давление при приведенной изотропной скорости  $\lambda$  равной критической, т.е при  $\lambda=1$ ;  $\varphi_3=0,9$  – экспериментальный коэффициент;  $k_1=0,834$ ,  $k_2=0,812$  – коэффициенты скорости рабочего и инжектируемого потоков по экспериментальным данным;  $k$  – показатель адиабаты;  $\sqrt{\theta}$  – отношение критических скоростей рабочего и инжектируемого потоков;  $P_{PH}$ ,  $q_{PH}$ ,  $\lambda_{PH}$  – газодинамические функции (приведенное давление, приведенные изоэнтропная и массовая скорости) во входном сечении цилиндрической камеры смешения;  $P_{P5}$ ,  $q_{P5}$ ,  $\lambda_{P5}$  – газодинамические функции при втором предельном давлении в условном сечении цилиндрической камеры смешения, где скорость инжектируемого потока не должна превышать критическую;  $P_{P2}$ ,  $q_{P2}$ ,  $\lambda_{P2}$  – газодинамические функции инжектируемого потока во входном сечении цилиндрической камеры смешения;  $P_{C3}$ ,  $q_{C3}$ ,  $\lambda_{C3}$  – газодинамические функции в выходном сечении цилиндрической камеры смешения.

В результате расчета величина коэффициента инжекции составила 0,5, что позволяет обеспечить инжекцию паров аммиака из высокотемпературного испарителя в количестве 24 т/ч рабочим аммиачным паром из парогенератора с давлением 3 МПа в количестве до 48 т/ч. При этом, общее количество паров хладагента и рабочего пара на воздушные конденсаторы (АВО) составит 72 т/ч, конденсация которых может быть осуществлена согласно проектных показателей шестью АВО с потреблением электроэнергии до 1200 кВт.ч. Количество отработанного водяного пара, требуемого для получения рабочего пара в парогенераторе, определялся по формуле:

$$G_{ВП} = G_{АП} r_A / r_{ВП}; \quad (2)$$

$$G_{ВП} = 48 * 250 / 550 = 22 \text{ т/ч},$$

где  $G_{ВП}$  – количество водяного пара, т/ч;  $G_{АП}$  – количество рабочего аммиачного пара, т/ч;  $r_A$  – удельная теплота парообразования аммиака при температуре 65 °С и давлении 3 МПа, ккал/кг;  $r_{ВП}$  – удельная теплота конденсации водяного пара трубопроводов, ккал/кг.

За счет такой утилизации возможно отключение одного из трех воздушных вентиляторов конденсаторов отработанного водяного пара турбины компрессора технологического воздуха с потреблением электроэнергии 100 кВт.ч. Работа блока вторичной конденсации по предложенной схеме позволяет исключить из схемы АТК и обеспечить работу каждой их АХУ на свой испаритель 8 и увеличить в летний период общую холодопроизводительность холодильных систем до 14 МВт (12 Гкал/ч). Для существующего в Украине агрегата синтеза (по такой схеме эксплуатируются три агрегата) снижение потребления электроэнергии составит:

$$N = N_1 + N_2 + N_3 - N_4 - N_5 - N_6, \quad (3)$$

где  $N_1 = 3000$  кВт.ч – расход электроэнергии для обеспечения работы АТК по существующей схеме;  $N_2 = 300$  кВт.ч – расход электроэнергии на привод вентиляторов воздушных конденсаторов отработанного водяного пара турбин компрессора технологического воздуха в существующей схеме;  $N_3 = 800$  кВт.ч – расход электроэнергии на привод вен-

тиляторов воздушных конденсаторов для конденсации аммиака в цикле АТК по существующей схеме;  $N_4 = 80$  кВт.ч – расход электроэнергии на привод насоса жидкого аммиака в схеме ПХУ по разработанной технологии;  $N_5 = 1200$  кВт.ч – расход электроэнергии на привод вентиляторов воздушных конденсаторов для конденсации паров аммиака в цикле ПХУ по разработанной технологии;  $N_6 = 200$  кВт.ч – расход электроэнергии на привод вентиляторов воздушных конденсаторов отработанного водяного пара турбин компрессора технологического воздуха по разработанной технологии.

$$N = 3000 + 300 + 800 - 80 - 1200 - 200 = 2620 \text{ кВт.ч}$$

При стоимости электроэнергии для промышленного производства 240 грн. за 1 тыс.кВт.ч и среднегодовой работе агрегата 4000 часов в условиях повышенной температуры атмосферного воздуха (весенне-летний период) экономический эффект для действующего агрегата синтеза АМ1360 составит более 2,5 млн. грн.

Таким образом, разработанное энерготехнологическое оформление впервые в условиях аммиачного производства позволяет утилизировать низкопотенциальное тепло с уровнем температур менее 100 °С и повысить энергоэффективность за счет снижения потребления электроэнергии более чем на 2,5 тыс.кВт.ч.

#### Литература

1. Кошкин Н.Н., Сакун И.А., Бамбушек Е.Н. и др. Холодильные машины. Учебн. для вузов. – Л.: Машиностроение. – 1985. – 510 с.

2. Бабиченко А.К. Исследование эффективности эксплуатации участка вторичной конденсации агрегата синтеза аммиака от температуры атмосферного воздуха // Вестник Харьковского государственного политехнического университета – 1999. – Вып. 26. – с. 96–99.

3. Бабиченко А.К., Ефимов В.Т., Василенко В.П. и др. Повышение эффективности работы системы охлаждения циркуляционного газа в агрегатах синтеза большой единичной мощности // Химическая технология. – 1983. – №3. – с. 17–18.

4. Способ регулирования производительности агрегата синтеза аммиака: А.с. 1002756 СССР / Бабиченко А.К., Ерощенко С.А. и др. – Оpubл. в Б.И., 1983, № 9.

5. Ефимов В.Т., Бабиченко А.К., Ерощенко С.А. Повышение эффективности работы абсорбционных холодильных установок в агрегате синтеза аммиака большой мощности // Холодильная техника. – 1979. – № 2. – с. 23–26.

6. Соколов Е.Я., Зингер Н.М. Струйные аппараты. – М. – 1989. – 350 с.

7. Установка для виробництва аміаку: Патент №20992. Україна, МПК 7F25B15/02, C01C1/04, F25B 49/00 /Бабіченко А.К., Гошинський В.І., Бабіченко Ю.А. – №200609938; Заявл. 15.02.2007; Оpubл. 15.02.2007, Бюл. №2.

#### Bibliography (transliterated)

1. Koshkin N.N., Sakun I.A., Bambushek E.N. i dr. Holodilnyie mashinyi. Uchebn. dlya vtuzov. – L.: Mashinostroenie. – 1985. – 510 p.

2. Babichenko A.K. Issledovanie effektivnosti ekspluatatsii uchastka vtorich-noy kondensatsii agregata sinteza ammiaka ot temperatury atmosfernogo vozduha Vestnik Harkovskogo gosudarstvennogo politehnicheskogo universiteta – 1999. – Vyip. 26. – p. 96–99.

3. Babichenko A.K., Efimov V.T., Vasilenko V.P. i dr. Povyishenie effektivno-sti raboty sistemyi ohlazhdeniya tsirkulyatsionnogo gaza v agregatah sinteza bolshoy edinichnoy moschnosti Himicheskaya tehnologiya. – 1983. – #3. – p. 17–18.

4. Sposob regulirovaniya proizvoditelnosti agregata sinteza ammiaka: A.s. 1002756 SSSR Babichenko A.K., Eroschenkov S.A. i dr. – Opubl. v B.I., 1983, # 9.

5. Efimov V.T., Babichenko A.K., Eroschenkov S.A. Povyishenie effektivnosti robotyi absorbtionnyih holodilnyih ustanovok v agregate sinteza ammiaka bolshoy moschnosti Holodilnaya tehnika . – 1979. – # 2. – p. 23–26.

6. Sokolov E.Ya., Zinger N.M. Struynnye apparaty.– M.– 1989. – 350 p.

7. Ustanovka dlya virobnitstva amiaku: Patent #20992. Ukrayina, MPK 7F25B15/02, C01C1/04, F25B 49/00 /Babichenko A.K., Toshinskiy V.I., Babichenko Yu.A. – #200609938; Zayavl. 15.02.2007; Opubl. 15.02.2007, Byul. #2.

УДК 624.57:661.53

Бабіченко А.К., Тошинський В.І., Красніков І.Л., Подустов М.О.

### **ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧЕ ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОФОРМЛЕННЯ БЛОКУ ВТОРИННОЇ КОНДЕНСАЦІЇ КРУПНОТОНАЖНИХ АГРЕГАТИВ СИНТЕЗУ АМІАКУ**

Проведений аналіз існуючого енерготехнологічного оформлення процесу вторинної конденсації аміаку. Узагальнені результати досліджень, що дозволило вперше здійснити утилізацію низкопотенціальної теплоти з рівнем температури менше 100 °С. Створена енергозберігаюча технологія забезпечує зниження споживання електроенергії на 2,5, тис.кВт.год в процесі охолодження циркуляційного газу у блоці вторинної конденсації за рахунок виключення із схеми аміачного турбокомпресорного холодильного агрегату.

УДК 621.51

Крутиков Г.А.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЛАСТИ РАЦИОНАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕЙ СХЕМЫ ПНЕВМОПРИВОДА

В работе [1] представлена энергосберегающая схема пневмопривода (ПП) с торможением путем изменения структуры коммутационных связей. Однако для эффективного использования предлагаемой структуры ПП необходимо определить область параметров и условий работы, при которых целесообразен переход к таким структурам. Подобные оценки удобно проводить не в области физических параметров, а в области некоторых критериев подобия, позволяющих минимизировать объем расчетов на ЭВМ. В качестве таких критериев подобия выступают три критерия:  $B$  – критерий инерционности,  $\chi$  – параметр нагрузки,  $\Omega$  – относительная эффективная площадь выпускного тракта [2].

$$B = \frac{P_M \cdot F_1}{L \cdot m} \cdot t_0^2; \quad \chi = \frac{P}{P_M \cdot F_1}; \quad \Omega = \frac{f_2^3}{f_1^3}, \quad (1)$$

где  $P_M$  – давление питания;  $L$  – полный ход поршня;  $m$  – масса подвижных частей;  $F_1$  – площадь поршня со стороны рабочей полости;  $P$  – статическая нагрузка;  $f_1^3, f_2^3$  – эффективные площади впускного и выпускного трактов;  $t_0$  – базовая единица времени.

$$t_0 = \frac{F_1 \cdot L}{f_1^3 \cdot a_M}, \quad (2)$$

где  $a_M = \sqrt{KRT_M}$  – скорость звука при температуре воздуха в магистрали  $T_M$ .

Для определения области рационального использования энергосберегающих схем пневмоприводов, отражающих диаметрально противоположный подход к выбору способа торможения (схема № 1 и схема № 2 в [1]). В первой схеме заложен принцип минимизации единовременных затрат при создании схемы, а во второй схеме – принцип минимизации эксплуатационных затрат. Расчеты охватывали достаточно широкую область существования пневмоприводов, представленную пространством изменения критериев подобия  $B$  и  $\chi$  при  $\Omega = 1$ . На рис. 1, 2, 3 и 4 даны графики, отражающие зависимость относительного массового количества сжатого воздуха  $M_s$ , осредненного за цикл, КПД привода  $\eta$ , транспортного времени срабатывания  $\tau_t$  и безразмерного тормозного пути  $\xi_t$  от критерия инерционности  $B$  и параметра статической нагрузки  $\chi$ . Значения безразмерных параметров  $M_s$  и  $\eta$  даны в работе [1].

Из сопоставления полученных кривых видно, что практически во всей исследуемой области схема № 2 обеспечивает более высокое быстродействие, несмотря на более плавный режим торможения.

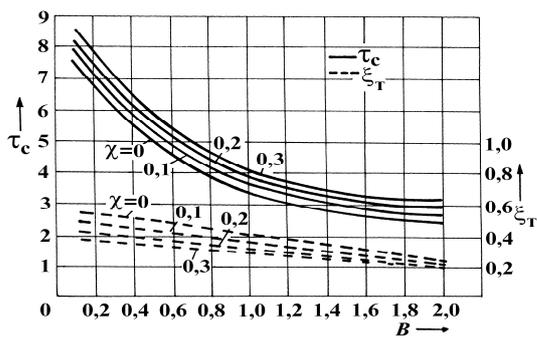


Рисунок 1

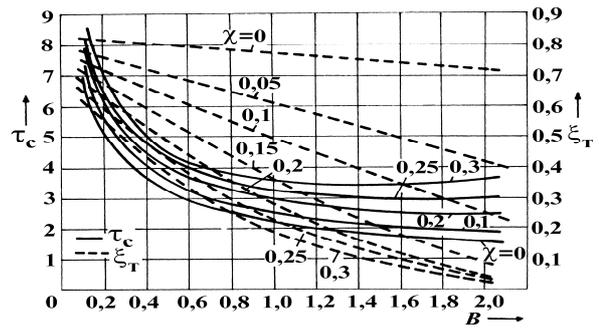


Рисунок 2

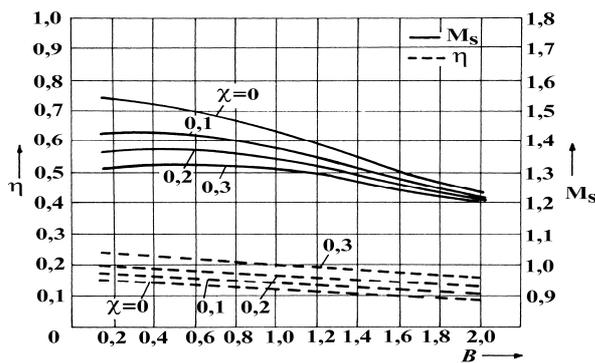


Рисунок 3

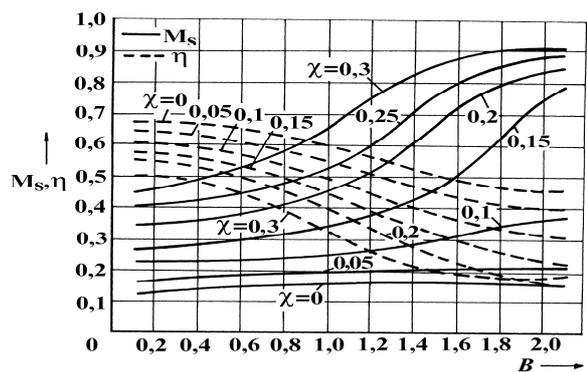


Рисунок 4

Схема № 2 обеспечивает безусловное снижение энергозатрат по сравнению со схемой № 1 во всей области существования пневмоприводов. Наиболее существенное снижение энергозатрат достигается при  $\chi = 0 \div 0,1$ , а при  $\chi = 0,15 \div 0,3$  существенно лишь при большой инерционной нагрузке ( $B = 0,1 \div 0,5$ ). При больших значениях  $\chi$  ( $\chi > 0,3$ ) и больших значениях  $B$  ( $B > 1,5$ ) использование пневмопривода с энергосберегающей структурой становится нецелесообразным, т.к. не приводит к существенному снижению энергозатрат. Эта область отличается наличием большой встречной нагрузки и малой инерционной нагрузкой. Более низкий КПД приводов, работающих по схеме № 2, в этой области объясняется, во-первых, отсутствием рекуперации в сеть из-за малого тормозного пути, во-вторых, недостаточно полным расширением сжатого воздуха в рабочей полости. Кроме того, меняется сам характер доминирующих энергозатрат. В фазе разгона используется, в основном, транзитная работоспособность сжатого воздуха (работа проталкивания), когда воздух выступает лишь как связующее кинематическое звено между компрессором и пневмоцилиндром. Основной вид потерь этой работоспособности – потери на дросселирование. В фазе торможения для привода со схемой № 2, когда отсекается приток сжатого воздуха в рабочую полость, используется и потенциальная энергия сжатого воздуха. Чем длиннее тормозной путь, тем полнее используется эта составляющая работоспособности сжатого воздуха. С увеличением параметра  $B$  (уменьшением инерционности) возрастает скорость движения поршня и сокращается тормозной путь. При этом потери на дросселирование растут. Кроме того, увеличиваются в процентном отношении потери, связанные с неполнотой расширения сжатого воздуха. На рис. 5 представлен график, отражающий рост этих потерь с увеличением  $B$ .

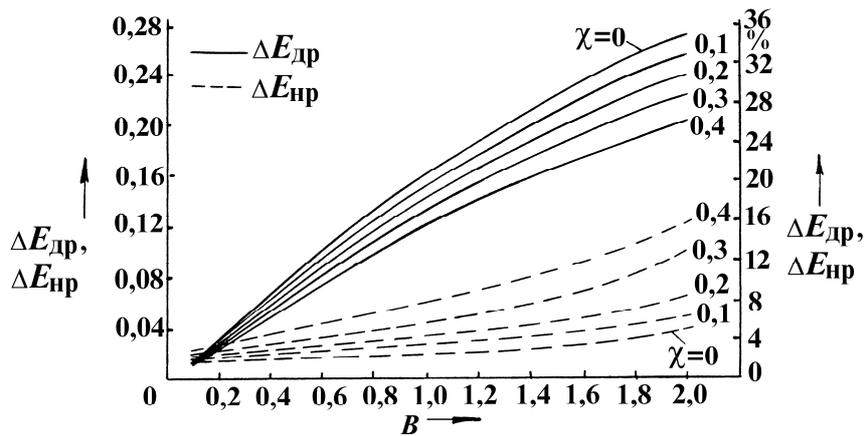


Рисунок 5

Наращение потерь на дросселирование ( $\Delta E_{др}$ ) с ростом  $B$  происходит почти по линейному закону. Например, при  $\chi = 0,1$  с увеличением  $B$  от 0,1 до 2,0 потери на дросселирование в абсолютном выражении возрастают почти в 20 раз, составляя 1/3 часть от всей работоспособности потока сжатого воздуха, т.е. становятся основным видом потерь. Рост потерь из-за неполноты расширения ( $\Delta E_{нр}$ ) не так стремителен (пунктирные линии на рис. 5), но также весьма существенен для  $\chi = 0,1$  с ростом  $B$  от 0,1 до 2,0 эти потери увеличились почти в 3,6 раза.

Графики на рис. 1–4 позволяют произвести не только предварительный расчет времени срабатывания и тормозного пути, но и расчет экономической целесообразности использования энергосберегающей структуры привода.

Пример расчета: пневмопривод поворота колонны манипулятора работает с цикличностью 0,2 мин, присоединенная к штоку масса подвижных частей  $m = 1080$  кг, статическая нагрузка  $P = 450$  Н, диаметр поршня  $D = 100$  мм ( $F_1 = 0,00785$  м<sup>2</sup>), давление в магистрали сжатого воздуха  $P_M = 5 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>, ход поршня  $L = 0,6$  м, температура сжатого воздуха в магистрали  $T_M = 393$  К, эффективная площадь впускного тракта  $f_1^э = \mu_\Sigma f_{тр} = 0,71 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>.

1. Определим базовую единицу времени:

$$t_0 = \frac{F_1 \cdot L}{f_1^э \cdot \sqrt{K \cdot R \cdot T_M}} = \frac{0,00785 \cdot 0,6}{0,71 \cdot 10^{-4} \cdot 343} = 0,196 \text{ с.}$$

2. Определим критерий инерционности:

$$B = \frac{P_M \cdot F_1}{L \cdot m} \cdot t_0^2 = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 0,785 \cdot 10^{-2}}{0,6 \cdot 1080} \cdot 0,0384 = 0,23.$$

3. Определим параметр нагрузки:

$$\chi = \frac{P}{P_M \cdot F_1} = \frac{450}{5 \cdot 10^5 \cdot 0,00785} = 0,114.$$

По графику на рис. 1, 3 определяют для схемы № 1 безразмерное время срабатывания  $\tau = 7$ ,  $M_s = 1,42$ ,  $\eta = 0,17$ . Для схемы № 2 в соответствии с графиками 2, 4  $\tau = 5,3$ ,  $M_s = 0,23$ ,  $\eta = 0,6$ . Таким образом, размерное время срабатывания для 1-й и 2-й схем соответственно  $t = t_0 \cdot \tau = 1,37$  с. и 0,98 с. Экономия сжатого воздуха за один цикл  $\Delta M = (M_{s1} - M_{s2}) \cdot F_1 \cdot L = (1,42 - 0,23) \cdot 0,00785 \cdot 0,6 = 0,0056 \text{ м}^3$ . В течение 8-часового рабочего дня пневмопривод совершает 2400 срабатывания. Экономия сжатого воздуха  $0,0056 \text{ м}^3 \cdot 2400 = 13,44 \text{ м}^3$  в сутки.

#### Литература

1. Крутиков Г.А. Разработка энергосберегающей структуры пневмопривода с торможением в конце хода // Интегровані технології та енергозбереження. – Харків НТУ «ХПІ», –2007.– № 1 – С. 3–10.

2. Крутиков Г.А., Кудрявцев А.И., Пекарь Л.А. К вопросу выбора способа торможения пневмоприводов с большими присоединенными массами // Пневматика и гидравлика. М.: Машиностроение. 1987. Вып. 13. С. 51–58.

#### Bibliography (transliterated)

1. Krutikov G.A. Razrabotka energosberegayuschey strukturyi pnevmoprivoda s tormozheniem v kontse hoda Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv NTU «HPI», –2007.– # 1 – p. 3–10.

2. Krutikov G.A., Kudryavtsev A.I., Pekar L.A. K voprosu vyibora sposoba tormozheniya pnevmoprivodov s bolshimi prisoedinennymi massami Pnevmatika i gidravlika. M.: Mashinostroenie. 1987. Vyip. 13. p. 51–58.

УДК 621.51

Крутиков Г.А.

### **ВИЗНАЧЕННЯ ОБЛАСТІ РАЦІОНАЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОЇ СХЕМИ ПНЕВМОПРИВОДУ**

Спираючись на безрозмірні критерії подоби пневмоприводу побудовані номограми за допомогою яких можливий оперативний розрахунок часу спрацювання, масової кількості стиснутого повітря, що споживається пневмоприводом і його ККД. Запропонована методика дозволяє зробити кількісну оцінку ефективності використання енергозберігаючих схем пневмоприводу.

УДК 621.165.51

Скляр В.П.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО ПАРА ПРИ НЕРАВНОВЕСНОМ РАСШИРЕНИИ В ПАРОВЫХ ТУРБИНАХ

Вопрос определения КПД влажнопаровых ступеней турбин связан, помимо всего прочего, с точностью определения основных термодинамических параметров влажного пара (давления  $P$ , термодинамической температуры  $T$ , степени сухости  $x$ , удельного объема).

За последней ступенью турбины пар может находиться в одном из трех состояний:

- перегретом;
- насыщенном;
- переохлажденном.

Перегретый пар характеризуется повышенной температурой относительно температуры насыщения. Влажность такого пара равна нулю.

Насыщенный пар имеет температуру, равную температуре насыщения, а его влажность равна или близка к диаграммной.

Температура переохлажденного пара всегда ниже температуры насыщения, а влажность либо равна нулю (полное переохлаждение), либо значительно ниже диаграммной (частичное переохлаждение). По мере нарастания переохлаждения, в паровом потоке всегда образуется некоторое количество влаги, однако, теплоты, выделяющейся при этом, не достаточно, чтобы нагреть пар до температуры насыщения. Как правило, при расширении в проточной части турбины до возникновения спонтанной конденсации влажность пара остается близкой к нулю [1]. Поэтому состояние частичного переохлаждения в проточной части турбины можно рассматривать как переходное, существующее в течение очень короткого времени при скачке конденсации, когда влажность возрастает от нуля до, практически, диаграммной. В данной работе рассматривается только случай полностью переохлажденного пара.

Для построения процесса расширения пара в  $i,S$ -диаграмме необходимо знать значения энтальпии  $i''$  и энтропии  $S$  в конечной точке процесса.

Если в зоне перегретого пара достаточно определить только температуру пара и давление, то в зоне ниже линии насыщения в случае равновесного процесса расширения необходимо знать еще степень сухости (или влажность) пара. В случае неравновесного расширения (расширения с переохлаждением) для построения процесса в  $i,S$ -диаграмме необходимо знать значения энтальпии и энтропии пара в метастабильном состоянии ( $i''_m, S_m$ ).

Реальные процессы расширения в проточной части турбины вблизи линии насыщения, как правило, протекают с переохлаждением [1,2]. Поэтому важно уметь определять термодинамические параметры переохлажденного пара. Величина переохлаждения пара в проточной части турбины может достигать 35 °С. Переохлаждение пара может сохраняться и за последней ступенью турбины, достигая 10–15 °С [3]. Степень сухости переохлажденного пара остается равной единице вплоть до возникновения спонтанной конденсации. Благодаря этому обстоятельству можно рассчитать значения энтальпии и энтропии переохлажденного пара.

Однако, для этого необходимо знать значения теплоты фазового перехода для переохлажденного пара. В таблицах теплофизических свойств воды и водяного пара [4,5] приведены значения теплоты испарения (фазового перехода) только на линии насыщения.

Поскольку давление переохлажденного пара выше, чем давление насыщенного пара при температуре, соответствующей переохлажденному пару, то значения теплоты фазового перехода для насыщенного и переохлажденного пара при одной и той же температуре будут различны.

Например, давление насыщенного пара при температуре  $20^{\circ}\text{C}$   $P_s \approx 2,3$  кПа (удельный объем  $v'' = 57,833$  м<sup>3</sup>/кг), а давление пара, переохлажденного на  $35^{\circ}\text{C}$  и имеющего такую же температуру ( $20^{\circ}\text{C}$ ), соответственно равно  $P_m \approx 15,7$  кПа, т.е. в  $\approx 7$  раз больше (удельный объем  $v'' = 8,532$  м<sup>3</sup>/кг). Измерить значение теплоты фазового перехода переохлажденного пара не представляется возможным. Из всех необходимых параметров можно измерить только давление пара и его температуру [3]. Рассмотрим каким образом, измерив давление и температуру пара, можно определить значение теплоты фазового перехода переохлажденного пара расчетным путем.

Теплота фазового перехода насыщенного пара

$$r = i_s'' - i'$$

где  $i_s''$  – энтальпия насыщенного пара при давлении насыщения  $P_s$  (табличное значение);  $i'$  – энтальпия воды, нагретой до температуры насыщения;

Аналогично, теплота фазового перехода переохлажденного пара

$$r_m = i_{sm}'' - i_{tm}' \tag{1}$$

где  $i_{sm}''$  – энтальпия переохлажденного пара;  $i_{tm}'$  – энтальпия воды, нагретой до температуры переохлажденного пара.

Для пояснения формулы (1) рассмотрим процесс получения переохлажденного пара, показанный на рисунке 1. При нагреве воды от  $0^{\circ}\text{C}$  до температуры  $t_s$  (точка 1) ее энтальпия  $i_s' = c_p' \cdot t_s$ , где  $c_p'$  – средняя теплоемкость воды в интервале температур  $0^{\circ}\text{C} - t_s$ . При достижении температуры  $t_s$  вода испаряется, в результате чего образуется сухой насыщенный пар, а энтальпия увеличивается на величину теплоты испарения –  $r_s$  (точка 2), т.е. энтальпию сухого насыщенного пара можно записать как

$$i_s'' = i_s' + r_s$$

Если понизить температуру пара до  $t_m$ , но так, чтобы конденсация не происходила и пар оставался сухим (точка 3), его энтальпия уменьшится на величину  $\Delta i''$

$$\Delta i'' = c_{pm} (t_s - t_m),$$

где  $c_{pm}$  – средняя теплоемкость пара в интервале температур  $t_s - t_m$ .

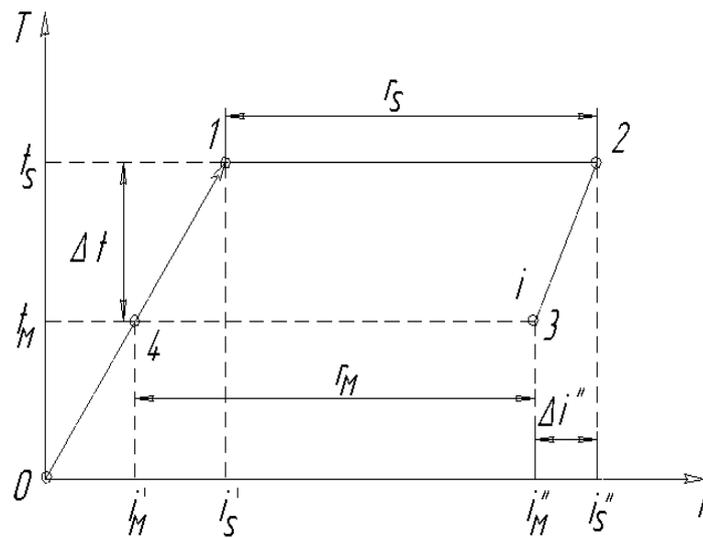


Рисунок 1 – Процесс получения переохлажденного пара

Таким образом, в точке 3 имеем переохлажденный пар, энтальпия которого

$$i_m'' = i_s'' - \Delta i''$$

или

$$i_m'' = i_s'' - c_{pM}(t_s - t_m). \quad (2-a)$$

Проведем мысленный эксперимент. Допустим, что нам удалось после нагрева воды до температуры  $t_m$ , испарить воду при том же давлении  $P_s$ . Для испарения воды в этом случае потребуется другое количество тепла –  $r_m$ . В результате получим пар с той же температурой и с тем же давлением, что и в предыдущем случае, т.е. переохлажденный пар.

В этом случае энтальпия пара

$$i_m'' = i_m' + r_m. \quad (2-б)$$

Поскольку параметры пара в точке 3 не зависят от способа получения пара, уравнения (2а) и (2б) тождественны.

Таким образом, теплота фазового перехода переохлажденного пара может быть определена как

$$r_m = i_s'' - c_p' \cdot t_m - c_{pM}(t_s - t_m) = i_s'' - i_m' - c_{pM}(t_s - t_m). \quad (3)$$

Уравнение (3) позволяет определить теплоту фазового перехода переохлажденного пара, используя табличные значения  $i_s''$  – энтальпии пара на линии насыщения для заданного давления и теплоемкостей воды  $c_p'$  и пара  $c_p$ . В качестве примера на рис. 2

приведены зависимости теплоты фазового перехода водяного пара при разных давлениях от величины переохлаждения  $\Delta T_{\text{пер}}$ .

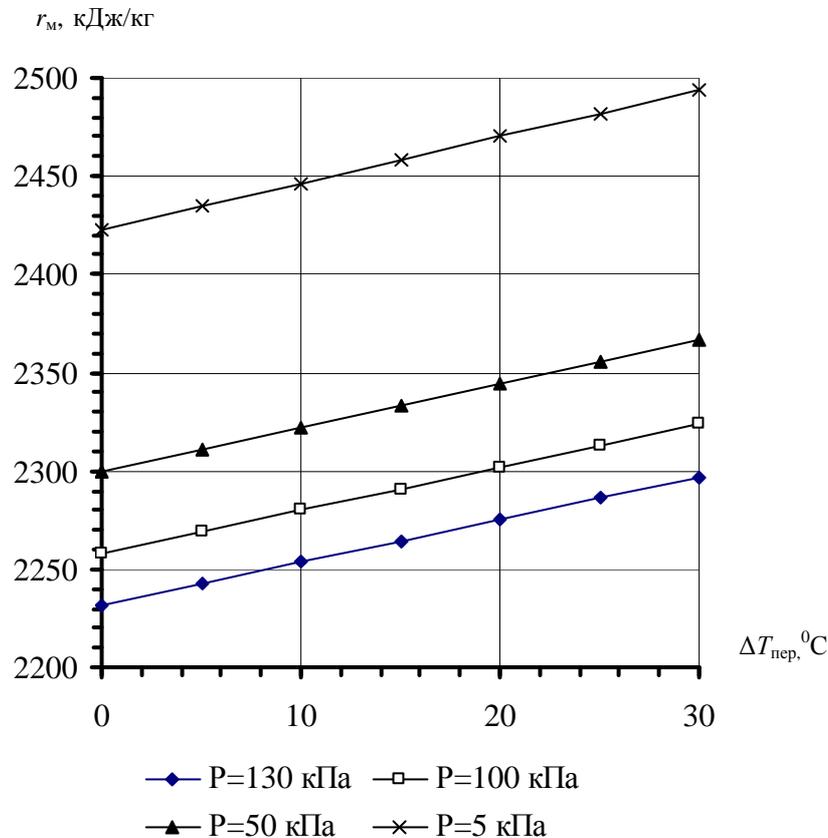


Рисунок 2 – Зависимость теплоты фазового перехода  $r_m$  водяного пара от величины переохлаждения при  $P = \text{const}$  для разных давлений

Из рис. 2 видно, что при величине переохлаждения  $30^\circ\text{C}$  теплота фазового перехода возрастает на  $\sim 65$  кДж/кг во всем приведенном диапазоне давлений (130–5 кПа).

В паровых турбинах зона влажного пара располагается в области давлений 130–3 кПа. Теплоемкость воды в интересующей нас области, практически, не зависит от давления. Поэтому значение энтальпии  $i'_m$  можно принимать равным  $i'_s$  и его можно находить по таблицам для температуры насыщения, равной температуре переохлажденного пара.

Значение теплоты фазового перехода может быть также определено по упрощенной формуле (4)

$$r_m = r + d \cdot \Delta t, \quad (4)$$

где  $r$  – теплота фазового перехода на линии насыщения при заданном давлении;  $\Delta t$  – величина переохлаждения пара;  $d$  – поправочный коэффициент определяется по рис. 3 и может быть рассчитан по формуле (5).

$$d = \frac{r_m - r}{\Delta t}, \quad (5)$$

$r_m$  – теплота фазового перехода, рассчитанная по формуле (3).

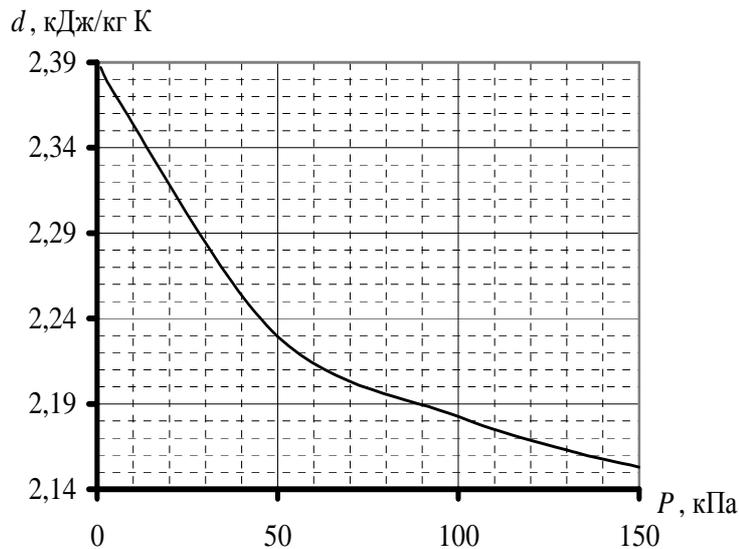


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента  $d$  от давления водяного пара

Определив значение теплоты фазового перехода переохлажденного пара, можно вычислить значение энтальпии по уравнению (2б) и энтропии по ниже приведенной формуле (6).

Энтропия переохлажденного пара

$$S_m'' = c_p' \ln \frac{T_m}{273,15} + \frac{r_m}{T_m}. \quad (6)$$

Поскольку значение теплоемкости воды  $c_p'$  изменяется при изменении давления и температуры, целесообразно использовать табличные значения энтальпии воды для температуры, равной температуре переохлажденного пара. В этом случае формула (6) преобразуется к виду

$$S_m'' = \frac{i_m}{T_m - 273,15} \ln \frac{T_m}{273,15} + \frac{r_m}{T_m}. \quad (7)$$

По вычисленным значениям энтальпии и энтропии переохлажденного пара определяется конечная точка процесса расширения в  $i, S$ -диаграмме. Из формул (6), (7) следует, что увеличение теплоты фазового перехода  $r_m$  при одновременном снижении температуры  $T_m$  приводит к возрастанию энтропии переохлажденного пара.

В качестве примера на рис. 4 приведены зависимости энтальпии и энтропии водяного пара от величины переохлаждения при постоянном давлении  $P = 40$  кПа.

Из рис. 4 видно, что переохлаждение пара сопровождается уменьшением энтальпии при одновременном возрастании энтропии. Это явление вызывает увеличение потерь и снижает КПД турбинных ступеней, работающих в зоне переохлажденного пара, что должно учитываться при проектировании и анализе работы действующих турбин.

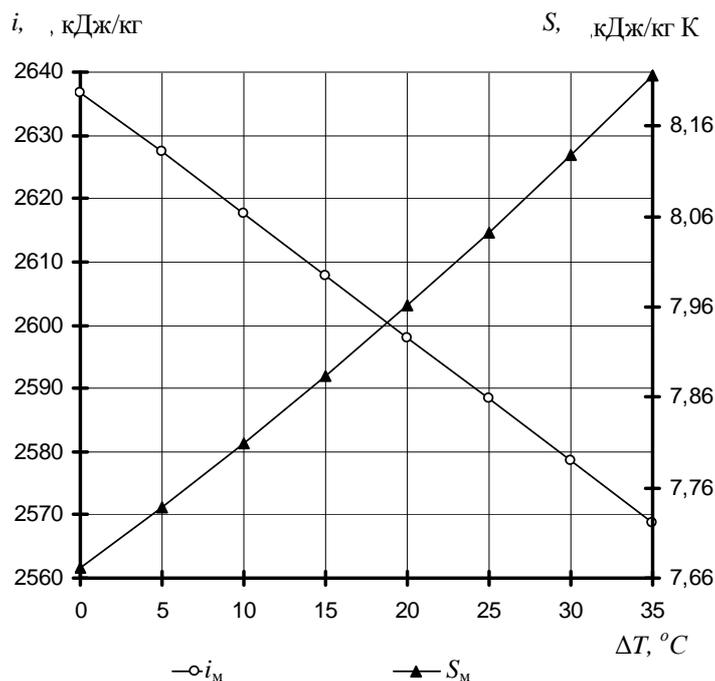


Рисунок 4 – Зависимость энтальпии  $i_m$  и энтропии  $S_m$  водяного пара от величины переохлаждения

#### Литература

1. Качуринер Ю.Я. Расчет потерь от влажности в ступенях влажнопаровых турбин // Труды ЦКТИ. –2002. – Вып.283. – С. 85–96.
2. Скляр В.П. Влияние объемного заряда на величину переохлаждения парового потока за последней ступенью турбины /В.П. Скляр, А.А. Тарелин, В.П. Орловский // Проблемы машиностроения. – 2004. – Т.7, №1. – С. 4–11
3. Скляр В.П. Измерение температуры влажного парового потока в паровых турбинах // Пробл. машиностроения. – 2005. – Т8, №3. – С. 8–16.
4. Вукалович М.П. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара. – М.; Л.: Энергия, 1965. – 400 с.
5. Ривкин С.Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара / С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – М.: Энергия, 1980. – 424 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Kachuriner Yu.Ya. Raschet poter ot vlazhnosti v stupenyah vlazhnoparovyih tur-bin Trudyi TsKTI. –2002. – Vyip.283. – p. 85–96.
2. Sklyarov V.P. Vliyanie ob'emnogo zaryada na velichinu pereohlazhdeniya parovogo potoka za posledney stupenyu turbinyi /V.P. Sklyarov, A.A. Tarelin, V.P. Orlov-skiy Problemy mashinostroeniya. – 2004. – T.7, #1. – p. 4–11
3. Sklyarov V.P. Izmerenie temperaturyi vlazhnogo parovogo potoka v parovyih turbinah Probl. mashinostroeniya. – 2005. – T8, #3. – p. 8–16.
4. Vukalovich M.P. Tablitsyi termodinamicheskikh svoystv vodyi i vodyanogo para. – M.; L.: Energiya, 1965. – 400 p.
5. Rivkin S.L. Teplofizicheskie svoystva vodyi i vodyanogo para S.L. Rivkin, A.A. Aleksandrov. – M.: Energiya, 1980. – 424 p.

УДК 621.165.51

Скляр В.П.

**ВИЗНАЧЕННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ  
ПЕРЕОХОЛОДЖЕНОЇ ПАРИ  
ПРИ НЕРІВНОВАГОМУ РОЗШИРЕННІ В ПАРОВИХ ТУРБІНАХ**

Запропоновано підхід к визначенню теплоти фазового переходу, ентальпії та ентропії переохолодженої пари за обмірюваним значенням тиску та термодинамічної температури пари в парових турбінах. На прикладі розрахунку показано, що переохолодження пари веде до росту теплоти фазового переходу та до збільшення ентропії.

УДК 66.045.1

Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А.<sup>1</sup>, Перевертайленко А.Ю.<sup>1</sup>, Хавин Г.Л.<sup>1</sup>,  
Бухкало С.И.

## ПЛАСТИНЧАТЫЕ ТЕПЛООБМЕННЫЕ АППАРАТЫ В ПРОЦЕССАХ ПРОИЗВОДСТВА ХЛЕБОПЕКАРНЫХ ДРОЖЖЕЙ

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»,  
<sup>1</sup>АО «Содружество–Т»*

В течение последних пятидесяти лет пластинчатые теплообменные аппараты получили широкое распространение во многих отраслях пищевой промышленности включая производство хлебопекарных дрожжей.

Следует отметить, что основные позиции применения пластинчатых теплообменных аппаратов – тепловая обработка мелассных растворов, поддержание температуры в дрожжерастильных аппаратах, охлаждение последрожжевой бражки после сепарации, охлаждение дрожжевого концентрата в зависимости от схем производства хлебопекарных дрожжей.

Хлебопекарные дрожжи представляют собой биомассу живых дрожжевых клеток, способных сбразивать сахаросодержащие среды. Основным сырьём для производства прессованных хлебопекарных дрожжей является меласса – побочный продукт свекло-сахарного производства. Меласса представляет собой сиропообразную жидкость темно-бурого цвета со специфическим вкусом и запахом. Меласса является источником ростовых веществ. Это комплекс термоустойчивых витаминов, перешедших в мелассу из свеклы (биотин, пантотеновая кислота, инозит).

Тепловая обработка мелассных растворов зачастую проводится в пластинчатых пастеризационно-охладительных установках. В этих установках проводят быструю тонкослойную пастеризацию либо стерилизацию, мелассных растворов в закрытом потоке, их кратковременную выдержку и последующее охлаждение.

Тонкослойная тепловая обработка в закрытом потоке обеспечивает соответствующие санитарно-гигиенические условия и является важным фактором, обеспечивающим выход качественной продукции. Основным элементом пластинчато-пастеризационной установки является пластинчатый теплообменный аппарат, состоящий из секции нагрева продукта до температуры пастеризации, секции регенерации, в которой происходит рекуперация тепла пастеризованного продукта продуктом, поступающим на пастеризацию, и секции охлаждения. Нагрев продукта после секции регенерации до температуры пастеризации осуществляется, как правило, горячей водой. Принципы конструкции современных пластинчато-пастеризационных аппаратов описаны в [1].

Сам процесс пастеризации происходит в выдерживателе. Выдерживатель представляет собой отдельный аппарат, состоящий из совокупности трубчатых секций. В отдельных случаях выдерживатель выполняется в виде пакета пластин и является секцией пластинчато-пастеризационного аппарата, например, аппарат P141-RB фирмы Альфа-Лаваль.

В основе производства дрожжей лежит способность дрожжевых клеток размножаться и накапливать биомассу в жидких питательных средах при оптимальных условиях жизнедеятельности.

Одной из важнейших стадий производства хлебопекарных дрожжей является стадия выращивания посевных и товарных дрожжей. Независимо от структуры технологических схем, выращивание дрожжей предусматривается в три генерации (рис. 1): получение маточных дрожжей чистой культуры практически без посторонней микрофлоры (генерация А), получение засевных дрожжей (генерация Б), получение товарных дрожжей (генерация В) [2].

Маточными называют дрожжи, которые используют для засева питательной среды при получении засевных дрожжей. Засевные дрожжи служат посевным материалом при получении товарных дрожжей. Товарные дрожжи – это готовый к использованию продукт, отвечающий требованиям соответствующего стандарта.

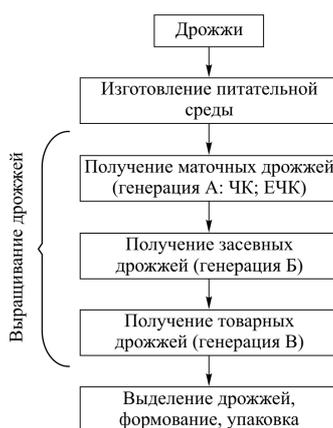


Рисунок 1 – Функциональная схема получения дрожжей

Производство товарных дрожжей осуществляют в дрожжерастильных аппаратах вместимостью 100 м<sup>3</sup> воздушно-проточным способом. Продолжительность процесса выращивания 12–20 ч и более. Для выращивания дрожжей используют два дрожжерастильных аппарата: основной и отборочный. В основном аппарате осуществляется рост и размножение дрожжевых клеток, накапливается биомасса (накопительный период). В отборочном аппарате – происходит созревание дрожжевых клеток.

Дрожжерастильные аппараты для выращивания товарных дрожжей предназначены для накопления и получения биомассы при периодическом и непрерывном способе культивирования организмов при температуре культуральной жидкости в аппарате на уровне 30 °С [2,3]. Для поддержания температуры культуральной среды в аппарате используется система охлаждения дрожжерастильного аппарата, в которой используется охлаждающая вода [3]. По конструкции системы охлаждения дрожжерастильные аппараты товарных дрожжей делятся на аппараты с охлаждающей рубашкой и аппараты с выносными теплообменниками и с комбинированным охлаждением. В аппаратах советской конструкции типа ВДА применяется рубашка охлаждения, встроенная непосредственно в аппарат, для аппаратов «Прессиндустрия» (Италия) – выносные пластинчатые теплообменники, для польских дрожжерастильных аппаратов «Полимэкс» и шведских SIA применяется комбинированная система – охлаждающая рубашка и выносные теплообменники.

К основным недостаткам рубашек охлаждения можно отнести большую сложность очистки поверхности теплообмена от загрязнений, а также проблемы, возникающие при коррозионном воздействии охлаждающей воды и культуральной жидкости. Имели место случаи выхода из строя рубашек охлаждения аппаратов ВДА из-за корро-

зии, в результате чего пришлось применять выносные теплообменники. Применение пластинчатых теплообменников в качестве выносных позволило повысить эффективность охлаждения культуральной среды в дрожжерастильных аппаратах. Принципиальная схема охлаждения культуральной среды с использованием пластинчатого теплообменника представлена на рис. 2.

Дозревание дрожжей завершает процесс их выращивания. От стадии дозревания в значительной степени зависит качество хлебопекарных дрожжей. В процессе дозревания дрожжевые клетки ассимилируют питательные остаточные вещества субстрата, завершается процесс их почкования. Во время дозревания ферментные системы клетки перестраиваются с активного синтеза биомассы на обменные процессы, поддерживающие лишь жизнедеятельность клетки.



Рисунок 2 – Схема охлаждения культуральной среды с использованием выносного пластинчатого теплообменника:  
1 – дрожжерастильный аппарат; 2 – насос; 3 – пластинчатый теплообменник

Наряду с созреванием дрожжей в отборочном аппарате может накапливаться до 10–12 % биомассы. Общий объем отборочного дрожжерастильного аппарата должен составлять не менее одной трети объема основного.

Дозревшие в отборочном чане дрожжи поступают на сепараторы для выделения их из культуральной среды. Обычно используют трехступенчатое сепарирование, предусматривающее отделение бражки с одновременной подачей воды, промывание дрожжей и сгущение дрожжевого молока. Для промывки применяют холодную воду. Промытое и сгущенное до концентрации 450–700 г/л дрожжевое молоко с температурой 6–8 °С поступает в сборник с мешалками, где охлаждается до температуры 4–6 °С и подается на фильтрпрессы или вакуум-фильтры для удаления остатков промывной воды.

В качестве выносных пластинчатых теплообменников применяются разборные аппараты. К основным преимуществам использования разборных пластинчатых теплообменников можно отнести следующие:

- высокая тепловая эффективность;
- компактность и малое пространство для сервисного обслуживания;
- возможность изменения площади поверхности теплопередачи пакета путем изменения числа пластин пакета;
- возможность изменения общего проходного сечения по полостям путем соответствующего расположения специальных ходовых пластин в пакете при наличии коллекторных отверстий на подвижной плите;

- простота обслуживания, как при производстве механической чистки, так и промывкой чистящим раствором на месте (CIP).

Одной из главных характеристик пластинчатых теплообменных аппаратов является конструкция пластин. Основным элементом пластины является гофрированное теплопередающее поле пластины. Множество штампованных гофр пластин обеспечивает движение потоков в каналах сложной геометрической формы, что позволяет увеличить турбулентность потока в канале, оборудованном соседними пластинами и, следовательно, повысить коэффициент теплоотдачи.

Большинство типоразмеров современных пластинчатых теплообменников выпускаются, по крайней мере, с двумя вариантами пластин, которые имеют различные углы раскрытия гофр (рис. 3).

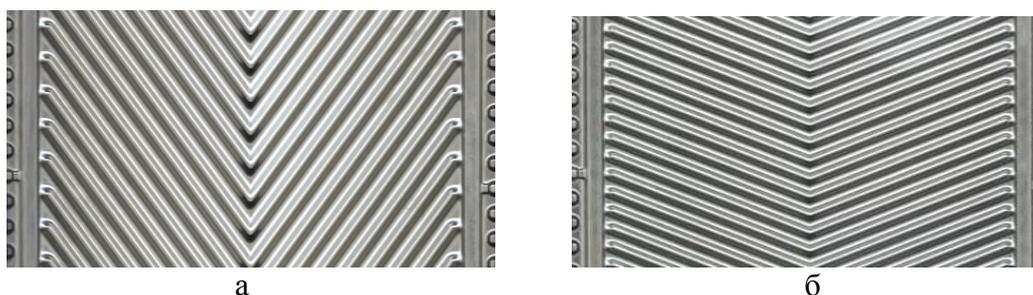


Рисунок 3 – Гофрировка пластин разборного теплообменного аппарата

При сборке пластин в пакет образуются каналы сетчато-поточного типа, а соседние пластины контактируют вершинами гофр. В пакете пластин можно сформировать различные типы каналов, приведенные на рис. 4.

Пластины с меньшим углом раскрытия шеврона (рис. 3а) в пакете образуют каналы с меньшим уровнем теплоотдачи потока и с меньшим гидравлическим сопротивлением или каналы типа L (рис. 4а). Пластины с большим углом раскрытия шеврона (рис. 3б) в пакете образуют каналы с большим уровнем теплоотдачи потока, но и с большим гидравлическим сопротивлением или каналы типа Н (рис. 4в). При комбинации пластин с разными углами раскрытия шеврона образуется канал типа ML/МН (рис. 4б), обеспечивающий промежуточные значения теплоотдачи и гидравлического сопротивления. В пакете пластинчатого теплообменника целесообразно использование каналов не более, чем двух типов: L+ ML/МН или Н+ ML/МН [4].

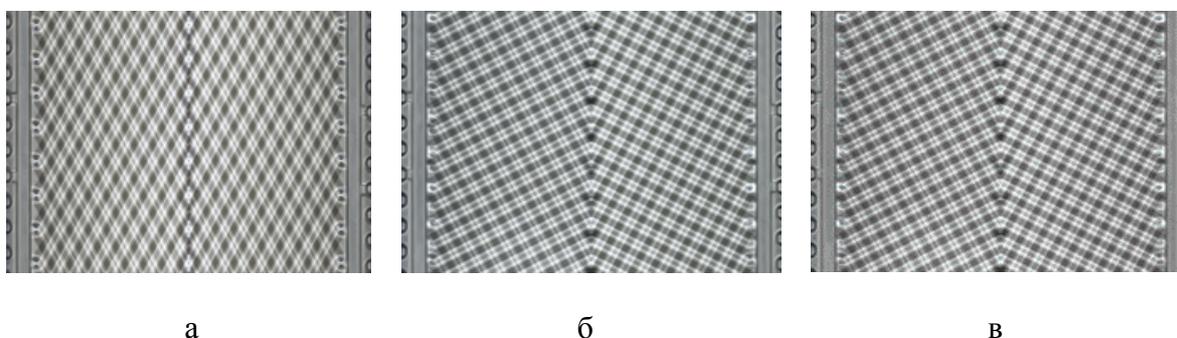


Рисунок 4 – Каналы, образуемые пластинами с различным углом наклона гофры:  
а – L-каналы; б – ML/МН-каналы; в – Н-каналы

Приведенная конфигурация пластин и каналов носит название ALFAFLEX и была разработана компанией Альфа-Лаваль (Швеция). Аналогичный принцип был применен и другими компаниями-изготовителями пластинчатых теплообменников.

Применение нержавеющей стали AISI316 с содержанием молибдена, практически исключает коррозию теплопередающих пластин. Для минимизации риска загрязнений необходимо поддерживать оптимальные скорости охлаждающей воды, которые обеспечивают относительно высокие значения касательных напряжений на стенках каналов, и оценивать физико-химические свойства воды, влияющие на образование отложений, в каждом конкретном случае.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наиболее эффективным мероприятием с точки зрения минимизации капитальных и эксплуатационных затрат является замена трубчатого теплообменного оборудования современными пластинчатыми аппаратами на различных стадиях получения хлебопекарных дрожжей. Особо следует отметить преимущества разборных пластинчатых теплообменников как охладителей дрожжерастильных аппаратов в процессах охлаждения товарных дрожжей. Модернизация производств хлебопекарных дрожжей должна протекать с учетом изложенных принципов конструкции пакетов современных разборных пластинчатых теплообменников.

#### Литература

1. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Бухкало СИ., Перевертайленко А.Ю. К вопросу применения пастеризационно-охладительных пластинчатых аппаратов для тепловой обработки молока // Інтегровані технології та енергозбереження. – Харків. – НТУ«ХПИ». 2005. – №3. С. 3–12.
2. Товажнянский Л.Л., Бухкало С.И., Капустенко П.А., Хавин Г.Л. Основные технологии пищевых производств и энергосбережение. – Харьков: НТУ«ХПИ», 2005, – 460 с.
3. Новаковская С.С., Шишацкий Ю.И. Производство хлебопекарных дрожжей. Справочник. – М.: 1990, – 332 с.
4. Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А., Хавин Г.Л., Арсеньева О.П. Пластинчатые теплообменники в промышленности. – Харьков: НТУ«ХПИ», 2004, – 232 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Tovazhnyanskiy L.L., Kapustenko P.A., Buhkalo SI., Perevertaylenko A.Yu. K voprosu primeneniya pasterizatsionno-ohladitelnykh plastinchatykh apparatov dlya teplovooy obrabotki moloka Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – Harkiv. – NTU«HPI». 2005. – #3. p. 3–12.
2. Tovazhnyanskiy L.L., Buhkalo S.I., Kapustenko P.A., Havin G.L. Osnovnyie tehnologii pischevykh proizvodstv i energosberezhenie. – Harkov: NTU«HPI», 2005, – 460 p.
3. Novakovskaya S.S., Shishatskiy Yu.I. Proizvodstvo hlebopekarnykh drozhzhey. Spravochnik. – M.: 1990, – 332 p.
4. Tovazhnyanskiy L.L., Kapustenko P.A., Havin G.L., Arseneva O.P. Plastinchatyie teploobmenniki v promyshlennosti. – Harkov: NTU«HPI», 2004, – 232 p.

УДК 66.045.1

Товажнянський Л.Л., Капустенко П.О., Перевертайленко О.Ю., Хавін Г.Л., Бухкало С.І.

**ПЛАСТИНЧАСТІ ТЕПЛОБМІННІ АПАРАТИ У ПРОЦЕСАХ ВИРОБНИЦТВА  
ХЛІБОПЕКАРНИХ ДРІЖДЖЕЙ**

В статті розглянуті питання енергозберігаючої модернізації основних стадій технології виробництва хлібопекарних дріжджів з використанням пластинчастих теплообмінників. Відмічена важливість процесів охолодження, що протікають у дріжджеростильних апаратах для виробництва товарних дріжджів. Сформульовано переваги розбірних пластинчастих теплообмінників як охолоджувачів дріжджеростильних апаратів.

УДК 621.1.016

Акмен Р.Г., Круглякова О.В., Петрова Л.С., Садах А.Ф.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СУШКИ  
И РАЗОГРЕВА СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ**

В процессе разливки стали, главная роль принадлежит сталеразливочным ковшам. Сталеразливочный ковш вмещает металл плавки и небольшое количество шлака, покрывающего поверхность металла и предохраняющего его от быстрого остывания и окисления. Кожух ковша имеет форму усеченного конуса с широким основанием кверху, изготовленного из стальных листов путем сварки. Изнутри ковш футеруется двумя видами огнеупоров.

Первый слой футеровки – шамотный кирпич. Его толщина зависит от емкости ковша и, как правило, для больших емкостей составляет не менее 180 мм. Футеровка днища выкладывается еще дополнительными рядами кирпичей, чтобы компенсировать повышенное разрушение в результате более длительного контакта с расплавленным металлом. Толщина футеровки днища шамотным кирпичом для больших ковшей – не менее 345 мм.

Второй слой футеровки – набивная масса. В последнее время, с целью сокращения расхода шамотного кирпича, переходят на футеровку монолитной набивной массой. Ее использование позволяет существенно увеличить срок службы огнеупорного слоя и уменьшает издержки на эксплуатацию ковшей. В состав набивной массы входят: измельченная хромитовая руда, магнезитовый порошок и сернокислый магнезит. Подобная набивная масса выдерживает 170–190 плавов, в то время как шамотная футеровка – не более 90.

После нанесения влажной набивной массы ковш необходимо высушить и нагреть для приема стали до температуры 1180÷1200 °С. Высокая температура футеровки необходима для уменьшения теплового удара при контакте с расплавленной сталью (1580 °С). Процессу сушки придается особенно большое значение, т.к. при резком разогреве влажной футеровки или в случае контакта ее с расплавленной сталью возможно местное взрывное разрушение.

По рекомендации завода-изготовителя [1], процесс сушки ковша должен проходить в три стадии: предварительный разогрев футеровки до температуры ~100 °С; удаление физической влаги (при этом скорость повышения температуры среды в ковше не должна превышать 2 °С/час); удаление химически связанной влаги, входящей в гидратные соединения (СаОН)<sub>2</sub>, Mg(ОН)<sub>2</sub> при разложении последних в диапазоне температуры 300÷400 °С (скорость подъема температуры не должна превышать 5÷7 °С/час).

Окончание процесса сушки ковша согласно [2] оценивается по достижении температуры обечайки в зоне перехода стенки ковша в днище порядка 145–150 °С.

На разогрев ковша устанавливаются при температуре футеровки не ниже 800 °С, максимальная скорость подъема температуры – 100 °С/час.

Приведенные выше рекомендации по проведению процесса сушки и разогрева ковша базируются на экспериментальных данных, полученных заводами-изготовителями и сталелитейными заводами, эксплуатирующими сталеразливочные ковши.

Однако, создание новых ковшей большой емкости (300–350 т и более), а также применение новых огнеупорных материалов для футеровки ковшей, требует обоснования развития во времени процесса сушки и разогрева футеровки ковша. Одним из воз-

можных методов решения подобной задачи является математическое моделирование процесса сушки и разогрева футеровки ковша [2].

В общей постановке подобная задача может быть сформулирована следующим образом.

Требуется найти решение нелинейного уравнения теплопроводности

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial \tau} = -\operatorname{div}(q) \quad (1)$$

и уравнения влагопроводности

$$\frac{\partial u}{\partial \tau} = m_u \nabla^2 u + m_t \nabla^2 t \quad (2)$$

в области футеровки при соответствующих начальных и граничных условиях.

К сожалению, в имеющейся литературе по теплофизическим характеристикам материалов отсутствуют какие-либо данные по коэффициентам влагопроводности  $m_u$  и термовлагопроводности  $m_t$  огнеупорных материалов. Поэтому провести хотя бы численное решение уравнения (2) невозможно.

Примем допущения:

– т.к. отношение внутреннего диаметра футеровки ковша к его внешнему диаметру  $< 1,2$ , будем считать футеровку – плоской бесконечной пластиной;

– в связи с тем, что теплоемкость вещества аддитивная величина, будем считать теплоемкость влажной набивки из хромомagnesита зависящей от концентрации влаги, которая изменяется вследствие испарения ее части.

Тогда, с учетом допущений, математическую модель процесса сушки и разогрева футеровки ковша можно представить в следующем виде.

Отыскивается решение уравнения

$$c\rho_i \frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_i \frac{\partial t}{\partial x} \right) \quad (i = 1,2,3), \quad (3)$$

где 1 – металлическая обечайка ковша; 2 – шамот; 3 – хромомagnesит.

При краевых условиях.

Начальное условие (при  $\tau = 0$ ) для процесса сушки

$$t(x,0) = t_0, \quad (4)$$

для процесса прогрева

$$t(x,0) = f(x), \quad (5)$$

где  $f(x)$  – распределение температуры в обмуровке и обечайке ковша, которое может быть найдено из расчета процесса сушки или из расчета процесса охлаждения ковша за время простоя.

Физические условия:

теплофизические характеристики металла обечайки  $\lambda_1, \rho_1, c_1$  – считаем постоянными;

теплофизические характеристики шамота считаем зависящими от температуры [3], т.е.  $\lambda_2(t), \rho_2(t), c_2(t)$ ;

теплофизические характеристики хромомagnesита считаем:

$\lambda_3(t), \rho_3(t)$  – по [3] для сухого материала, т.к. коэффициент теплопроводности не является аддитивной величиной, а воспользоваться [2] не представляется возможным,

$$c\rho_3(t) = \begin{cases} c_3(t)_{\text{сух}}(1-u)\rho_3(t) + (c_{\text{в}}u + r \cdot du)\rho_{\text{в}} & \text{при } t \leq 100^\circ\text{C} \\ c_3(t)_{\text{сух}}\rho_3(t) & \text{при } t > 100^\circ\text{C} \end{cases}, \quad (6)$$

где  $u$  – текущее влагосодержание,  $du$  – изменение влагосодержания материала при испарении части влаги, пропорциональной градиенту температуры,  $c_{\text{в}}, r, \rho_{\text{в}}$  – теплоемкость, скрытая теплота парообразования и плотность воды.

Граничные условия на внешней поверхности обечайки – III-го рода

$$\lambda_1 \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha_{\Sigma}(t_{\text{п}} - t_{\text{в}}), \quad (7)$$

где  $\alpha_{\Sigma}$  – суммарный коэффициент теплоотдачи с поверхности обечайки в окружающую среду с учетом конвективной и лучистой составляющих.

В местах контакта разнородных сред (металл-шамот, шамот-хромомagnesит) совершенный тепловой контакт (условия IV-го рода)

$$\lambda_i \left( \frac{\partial t_i}{\partial x} \right)_{\text{п}} = \lambda_{i+1} \left( \frac{\partial t_{i+1}}{\partial x} \right)_{\text{п}} \quad (i = 1, 2). \quad (8)$$

На внутренней поверхности футеровки – граничные условия III-го рода

$$\lambda_3(t) \frac{\partial t}{\partial x} = \alpha_{\Sigma}(\tau)[t_{\text{г}}(\tau) - t_{\text{п3}}], \quad (7)$$

где  $\alpha_{\Sigma}(\tau)$  – суммарный коэффициент теплоотдачи от продуктов сгорания топлива к поверхности хромомagnesита с учетом лучистой и конвективной составляющих.

Таким образом, система уравнений (3–7) замкнута. Ее решение проведено численным методом с использованием неявной конечно-разностной аппроксимации.

Определение теплового состояния системы металл-обмуровка ковша позволило составить пошаговый тепловой баланс этой системы в виде

$$V_{\text{г}}(I_{\text{вх}} - I_{\text{вых}}) \cdot d\tau = \sum_{i=1}^3 V_i \rho_i \Delta I_i + Q_{\text{пот}}, \quad (8)$$

где  $V_{\text{г}}, I_{\text{вх}}, I_{\text{вых}}$  – расход газа и энтальпия продуктов его горения на входе и выходе из ковша;  $d\tau$  – шаг по времени численного решения;  $V_i \rho_i$  – масса,  $\Delta I_i$  – изменение энтальпии слоев металла и футеровки за время  $d\tau$ ;  $Q_{\text{пот}}$  – потери в окружающую среду.

Из (8) определяется расход топлива и его изменение во времени.

Проведенный с помощью разработанной модели численный эксперимент позволил получить изменение во времени расхода газа при прогреве ковша емкостью 300 т после его сушки.

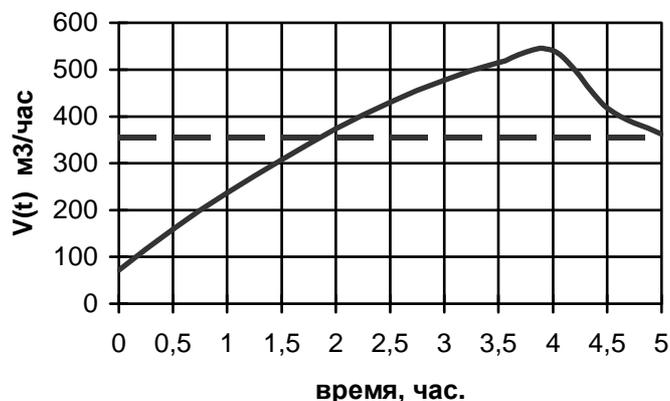


Рисунок – Изменение расхода газа при прогреве ковша 300 т после сушки

Сопоставление полученного значения среднего по времени расхода газа в процессе прогрева ковша с данными печного отдела ГИПРОСталь, где проектируется подобная установка, дает практически полное их совпадение, что может служить показателем адекватности предлагаемой модели.

#### Литература

1. Коршунов В.А., Советкин В.Л. Совершенствование технологии подготовки сталеразливочных ковшей // *Сталь*. – 1996. – № 2. – С. 12–14.
2. Сущенко А.В. Математическое моделирование и совершенствование технологии тепловой подготовки 350-тонных сталеразливочных ковшей // *Металл и литье Украины*. – 2003. – № 7/8. – С. 22–24.
3. Китаев Б.И., Зобнин Б.Ф. Теплотехнические расчеты металлургических печей / Под ред. А.С. Телегина. – М: *Металлургия*, 1970. – 528 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Korshunov V.A., Sovetkin V.L. Sovershenstvovanie tehnologii podgotovki stalerazlivochnyih kovshey *Stal*.- 1996. - # 2. p. 12–14.
2. Suschenko A.V. Matematicheskoe modelirovanie i sovershenstvovanie tehnologii teplovoy podgotovki 350-tonnyih stalerazlivochnyih kovshey *Metall i lite Ukrainyi*.- 2003.- # 7/8.- p. 22–24.
3. Kitaev B.I., Zobnin B.F. Teplotekhnicheskie rascheti metallurgicheskikh pechey Pod red. A.S. Telegina. M: *Metallurgiya*, 1970. – 528 p.

УДК 621.1.016

Акмен Р.Г., Круглякова О.В., Петрова Л.С., Садах О.Ф.

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ СУШКИ  
ТА РОЗІГРІВУ СТАЛЕРОЗЛИВОЧНИХ КОВШЕЙ**

Розроблена та реалізована математична модель процесу сушки та розігріву футеровки сталерозливочних ковшей великої місткості. Модель відрізняється від існуючих тим, що враховує витрати теплоти на випарювання вологи з футеровки в залежності від швидкості зміни вологомісткості футеровки. Результати розрахунку витрат палива на процес розігріву ковшей, що проведено за допомогою моделі, добре збігається з розрахунками інституту ДІПРОСталь, де проектується аналогічна установка.

Шутенко О.В.

### ОСОБЕННОСТИ ДРЕЙФА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА В ТЕЧЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Эффективность алгоритмов распознавания не в последнюю очередь будет определяться тем, насколько адекватна принятая модель классификации физической модели функционирования объекта. Особенно остро это проявляется при решении задач, связанных с оценкой степени старения и прогнозирования остаточного ресурса трансформаторного масла на длительных интервалах эксплуатации. Построение адекватных моделей старения жидкой изоляции трансформаторов невозможно без учета характерных особенностей зависимостей показателей от времени эксплуатации.

Данная статья посвящена описанию результатов исследований особенностей дрейфа показателей качества масла на длительных интервалах эксплуатации.

Механизмы старения трансформаторного масла достаточно подробно описаны в [1]. В то же время вопросы, связанные с исследованием зависимостей показателей качества трансформаторного масла от времени эксплуатации, не нашли широкого освещения в литературе. В работах [2, 3, 4] оценка степени старения масла осуществлялась с помощью модели множественной линейной регрессии, которая оказалась более эффективной, чем традиционная система контроля состояния масла. В то же время использование линейных моделей в [2, 3, 4], являлось в большей степени вынужденной мерой, поскольку ограниченный объем обучающих последовательностей не позволял выполнить адекватную оценку характера временных зависимостей показателей масла. На данном этапе исследований увеличение объема выборочных значений позволяет выполнить подобную оценку.

При исследовании процессов старения на длительных интервалах эксплуатации (40 лет и более) важно оценить, является ли скорость старения постоянной на всем исследуемом промежутке или же она изменяется. Выполнить подобного рода оценку возможно путем проверки общей линейной гипотезы [5]. Для проверки этой гипотезы записываем математическое ожидание случайной величины  $Y_t$  при заданном  $X_t$  в виде:

$$E(Y_t/x_t) = \alpha + \beta X_t + \delta_t,$$

где  $\delta_t$  обозначает отклонение от линейности.

Если задано  $k$  различных значений  $X_t$ , то в данной модели имеется  $k+2$  параметров  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ , ...,  $\delta_k$ , и, следовательно, на эти параметры могут налагаться два линейных условия. Алгебраические выкладки упрощаются, если используются условия:

$$\sum \delta_t = 0 \text{ и } \sum \delta_t x_t = 0,$$

где  $\sum$  обозначает суммирование по всем наблюдениям.

Второе из этих условий иногда считается несколько необычным, так как из него следует, что значения  $\delta$  зависят только от  $x$ . Хотя это и верно, единственный эффект этих условий состоит в том, что  $Y = \alpha + \beta x$  является эмпирическим уравнением регрессии фактических значений математического ожидания случайной величины  $Y$  (при задан-

ном  $x$ ) на  $x$ , полученным методом наименьших квадратов. Иначе говоря, используются «наилучшие» значения  $\alpha$  и  $\beta$ . Модель имеет вид

$$Y_t = \alpha + \beta x_t + \delta_t + Z_t.$$

Поскольку  $\delta_t$  и  $Z_t$  имеют одинаковые индексы, оказывается невозможным получить остаточную сумму квадратов (математическое ожидание, пропорциональное  $\delta^2$ ), не зависящую от  $\delta_t$ . Однако, если хотя бы для некоторых  $x$  имеется более одного наблюдения  $Y$ , модель принимает вид [5]:

$$Y_t = \alpha + \beta x_t + \beta_t + Z_{ti}. \quad (t=1, \dots, k; i=1, \dots, n_t). \quad (1)$$

Модель (1) аналогична модели для односторонней классификации. Полную сумму квадратов  $Q_{\text{пол}}$  можно разбить на сумму квадратов между группами  $Q_1$  и сумму квадратов внутри групп  $Q_{\text{ост}}$ :

$$Q_{\text{пол}} = Q_1 + Q_{\text{ост}} = \sum_{t=1}^k \sum_{i=1}^{n_t} (Y_{ti} - \bar{Y})^2 = \sum_{t=1}^k n_t (\bar{Y}_t - \bar{Y})^2 + \sum_{t=1}^k \sum_{i=1}^{n_t} (Y_{ti} - \bar{Y}_t)^2. \quad (2)$$

В свою очередь, сумму квадратов между группами можно разбить на сумму квадратов для линейной регрессии и сумму квадратов для средних данного плана относительно регрессии в соответствии с формулой:

$$\sum_{t=1}^k n_t (\bar{Y}_t - \bar{Y})^2 = B^2 \sum_{t=1}^k n_t (x_t - \bar{x})^2 + \sum_{t=1}^k n_t [\bar{Y}_t - \bar{Y} - B(x_t - \bar{x})]^2, \quad (3)$$

где  $B = \frac{\sum_{t=1}^k n_t x_t (\bar{Y}_t - \bar{Y})}{\sum_{t=1}^k n_t (x_t - \bar{x})^2}$ ;  $\bar{x} = \frac{\sum_{t=1}^k n_t x_t}{\sum_{t=1}^k n_t}$ .

Результаты дисперсионного анализа для оценки отклонения от линейности [5] приведены в табл. 1. Линейность регрессии проверяется путем сравнения отношения:

$$F = \frac{\text{Средний квадрат отклонения от линейности}}{\text{Остаточный средний квадрат}} \quad (4)$$

с  $F$ -распределением с  $k-2$ ,  $\sum_{t=1}^k n_t - k$  степенями свободы.

Для анализа отклонений от линейности использовались результаты периодических испытаний трансформаторного масла по 249 трансформаторам, находящимся в эксплуатации в 6 областях Украины. Для повышения достоверности результатов испытаний была выполнена двухэтапная процедура тестовой фильтрации [3]. После чего на основании предложенного в [6] критерия максимума корреляционного отношения были

сформированы массивы однородных показателей качества, в которых изменение значений показателей происходило с одинаковой интенсивностью.

Таблица 1 – Результаты дисперсионного анализа для отклонения от линейности

Источник изменчивости	Число степеней свободы	Сумма квадратов	Математическое ожидание среднего квадрата
Линейная регрессия	1	$B^2 \sum_{t=1}^k n_t (x_t - \bar{x})^2$	$\alpha^2 + \beta^2 \sum_{t=1}^k n_t (x_t - \bar{x})^2$
Отклонение от линейности	$k-2$	$\sum_{t=1}^k n_t [\bar{Y}_t - \bar{Y} - B(x_t - \bar{x})]^2$	$\sigma^2 + (k-2)^{-1} \sum_{t=1}^k n_t D_t^2$
Остаток	$\sum_{t=1}^k n_t - k$	$\sum_{t=1}^k \sum_{i=1}^{n_t} (Y_{ti} - \bar{Y})^2$	$\sigma^2$
Сумма	$\sum_{t=1}^k n_t - 1$	$\sum_{t=1}^k \sum_{i=1}^{n_t} (Y_{ti} - \bar{Y}_{..})^2$	

Процедуру проверки на отклонение от линейности проиллюстрируем на примере такого показателя масла, как содержание водорастворимых кислот. Данный показатель характеризует глубину термоокислительных процессов в трансформаторном масле. В ряде случаев отбраковка масла производится именно по этому показателю. Зависимости содержания водорастворимых кислот в масле от времени эксплуатации для 7-х массивов данных, квантованных с шагом 1 год приведены на рис. 1.

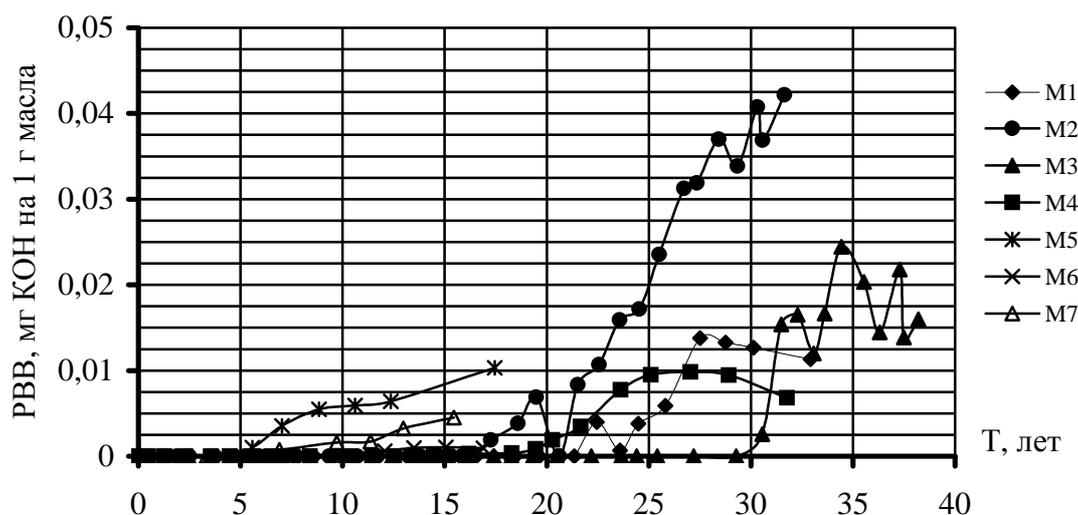


Рисунок 1 – Зависимость содержания водорастворимых кислот в трансформаторном масле от времени эксплуатации для массивов однородных данных, квантованных с шагом 1 год

В табл. 2 приведены результаты дисперсионного анализа для 7 массивов анализируемого показателя. Как видно из табл. 2, для всех массивов однородных данных гипотеза о линейности была отвергнута, поскольку расчетные значения  $F$  статистик значимо превышали критические при заданном уровне доверительной вероятности  $p = 0,95$  и соответствующих значениях числа степеней свободы.

Таблица 2 – Результаты оценки отклонения от линейности, временных рядов, показателей качества трансформаторного масла

Показатель качества масла	Массив данных	$k$	$N$	Суммы дисперсионного разложения				Число степеней свободы		$F$ статистика	
				$Q_{\text{пол}}$	$Q_{\text{лин. регр}}$	$Q_{\text{откл}}$	$Q_{\text{ост}}$	$V_{\text{откл}}$	$V_{\text{ост}}$	$F_{\text{рас.}}$	$F_{\text{крит.}}$
Содержание водорастворимых кислот	М-1	7	131	0,00311	0,00117	0,000969	0,000971	5	124	24,90	2,30
	М-2	13	368	0,09827	0,05295	0,02045	0,02487	11	355	26,53	1,82
	М-3	10	165	0,01351	0,00673	0,004095	0,002685	8	155	29,58	2,00
	М-4	8	139	0,001386	0,0007724	0,00043	0,0001836	6	131	51,20	2,005
	М-5	3	38	0,000433	0,000275	0,0000605	0,0000975	1	35	21,67	2,85
	М-6	4	28	0,0000066	0,0000036	0,0000009	0,0000021	2	24	5,401	3,40
	М-7	3	29	0,0000874	0,000041	0,0000069	0,0000395	1	26	4,517	4,22

Выполненная проверка отклонения от линейности как для физико-химических показателей масла (температура вспышки, кислотное число, пробивное напряжение, тангенс угла диэлектрических потерь при температурах 20, 70 и 90 °С, цвет, удельный вес и влагосодержание), так и для растворенных в масле газов (СО, СО<sub>2</sub>, СН<sub>4</sub>, С<sub>2</sub>Н<sub>2</sub>, С<sub>2</sub>Н<sub>4</sub>, С<sub>2</sub>Н<sub>6</sub> и С<sub>2</sub>Н<sub>2</sub>) показала аналогичные результаты. При этом наибольшие отклонения от линейности были выявлены у растворенных в масле газов.

Полученные результаты позволяют сделать ряд важных выводов:

1. На наблюдаемых интервалах эксплуатации (а это более 40 лет) скорость дрейфа значений показателей меняется. При этом на зависимостях показателей от времени эксплуатации можно выделить характерные участки, соответствующие определенным стадиям процесса старения;
2. Для физико-химических показателей масла характерен период индукции – скрытого дрейфа, не обнаруживаемого с помощью традиционной системы контроля (например, горизонтальные участки кривых на рис. 1);
3. Продолжительность участков индукции значимо отличается даже для одного показателя качества и зависит от режимов работы трансформатора и условий эксплуатации (см. кривые М1–М7 рис.1);
4. Дрейф значений показателей качества масла начинается после завершения периода индукции и характеризуется высокой интенсивностью изменения значений показателей (период самоускорения). При этом скорость изменения значений показателей также зависит от условий эксплуатации.

В связи с этим, одной из важнейших задач следующего этапа исследований является количественная оценка влияния условий эксплуатации на скорость старения жидкой изоляции. При этом полученные результаты накладывают ряд существенных ограничений на выбор модели факторного анализа (из-за отклонения от линейности зависимостей показателей качества от времени эксплуатации использование регрессионного и ковариационного анализа является недопустимым). Выявленные отклонения от линейности значительно усложняют как модели для оценки степени старения масла, так и модели для прогноза остаточного ресурса. Поэтому еще одним направлением дальнейшей работы будет являться исследование возможностей линеаризации данных зависимостей.

### Литература

1. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло М., Энергоатомиздат 1983 г.– 296 с.
2. Бондаренко В.Е., Шутенко О.В. Оптимизация системы информационных показателей качества трансформаторного масла, для технического эксплуатационного контроля маслонеполненного энергетического оборудования // Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті, №2, Харків., 2003., с. 46–50.
3. Бондаренко В.Е., Шутенко О.В. Метод выделения оптимального числа наиболее информативных показателей качества при синтезе регрессионных моделей для оценки степени старения жидкой изоляции трансформаторов // Технічна електродинаміка, Тематичний випуск «Силова електроніка та енергоефективність», Частина 5, Київ., 2006., с. 88–93.
4. Бондаренко В.Е., Щапов П.Ф., Шутенко О.В. Повышение эффективности эксплуатационного измерительного контроля трансформаторных масел. Монография. – Харьков.: НТУ «ХПИ», 2007. – 452 с.
5. Джонсон Н., Лион Ф. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. – М.: Мир, 1981. – 520 с.
6. Шутенко О.В. Формирование однородных массивов показателей качества трансформаторного масла в условиях априорной неопределенности результатов испытаний // Інтегровані технології та енергозбереження – Харків: НТУ «ХПИ», 2006. – № 4. – С. 42–50.

### Bibliography (transliterated)

1. Lipshteyn R.A., Shahnovich M.I. Transformatornoe maslo M., Energoatomizdat 1983 g.– 296 p.
2. Bondarenko V.E., Shutenko O.V. Optimizatsiya sistemy informatsionnykh pokazateley kachestva transformatornogo masla, dlya tehnicheskogo ekspluatatsionnogo kontrolya maslonapolnennogo energeticheskogo oborudovaniya Informatsiyno-keruyuchi sistemi na zaliznichnomu transporti, #2, Harkov., 2003., p. 46–50.
3. Bondarenko V.E., Shutenko O.V. Metod vyideleniya optimalnogo chisla naibo-lee informativnykh pokazateley kachestva pri sinteze regressionnykh modeley dlya otsenki stepeni stareniya zhidkoy izolyatsii transformatorov Tehnichna elektrodina-mika, Tematichniy vi-pusk «Silova elektronika ta energoefektivnist», Chastina 5, Kiyiv., 2006., p. 88–93.

4. Bondarenko V.E., Schapov P.F., Shutenko O.V. Povyishenie effektivnosti ekspluatatsionnogo izmeritelnogo kontrolya transformatornyh masel. Monografiya. – Harkov.: NTU «NPI», 2007. – 452 p.

5. Dzhonson N., Lion F. Statistika i planirovanie eksperimenta v tehnikе i nauke. – M.: Mir, 1981. – 520 p.

6. Shutenko O.V. Formirovanie odnorodnyh massivov pokazateley kachestva transformatornogo masla v usloviyah apriornoj neopredelennosti rezultatov ispytaniy Integrovani tehnologii ta energozberezheniya – Harkiv: NTU «NPI», 2006. – # 4. – p. 42–50.

УДК 621.314

Шутенко О.В.

### **ОСОБЛИВОСТІ ДРЕЙФУ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА ПРОТЯГОМ ТРИВАЛОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Виконаний аналіз особливостей дрейфу показників якості трансформаторного масла на тривалих інтервалах експлуатації. Показано, що швидкість зміни значень показників якості змінюється на різних проміжках часу. Інтенсивність процесів старіння масла залежить від умов експлуатації трансформаторів.

УДК 621.5.041

Трошин А.Г., Питак И.В.

## О РЕЖИМАХ ДВИЖЕНИЯ ЖИДКОЙ ФАЗЫ В РОТОРНОМ ВИХРЕВОМ МАССООБМЕННОМ АППАРАТЕ

Роторные массообменные аппараты являются высокоинтенсивными аппаратами, которые могут использоваться для проведения очистки газоздушных систем от пыли, абсорбции, проведения химических реакций газ-жидкость и других процессов [1].

Преимуществом вихревого роторного аппарата [2], по сравнению с центробежными аппаратами, является возможность получения хорошей гидродинамической обстановки для взаимодействия жидкой и твердой фазы при относительно небольшой частоте вращения ротора. Под этим понимается развитое вихревое движение газовой фазы с постоянным добавлением энергии от рабочего колеса, а также возможность осуществления многократных интенсивного диспергирования и коалесценции жидкой фазы, что, очевидно, должно способствовать течению процессов массообмена.

Данный вихревой аппарат представляет собой вихревой нагнетатель, имеющий устройство для подачи жидкой фазы в проточную часть.

Проведенные экспериментальные работы [3–4] подтвердили работоспособность и высокую эффективность аппарата. Однако, для дальнейшего развития конструкции аппарата и создания инженерных методик его расчета требуется теоретическое изучение гидродинамики газожидкостных потоков внутри аппарата.

Огромный объем работ по изучению движения газовой фазы в вихревых нагнетателях (компрессорах) освещен в [5,6]. Несмотря на то, что в этих работах производилось исследование относительно небольших и скоростных устройств (диаметр колеса обычно не более 0,2 м, окружная скорость свыше 50 м/с), основные закономерности движения газовой фазы будут сохраняться и для более крупных устройств типа вихревого массообменного аппарата.

Движение жидкой фазы внутри роторных вихревых аппаратов данного типа пока еще не достаточно изучено. Хотя, например, в [7] упоминалось об экспериментах с подачей жидкости в проточную часть вихревого компрессора. Однако, это делалось с целью охлаждения проточной части компрессора и рабочей среды во время сжатия. Как будет показано ниже, режим движения жидкости в аппарате сильно зависит от его размеров, и пренебрегать масштабным фактором при переходе от вихревых компрессоров к относительно крупным и тихоходным вихревым роторным массообменным аппаратам нельзя.

Целью настоящей статьи является разработка относительно простой модели движения жидкой фазы в роторном вихревом аппарате, интегрально учитывающей основные силовые факторы, действующие на пленку жидкой фазы на поверхности его проточной части и, на основании её, выбор предпочтительных режимов работы аппарата и путей совершенствования его конструкции.

Движение жидкой фазы принимаем как движение пленки по тороидальной поверхности проточной части под воздействием контактирующей с ней движущейся газовой фазы. Данное положение соответствует нашим экспериментальным наблюдениям с тем лишь замечанием, что основной объем жидкости движется в виде достаточно «толстой» турбулентной пленки.

Согласно [5] линии тока газовой фазы имеют спиралевидную форму и направлены от входного патрубка к выходному. Таким образом, газовая фаза по выходу из колеса имеет окружную составляющую (от входного патрубка к выходному) и меридиональную (рис. 1). Соотношение между окружной и меридиональной составляющей определяется так называемым коэффициентом расхода, равным отношению расхода газа через аппарат, к гипотетическому расходу, полученному при условии, что газ движется по проточной части равномерно со скоростью, равной окружной скорости рабочего колеса. Согласно нашим наблюдениям, при коэффициенте расхода порядка 0,3-0,4 данное соотношение порядка единицы, а уменьшение коэффициента расхода приводит к уменьшению окружной составляющей скорости газа.

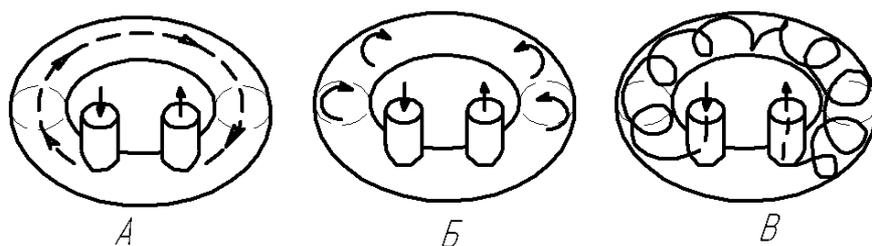


Рисунок 1

Рассмотрим движение элементарного объема пленки жидкой фазы по тороидальной поверхности проточной части аппарата как движение материальной точки под воздействием внешних сил.

Пусть  $dS$  поверхность элементарного объема, а  $h$  толщина пленки. Положение элемента пленки на поверхности тора со «средним» радиусом  $R$  и радиусом меридионального сечения  $r$  можно задать с помощью двух угловых координат:  $\psi$  - в окружном направлении,  $\varphi$  - в меридиональном сечении. В соответствии с принятой системой координат внешние силы мы будем раскладывать на два составляющих направления: окружное и меридиональное (рис. 2).

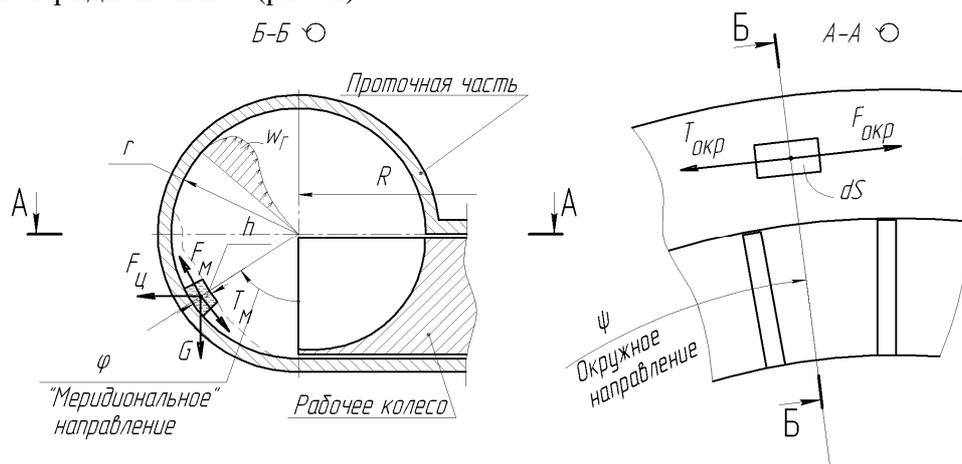


Рисунок 2 – Разрез проточной части роторного вихревого аппарата

Примем, что эпюры распределения скоростей газа  $w_r$  вдоль стенки проточной части в меридиональном сечении не зависят от угла  $\varphi$  (в пределах  $0 < \varphi < 1,5\pi$  и при-

близительно соответствуют рис. 2, а окружная составляющая движения газа не зависит от угла  $\psi$ .

Учитывая принятые допущения, на поверхность элемента пленки со стороны газа действует касательная сила, имеющая окружную составляющую:

$$F_{\text{окр}} = \tau_{\text{окр}} dS$$

и меридиональную:

$$F_{\text{м}} = \tau_{\text{м}} dS,$$

где  $\tau_{\text{окр}}$  и  $\tau_{\text{м}}$ , соответственно, окружная и меридиональная составляющие касательных напряжений на границе газ-жидкость. Примем, что касательные напряжения не зависят от скорости жидкости, поскольку её скорость на порядок меньше скорости газа.

При движении элемента пленки в окружном направлении со стороны стенки на него будет действовать сила вязкого трения. Для окружной составляющей силы трения:

$$T_{\text{окр}} = \lambda' \rho w_{\text{пл.окр}}^2 dS,$$

где  $\lambda'$  - коэффициент трения, соответствующий окружному направлению движения элемента пленки, зависящий от режима движения жидкости ( $\lambda \propto 1/\text{Re}$  в ламинарном режиме, а в турбулентном –  $\lambda \propto 1/\text{Re}^{0,25}$ );  $w_{\text{пл.окр}}$  - окружная составляющая скорости элемента пленки.

Аналогично, для меридионального направления:

$$T_{\text{м}} = \lambda'' \rho w_{\text{пл.м}}^2 dS,$$

где  $\lambda''$  - коэффициент трения, соответствующий меридиональному направлению движения элемента пленки;  $w_{\text{пл.м}}$  - меридиональная составляющая скорости элемента пленки, м/с.

Величина силы тяжести, действующая на элемент пленки, в проекции на меридиональное направление составляет:

$$G_{\text{м}} = \rho g h \cdot \sin \varphi \cdot dS,$$

где  $\rho$  – плотность жидкой фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения.

Проекция силы тяжести на окружное направление равна нулю (при вертикальном расположении оси вращения рабочего колеса).

При движении элемента пленки в окружном направлении на него действует центробежная сила. Её проекция на меридиональное направление:

$$F_{\text{ц.м}} = \frac{w_{\text{пл.окр}}^2}{R} \cdot \rho h \cos \varphi \cdot dS.$$

Проекция центробежной силы на окружное направление равна нулю.

Влиянием кориолисовых сил на движение элемента пленки пренебрегаем. Силы нормальной реакции со стороны стенки и нормального давления со стороны газа имеют нулевые проекции и на окружное, и на меридиональное направление.

Исходя из вышеизложенного, можно составить уравнения движения элемента пленки жидкости. Для окружного направления ( $dS$  сократили):

$$\rho h R \cdot \frac{d^2 \psi}{dt^2} = \tau_{\text{окр}} - \lambda' \rho w_{\text{пл.окр}}^2. \quad (1)$$

Аналогично для меридионального направления:

$$\rho h \cdot \frac{d^2 \varphi}{dt^2} = \tau_m - \rho g h \sin \varphi + \frac{w_{\text{пл.окр}}^2}{R} \cdot \rho h \cos \varphi - \lambda'' \rho \left( \frac{rd\varphi}{dt} \right)^2. \quad (2)$$

Дальнейший анализ этих уравнений будет направлен на поиск устойчивых режимов движения.

Примем установившийся режим движения жидкости в окружном направлении ( $\frac{d^2 \psi}{dt^2} = 0$  или  $w_{\text{пл.окр}} = \text{const}$ ). Это допущение основывается на том, что длина пути пленки воды многократно больше ее толщины, и на движение пленки большое воздействие оказывает вязкое трение, а также на том, что начальная скорость пленки, при  $\psi = 0$ , не равна нулю.

Тогда уравнение (1) будет выражать равновесие сил вязкого трения и касательных сил, действующих со стороны газовой фазы:

$$\tau_{\text{окр}} = \lambda' \rho w_{\text{пл.окр}}^2. \quad (3)$$

Анализ уравнения (2) можно начать с того, что принять к рассмотрению два варианта установившегося процесса: при преобладающем влиянии сил вязкости на движение пленки и преобладающем влиянии сил инерции.

Для первого случая можно будет пренебречь влиянием сил тяжести и центробежной силы. Кроме того,  $d^2 \varphi / dt^2$  тоже будет стремиться к нулю, так как скорость в данном случае быстро выйдет на постоянную величину (пренебрежение силами инерции). Тогда скорость движения пленки в меридиональном направлении будет постоянной и определяться соотношением напряжений на границе газ-жидкость и коэффициента вязкого трения:

$$\lambda'' \rho \cdot \frac{rd\varphi}{dt} = \tau_m. \quad (4)$$

Уравнения (3) и (4) описывают «вязкий» режим, назовем его первым. Этот режим может быть реализован при повышенной вязкости жидкой фазы, например, если она сильно загрязнена частицами уловленной пыли или если жидкая фаза – это вязкое поглотительное масло и т.п. Другим вариантом реализации этого режима будет работа с очень малым расходом жидкой фазы, когда на стенках образуется тонкая пленка жид-

кости. В обоих случаях жидкость будет двигаться по спиралеобразной траектории, повторяя пристенные потоки газа. Доходя до  $\varphi = 3\pi/2$ , пленка будет отрываться от поверхности тора и попадать на лопатки рабочего колеса. В виде брызг жидкая фаза упадет опять на поверхность тора. В случае с тонкой пленкой разбрызгивание жидкой фазы колесом, очевидно, будет неинтенсивным.

В случае преобладающего влияния сил инерции, пройдя через несколько циклов колебаний, под действием даже небольших сил вязкости система придет к установившемуся режиму с  $d^2\varphi/dt^2 = 0$  и  $d\varphi/dt = 0$ .

Обозначим соотношение меридиональных и окружных напряжений на границе газ-жидкость коэффициентом  $k_m = \tau_m / \tau_{окр}$ . Тогда, учитывая уравнение (3), можно переписать уравнение (2) для установившегося режима следующим образом:

$$k_m \lambda' \rho w_{пл.окр}^2 - \rho g h \sin \varphi + \frac{w_{пл.окр}^2}{R} \cdot \rho h \cos \varphi = 0. \quad (5)$$

В целях упрощения анализа принимаем в первом приближении:

$$\sin \varphi \approx \begin{cases} 2\varphi/\pi, & \text{при } 0 < \varphi < \pi/2 \\ -2\varphi/\pi + 2, & \text{при } \pi/2 < \varphi < \pi \end{cases} \quad (6)$$

$$\cos \varphi \approx -2\varphi/\pi + 1, \quad \text{при } 0 < \varphi < \pi.$$

Тогда на диапазоне  $0 < \varphi < \pi/2$  можно получить следующее решение:

$$k_m \lambda' \rho w_{пл.окр}^2 - \frac{2\varphi}{\pi} \cdot \rho g h + \frac{w_{пл.окр}^2}{R} \cdot \rho h - \frac{2\varphi}{\pi} \cdot \frac{w_{пл.окр}^2}{R} \cdot \rho h = 0;$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{k_m \lambda' \rho w_{пл.окр}^2 + \frac{w_{пл.окр}^2}{R} \cdot \rho h}{\rho g h + \frac{w_{пл.окр}^2}{R} \cdot \rho h} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{k_m \lambda' \frac{w_{пл.окр}^2}{gh} + \frac{w_{пл.окр}^2}{gR}}{1 + \frac{w_{пл.окр}^2}{gR}} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{Fr_m + Fr_{ц}}{1 + Fr_{ц}}. \quad (7)$$

В знаменатель уравнения (7) входит критерий Фруда, учитывающий соотношение центробежных сил, возникающих при окружном движении пленки, а в числителе, кроме того, критерий Фруда  $Fr_m$ , учитывающий соотношение меридиональных касательных напряжений, действующих со стороны газовой фазы (поскольку  $k_m \lambda' w_{пл.окр}^2 = \tau_m / \rho$ ). Анализ уравнения (7) показывает, что угол  $\varphi$  возрастает с увеличением  $Fr_{ц}$ , особенно при  $Fr_m$  порядка единицы, поскольку  $d\varphi/dFr_{ц} > 0$  при  $Fr_m < 1$  (в случае если  $Fr_m > 1$ ,  $\varphi$  станет больше чем  $\pi/2$ , что выходит за рассматриваемый предел).

Данный режим, «второй» может быть реализован в аппарате слишком больших размеров при слишком малой частоте вращения рабочего колеса. В этом случае доминирует сила тяжести, которая не позволяет пленке жидкой фазы подняться выше чем  $\varphi = \pi/2$ . Улавливание пыли при этом возможно только за счет инерционного механиз-

ма (удар потока газа, выходящего из рабочего колеса в участок стенки  $0 < \varphi < \pi/2$ ) и будет, по всей видимости, крайне неэффективным.

На участке  $\pi/2 < \varphi < \pi$ , с учетом (6) уравнение (5) запишется следующим образом:

$$k_m \lambda' \rho w_{\text{пл.окр}}^2 + 2\varphi \rho gh / \pi - 2 \cdot \rho gh + \frac{w_{\text{пл.окр}}^2}{R} \cdot \rho h - \frac{2\varphi}{\pi} \cdot \frac{w_{\text{пл.окр}}^2}{R} \cdot \rho h = 0;$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{k_m \lambda' \frac{w_{\text{пл.окр}}^2}{hg} + \frac{w_{\text{пл.окр}}^2}{Rg} - 2}{\frac{w_{\text{пл.окр}}^2}{Rg} - 1} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{Fr_m + Fr_{\text{ц}} - 2}{Fr_{\text{ц}} - 1}. \quad (8)$$

Как видно из (8), для того, чтобы угол  $\varphi$  стал больше, чем  $\pi/2$ , меридиональные силы со стороны газа должны превышать силы тяжести ( $Fr_m > 1$ ). Данный «третий» режим более интенсивный, чем второй, однако он имеет тот же недостаток: большая часть жидкости проходит по периферии проточной части аппарата, не попадая на лопатки. В наших экспериментальных исследованиях этот режим является основным для модели аппарата с размерами  $R \approx 0.2$  м,  $r \approx 0.1$  м. Угол составляет порядка  $\varphi \approx 2\pi/3$  при частоте вращения колеса 1500 об/мин. На практике третий режим всегда сопровождается тонкопленочным вязким течением жидкой фазы, срываемой с её основного потока по поверхности проточной части.

Увеличение  $\varphi$  свыше  $\pi$  и дальнейшая потеря устойчивого в смысле  $\varphi$  решения возможна, как видно, при  $Fr_m > Fr_{\text{ц}}$ . Этот режим, «четвертый», будет выражаться в том, что пленка жидкости будет подниматься в самую верхнюю точку  $\varphi = \pi$ , а затем продолжит свое движение до  $\varphi = 3\pi/2$ , после чего жидкая фаза попадет на лопатки рабочего колеса. На лопатках произойдет интенсивное разбрызгивание жидкости. Летящие брызги резко улучшат условия проведения процессов массообмена и пылеулавливания. Достаточно сказать, что поверхность брызг намного превысит поверхность проточной части аппарата.

Критерий, позволяющий определить возможность перехода к четвертому режиму, можно получить из упомянутого соотношения  $Fr_m > Fr_{\text{ц}}$ :

$$\frac{Fr_m}{Fr_{\text{ц}}} > 1 \Rightarrow \frac{k_m \lambda' R}{h} > 1 \quad (9)$$

Аппараты, удовлетворяющие условию (9), будут работать в четвертом, наиболее эффективном, режиме.

### Выводы

1. Разработана математическая модель, описывающая движение жидкой фазы по внутренней поверхности проточной части вихревого роторного аппарата под воздействием движущейся газовой фазы.

2. Анализ полученных дифференциальных уравнений позволил выявить основные режимы движения жидкой фазы и охарактеризовать их с точки зрения эффективности проведения процессов массообмена и пылеулавливания.

3. Наиболее эффективным является режим, в котором жидкая фаза в турбулентном режиме движется в меридиональном направлении и попадает на лопатки рабочего колеса, где происходит ее разбрызгивание.

4. Предложен безразмерный критерий, позволяющий предсказать возможность осуществления данного, наиболее эффективного режима.

5. Необходимо провести экспериментальные исследования, с целью уточнения модели и её параметрической идентификации.

#### Литература

1. Страус В. Промышленная очистка газов: Пер. с англ.– М., Химия, 1981, 616с.
2. А.с. № 1604388, В 01 D 3/30 от 07.11.1988 г.
3. Пітак І.В., Моїсєєв В.Ф., Трошин О.Г., Васильєв М.І. Гідравлічна характеристика роторного вихрового апарату для очищення пило-газової суміші. Шоста міжнародна наукова конференція «Молодь у вирішенні регіональних та транскордонних проблем екологічної безпеки», м. Чернівці, 2007 р.
4. Питак И.В., Трошин А.Г., Моисеев В.Ф. Определение эффективности очистки газо-воздушного потока в роторном массообменном аппарате. Восточно-Европейский журнал передовых технологий 5/4 (29) 2007 г.
5. Виршубский И.М. и др. Вихревые компрессоры /И.М. Виршубский, Ф.С. Рекстин, А.Я. Шквар. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отделение, 1988. – 271 с.
6. Хмара В.Н. Теория и расчет вихревых вакуумных компрессоров. – Учебное пособие по курсу «Динамические машины». – Москва, 1988 г.
7. Рыжов С.В., Куличенко В.А., Половец Ю.А. Увлажнение воздуха в судовых кондиционерах с помощью вентиляторов // Судостроение. 1972. № 7. с. 20–23.

#### Bibliography (transliterated)

1. Straus V. Promyshlennaya ochistka gazov: Per. s angl.– M., Himiya, 1981, 616p.
2. A.s. # 1604388, V 01 D 3/30 ot 07.11.1988 g.
3. Pitak I.V., Moiseev V.F., Troshin O.G., Vasilev M.I. Gidravlichna harakteristika rotornogo vihrovogo aparatu dlya ochischennya pilo-gazovoyi sumishi. Shosta mizhnarodna naukova konferentsiya «Molod u virishenni regionalnih ta transkordonnih problem ekologichnoyi bezpeki», m. Chernivtsi, 2007 r.
4. Pitak I.V., Troshin A.G., Moiseev V.F. Opredelenie effektivnosti ochistki gazo-vozdushnogo potoka v rotornom massoobmennom apparate. Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredoviyih tehnologiy 5/4 (29) 2007 g.
5. Virshubskiy I.M. i dr. Vihrevyie kompressoryi I.M. Virshubskiy, F.S. Rekstin, A.Ya. Shkvar. – L.: Mashinostroenie. Leningradskoe otdelenie, 1988. – 271 p.
6. Hmara V.N. Teoriya i raschet vihrevyih vakuumnyih kompressorov. – Uchebnoe posobie po kursu «Dinamicheskie mashiny». – Moskva, 1988 g.
7. Ryizhov S.V., Kulichenko V.A., Polovets Yu.A. Uvlazhnenie vozduha v sudoviyh konditsionerakh s pomoschyu ventilyatorov Sudostroenie. 1972. # 7. p. 20–23.

УДК 621.5.041

Трошин О.Г., Пітак І.В.

**ПРО РЕЖИМИ РУХУ РІДКОЇ ФАЗИ  
У РОТОРНОМУ ВИХРОВОМУ МАСООБМІННОМУ АПАРАТІ**

У статті проведено дослідження гідродинаміки внутрішніх потоків рідкої та газової фази у роторному вихровому масообмінному апараті. Показана можливість існування різних режимів руху рідкої фази. Запропоновано безрозмірний критерій, який дозволяє визначити можливість роботи апарата у найефективнішому режимі з інтенсивним розпилюванням рідкої фази.

УДК 681.322.06

Бусяк Ю.М.

**О ФОРМИРОВАНИИ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ  
ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ОБЪЕКТА БРОНЕТЕХНИКИ ЭКСПЕРТНЫМ МЕТОДОМ**

*Харьковское конструкторское бюро по машиностроению им. А.А. Морозова*

В работе [1] показана применимость метода анализа и сравнения объектов бронетехники по степени рациональности. Одним из ключевых этапов при осуществлении этого подхода является формирование рациональных показателей тактико-технических характеристик танка, бронетранспортера или боевой машины пехоты. Такие показатели могут быть получены путем моделирования боевых действий [3, 4], на основе результатов испытаний [6] и, наконец, анализа применения техники и вооружения в боевых условиях.

Однако эти подходы могут быть использованы и дают результаты лишь для отдельных показателей и самое главное не могут учитывать перспектив развития науки, техники и технологии [2]. Это становится особенно актуальным еще и потому, что современные объекты бронетехники представляют собой сложнейшие технические системы с большим количеством подсистем, элементов, прямых и обратных связей. Поэтому особое значение приобретает задача анализа и обработки мнения ученых и специалистов на основе методов, позволяющих объединить субъективную информацию и получить количественные оценки, характеризующие облик машины будущего. Такие оценки могут быть получены путем прямых расчетов, в основе которых лежит экстраполяция существующих тенденций и действующих на момент оценки факторов на будущее. Однако, многочисленные результаты такого подхода свидетельствуют о том, что предположения о жизненности факторов, определяющих развитие, особенно на длительный период, оказывается неверным [2, 3, 5, 6]. Это особенно актуально в вопросах разработки вооружений, поскольку здесь ошибки ведут не только к напрасным затратам ресурсов, но и к повышению риска снижения уровня военной безопасности государства.

Поэтому, с целью преодоления перечисленных трудностей, была поставлена задача определения рациональных показателей ТТХ объекта бронетехники экспертным методом.

Прогнозные экспертные оценки отражают индивидуальное суждение специалистов относительно характеристик и перспектив развития объекта и основаны на использовании профессионального опыта и фундаментальных знаний, совокупность которых можно назвать интуицией. Метод экспертных оценок используют для анализа объектов и поиска решения проблем, которые либо полностью, либо частично не поддаются математической формализации.

Одним из методов реализации анализа является аналитическая экспертная оценка, осуществляемая индивидуально путем опроса мнений экспертов-специалистов независимо друг от друга.

Существенным преимуществом этого метода является возможность максимального использования индивидуальных качеств эксперта и практически полное отсутст-

вие психологического воздействия извне. В то же время, из-за ограниченности и узкой специализации знаний одного эксперта, комплексный анализ сложной технической системы – объекта БТТ – может носить односторонний или даже недостоверный характер.

Учитывая это, эксперты-специалисты были разделены на три группы в зависимости от масштаба охвата анализа:

- 1 группа – экспертиза характеристик объекта в целом;
- 2 группа – экспертиза систем;
- 3 группа – экспертиза отдельных показателей системы.

При формировании групп экспертов основными являются вопросы формирования качественного и количественного состава.

По качественным показателям ко всем трем группам экспертов предъявлялись следующие общие требования:

- высокий уровень общей эрудиции;
- специальные знания в оцениваемой области;
- способность к адекватному оцениванию тенденции;
- перспективность мышления;
- научный интерес;
- производственный или научный опыт.

В количественном отношении группы характеризовались следующими данными.

Первая группа по своему уровню предполагает включение в ее состав специалистов уровня генерального и главных конструкторов в области бронетанкостроения, их заместителей, а также специалистов Министерства обороны и Генерального штаба ВС Украины как заказчиков и потребителей этой техники. Численность ее составила 14 человек.

Вторая группа включала в себя специалистов по различным системам (двигатель, корпус, движитель, комплекс вооружения, эргономика) и состояла из нескольких независимых групп, включавших от 7 до 12 экспертов.

Третья группа экспертов также состояла из нескольких групп, причем в их число эксперты из 1-й группы не включались, а из второй могли входить при оценке показателя соответствующей подсистемы. При этом третья группа экспертов относилась, в основном, к характеристикам, которые реализуются в подсистемах и комплексах, производящихся независимо от основного объекта.

При статистической обработке результатов экспертных оценок в виде количественных данных, содержащихся в анкетах, определялись статистические оценки характеристик и их доверительные границы, а также статистические оценки согласованности мнений экспертов.

Среднее значение оцениваемой величины

$$b_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n B_i, \quad (1)$$

где  $n$  – число экспертов;  $B_i$  – оценка прогнозируемой величины  $i$ -м экспертом.

Дисперсия  $D$  и оценка доверительного интервала  $j$  определялись соответственно как

$$D = \left[ \sum_{i=1}^n (b_{m_i} - b_m)^2 \right] \cdot \frac{1}{n-1}; \quad (2)$$

$$j = t \sqrt{\frac{D}{n-1}}, \quad (3)$$

где  $t$  – параметр, определяемый по таблицам Стьюдента для числа степеней свободы  $K=(n-2)$ .

С учетом этого верхняя и нижняя граница оцениваемой величины определяются как

$$B_m^{\max} = b_m + j; \quad (4)$$

$$B_m^{\min} = b_m - j. \quad (5)$$

Коэффициент вариации оценок

$$\gamma = \frac{\zeta}{b_m}, \quad (6)$$

где  $\zeta$  – среднеквадратичное отклонение.

Очевидно, что отдельные показатели, определяемые третьей группой, входят в таковые, определяемые второй и первой группами экспертов. Поэтому обработка результатов с использованием описанной процедуры (1)–(6) осуществлялась не только в группах, но и для одноименных показателей «по вертикали». Таким образом, для некоторых укрупненных показателей могли существовать не одна, а две или три оценки.

Кроме того, в первой группе экспертов находились специалисты конструкторских бюро, Министерства обороны и Вооруженных Сил (генеральный штаб, командование Сухопутных войск). Каждая из подгрупп экспертов естественно характеризуется своим специфическим (но это не значит ошибочным) взглядом на проблему в целом. Учитывая, что численностью эти подгруппы различны, во избежание получения тенденциозных оценок, характерных для соответствующих ведомств, обработка результатов опроса производилась сначала в подгруппах, после чего представлялась как

$$b_m = 0,33 \cdot b_m^{KB} + 0,33 \cdot b_m^{MO} + 0,33 \cdot b_m^{ГШ}, \quad (7)$$

где  $b_m^{KB}, b_m^{MO}, b_m^{ГШ}$  – значения показателей по соответствующей подгруппе экспертов.

Как видно, уравнение (7) предполагает равный вес оценок групп экспертов. При обосновании приоритетов значения весовых коэффициентов могут быть соответствующим образом изменены.

Разработка анкет при проведении экспертного опроса является одним из основных этапов, от успеха осуществления которого в значительной степени зависит конечный результат.

Анкетирование проводится в два основных этапа:

1. При формировании групп высококвалифицированных специалистов-экспертов, связанных с исследованиями и НИОКР по направлению экспертизы, должности, специальные знания и опыт которых отвечает наперед определенным требованиям;

2. Проведение экспертизы путем опроса мнений независимых экспертов по определению ими показателей ТТХ образцов БТТ и ее качественных характеристик.

Таким образом, формировалось две анкеты, первая из них содержала объективные данные о предполагаемом эксперте, причем критериями отбора экспертов были:

1. Базовое техническое или военно-инженерное образование;
2. Общий стаж, причем, в том числе по направлению экспертизы, не менее 5 лет;
3. Занимаемая должность (для 1-й группы экспертов Генеральный или главный конструктор, начальник службы или управления видового научного центра, генерального штаба (виды ВС, директор департамента, начальник управления, МО или ЦНИИ ВВТ).
4. Ученая степень, специальность;
5. Специализация по направлению экспертизы.

Следует отметить, что в методах подбора экспертов и вообще в применении этих методов, царит известный произвол [2, 3, 4, 6], от методов самооценки до полного отсутствия оценки эксперта и волевого привлечения их, что, естественно, сказывается на результатах экспертизы. В настоящем исследовании экспертиза проводится не только в одной группе, но и «по вертикали» в соответствии с иерархией показателей, выносимых на оценивание. С другой стороны, облик машины в целом определяет лишь 1-я группа экспертов, которая разделена на подгруппы в соответствии с предполагаемыми ведомственными тенденциями, что отражается в способе усреднения результатов опроса в этих подгруппах с равными весовыми коэффициентами 0,33 независимо от численности подгруппы) в соответствии с (7). Для составления второй анкеты был разработан перечень групп показателей и их обозначения, которые приведены в таблице.

На основании данных таблицы 1 формировались анкеты для соответствующих групп экспертов. Так, анкета для первой группы экспертов включала показатели группы О (качественные показатели (группа 4) и основные показатели из групп 1, 2, 3. Для второй группы экспертов анкета включала один или несколько показателей из групп О и 4, и все показатели из соответствующей группы 1, 2, 3. Кроме того, каждый из показателей для первой и второй групп экспертов характеризовался уровнем его осуществления: достигнутым или перспективным.

Таким образом, анкеты для 1-й и 2-й групп экспертов, включавшие соответствующие показатели, состояли из набора универсальных строк, вид которых представлен на рис. 1.

По окончании заполнения анкеты эксперты могли дать описательные характеристики наиболее весомых качественных характеристик, не включенных в анкету (не более 16 слов). К ним могли относиться: тип двигателя, тип пушки и другие.

Те показатели, которые по результатам опроса 1-й и 2-й групп экспертов были определены как перспективные, выносились на экспертизу 3-й группы, анкета для которых коренным образом отличалась от первых двух групп. Эта анкета включала один показатель, который снова предлагалось оценить, то есть результат опроса экспертов 1-й и 2-й группы не доводился до сведения экспертов третьей группы, который предлагалось охарактеризовать качественно по следующим характеристикам:

- срок воплощения;
- методы, техника и технология, обеспечивающие достижение результата;
- соответствие прогнозируемого показателя современным тенденциям развития соответствующих образцов БТТ, науки, техники, технологии;
- уровень новизны или оригинальность решения;
- потребные объемы финансирования НИОКР или затраты на закупку;
- наличие квалифицированных исполнителей;
- наличие материально-технической базы;
- ожидаемые результаты;
- спрос на мировом рынке (только для экспортных образцов).

Таблица 1 – Группы показателей и их обозначение

№ п/п	Группы показателей	Размерность	Обозначение
О	Основные характеристики объекта БТТ		
1.	Масса	т	O1
2.	Габарит Н	м	O2
3.	Габарит В	м	O3
4.	Габарит D	м	O4
5.	Клиренс	мм	O5
6.	Мощность двигателя	л.с.	O6
7.	Экипаж	чел	O7
8.	Пушка, калибр	мм	O8
9.	Пулемет, калибр	мм	O9
10.	Гранатомет, калибр	мм	O10
11.	ТУР	шт	O11
12.	Боекомплект	шт	O12
13.	Бронепробиваемость, $\alpha=60^\circ D=2$ км	мм	O13
14.	Время подлета 1-го выстрела	сек	O14
15.	Дальность стрельбы, км (при $R_{БПС}=0,55$ )	км	O15
16.	Дальность стрельбы, км (при $R_{КС}=0,55$ )	км	O16
17.	Трансмиссия, тип механическая гидромеханическая электромеханическая		O17
18.	Количество передач вперед-назад		O18
19.	$V_{\max}$	км/час	O19
20.	$V_{\text{ср}}$ по проселочной дороге	км/час	O20
21.	Запас хода по шоссе	км	O21
22.	Запас хода по грунтовой дороге	км	O22
23.	Среднее удельное давление на грунт	кг/см <sup>2</sup>	O23
24.	Глубина брода	м	O24
	<b>Основные характеристики БМП, БТР</b>		
25.	Десант	чел	O25
26.	Темп стрельбы автоматической пушкой	выстр/мин	O26
27.	Скорость движения на плаву $\max$	км/час	O27
<b>1</b>	<b>Подвижность</b>		
1.	Максимальная мощность силовой установки	кВт (л.с.)	A1
2.	Удельный расход топлива	гр/кВт·ч $(\frac{gp}{л.с. \cdot ч})$	A2
3.	Габаритная мощность двигателя	кВт/м <sup>3</sup>	A3
4.	Удельная мощность двигателя	кВт/т	A4
5.	Температурный диапазон работы двигателя без ограничений	°С	A5
6.	Ход катка опорного динамический	мм	A6
7.	Ход катка опорного статический	мм	A7

Продолжение таблицы 1

№ п/п	Группы показателей	Размерность	Обозначение
<b>2</b>	<b>Защищенность</b>		
1.	Борт корпуса, эквивалент на 2 км $\alpha=60^\circ$	мм	Б1
2.	Борт башни, эквивалент на 2 км $\alpha=60^\circ$	мм	Б2
3.	Крыша корпуса, эквивалент на 2 км $\alpha=60^\circ$	мм	Б3
4.	Крыша башни, эквивалент на 2 км $\alpha=60^\circ$	мм	Б4
5.	Днище корпуса	мм	Б5
6.	Динамическая защита (прирост эквивалента по стойкости при применении ДЗ) от БПС	мм	Б6
7.	Динамическая защита (прирост эквивалента по стойкости при применении ДЗ) от ПТУР	мм	Б7
8.	Динамическая защита (прирост эквивалента по стойкости при применении ДЗ) от КС	мм	Б8
9.	ЭПР для $\lambda=3,2$ см	м <sup>2</sup>	Б9
10.	Средняя температура выхлопных газов	°С	Б10
11.	Температурный контраст танка $\Delta T$	°С	Б11
<b>3</b>	<b>Вооружение</b>		
1.	Длина ствола	мм/калибр	В1
2.	Живучесть ствола	выстр.	В2
3.	Погрешность вибрационного рассеивания пушки	т.д.	В3
4.	Погрешность технической подготовки пушки	т.д.	В4
5.	Бронепробиваемость, $\alpha=60^\circ D=2$ км	мм	В5
6.	Начальная скорость БПС	м/сек	В6
7.	Падение начальной скорости снаряда на 100м полета	м/с	В7
8.	Погрешность технического рассеивания снаряда	т.д.	В8
9.	Прибор командира – панорамный	да, нет	В9
10.	Увеличение	х	В10
11.	Угол поля зрения	град	В11
12.	Стабилизация поля зрения	мрад (т.д.)	В12
13.	Дальномер лазерный или оптический	ЛД / ОД	В13
14.	Ночной прицел, дальность видения	м	В14
15.	Угол поля зрения	град	В15
16.	Стабилизация поля зрения	мрад (т.д.)	В16
17.	Основной прибор наводчика перископический	да, нет	В17
18.	Увеличение	Х	В18
19.	Угол поля зрения	град	В19
20.	Стабилизация поля зрения	мрад (т.д.)	В20
21.	Дальномер лазерный или оптический	ЛД / ОД	В21
22.	Ночной прицел наводчика, дальность видения	м	В22
23.	Угол поля зрения		В23
24.	Стабилизация поля зрения		В24
25.	Стабилизатор основного вооружения, погрешность	т.д. (мрад)	В25
26.	Скорость переброса	град/сек	В26
27.	Погрешность подготовки данных для стрельбы	т.д. (мрад)	В27

Продолжение таблицы 1

№ п/п	Группы показателей	Размерность	Обозначение
<b>Вооружение БМП, БТР</b>			
28.	Мах углы наведения по вертикали	град	В30
<b>4</b>	<b>Качественные показатели</b>		
1.	Автомат заряжания	0 1	К1
2.	Система автоматического сопровождения целей	0 1	К2
3.	Система встроенного контроля выверки прицела с пушкой или система учета изгиба ствола	0 0,5 1	К3
4.	Система автоматической разведки целей в диапазонах: оптическом, ИК, радиотехническом и акустическом диапазонах (в одном или двух, или в любых трех либо во всех четырех)	0 0,5 0,6 0,8 1	К4
5.	Интегральная цифровая система управления и контроля компонентами комплекса вооружения	0 1	К5
6.	Помехозащитные цифровые средства связи с ППРУ или навигационная система или автоматизированная система управления боем подразделения тактического звена	0 0,5 0,75 1	К6
7.	Активная защита	0 1	К7
8.	Система регистрации лазерного или лазерного и радиотехнического облучения	0 0,5 1	К8
9.	Система постановки защитного экрана (облака) в диапазонах - оптическом, ИК и радиотехническом диапазонах (одном или любых двух или во всех трех)	0 0,5 0,75 1	К9
10.	Система (ы) создания помех или ложных целей в оптическом, ИК и радиотехническом диапазонах (одном или любых двух или во всех трех)	0 0,5 0,75 1	К10
11.	Маскировочные сети в одном из диапазонов: оптическом, ИК и радиотехническом диапазонах (или в любых двух или во всех)	0 0,5 0,7 1	К11
12.	Интегральная цифровая система управления и контроля составных частей силовой установки, трансмиссии, ходовой части с места мех.-водителя или с мест мех.-водителя и командира	0 0,5 1	К12
13.	Автоматизированная система управления натяжением гусеничных лент	0 1	К13
14.	Автоматизированная система управления параметрами подвески, в том числе клиренсом.	0 1	К14

Обозначение	Наименование	Раз-ть	Значение	Уровень разработки	
				достигнутый	перспективный
О1	Масса	т			

Рисунок 1 – Форма анкеты для 1-й и 2-й групп экспертов

С учетом этого, с использованием рекомендаций [2, 4, 6] составлена анкета, представленная в таблице 2

Таблица 2 – Анкета для оценки единичного показателя и его характеристик

№ п/п	Группа хар-к	Показатели качественных характеристик	Ответ	Значение метрического свойства	Весовой коэффициент		
1	Время	Срок выполнения (достижения) показателя	1 год	1,0	0,25		
			2-3 года	0,5			
			5 лет	0			
2	Уровень	Методы, техника и технологии достижения показателя	существующие	1,0	0,25		
			новые	0,5			
			затр. отв.	0			
3		Соответствие современным тенденциям развития	соотв. разраб.	1,0			
			зарубежные	0,5			
			мировые	0			
4		Наличие аналогов	отсутствуют	1,0		0,25	
			есть в Украине	0,7			
			есть за рубежом	0,4			
			имеются сведения об аналогах	0			
5	реальность	Объем финансирования	приемлемые	1,0	0,15		
			завышенные	0,5			
			заниженные	0			
6		Квалификация, опыт отечественных исполнителей	достаточные	1,0			
			недостаточные	0,5			
			отсутствуют	0			
7		Уровень разработки	имеются серийные образцы	1,0			
			опытные образцы	0,5			
			отсутствует (начальный)	0			
8		Производственно техническая и технологическая базы	достаточная	1,0			
			требует развития	0,5			
			нет	0			
9		результат	Ожидаемый результат	выводит на качественно новый уровень		1,0	0,35
				соответствует мировым достижениям		0,5	
				прикладной		0	
10	Наличие спроса на мировом рынке вооружений		есть	1,0			
			нужно формировать	0,5			
			затруднит. ответить	0			

Обработка результатов этой анкеты отличалась от изложенного выше подхода таким образом, что оценивался качественный уровень рационального показателя путем нахождения среднего в группе характеристик  $C_{T_i}$  с последующим суммированием с учетом весового коэффициента  $K_v$  :

$$\Pi_R^K = \sum_{i=1}^n K_{V_i} \cdot C_{T_i}, \quad (8)$$

При этом показатель считался обоснованным и реализуемым при  $1 \geq \Pi_R^K \geq 0,9$ . При значении  $\Pi_R^K < 0,515$  считали, что показатель с таким значением не может быть реализован. И при значениях  $1 > \Pi_R^K \geq 0,75$  считался таким, что может быть достигнут с привлечением дополнительных ресурсов; при  $0,75 > \Pi_R^K > 0,515$  – проблематично.

Таким образом, решалась задача составления анкет и опроса с их помощью экспертов. Следует отметить, что наибольшие трудности возникли с экспертизой по отдельным перспективным показателям.

Несмотря на понятное и объяснимое стремление – определить параметры настолько исчерпывающе, насколько это возможно для сложных технических систем, учитывая большое количество взаимосвязанных и влияющих внешних факторов, существуют ситуации, когда уровень имеющейся информации недостаточен, а количество специалистов – носителей этой информации – ничтожно мало.

Поэтому нужно подчеркнуть, что субъективное определение параметров и характеристик не снискало себе доброй славы. В первую очередь это связано с тем, что один и тот же специалист, оценивая вероятности по различным дискретным значениям, приходит к противоречивым выводам.

Чтобы избежать ложных оценок, далеко не все параметры, отмеченные как перспективные, были подвергнуты экспертизе. Это объясняется двумя факторами. Во-первых – масштабностью задачи, которая выходит далеко за рамки настоящего исследования, где разработан регулярный подход к построению рациональных характеристик объекта БТТ. Во-вторых – физическим отсутствием необходимого числа экспертов по некоторым отдельным показателям для осуществления экспертизы.

Оценки компетентных комиссий экспертов также порой могут приводить к разочаровывающим результатам, так как за счет увеличения числа экспертов устраняются случайные ошибки, а не систематические, но при этом возникают новые, вызванные взаимным влиянием оценок.

Несмотря на это, субъективные оценки в проектно-конструкторских работах и промышленности присутствуют. При этом необходимо различать параметры, которые оцениваются на основе ретроспективного анализа и перспективные, которые должны реализовываться в будущем. В последнем случае нужно, прежде всего, оценить, останутся ли существующие условия неизменными. Эта задача для объектов вооружения стоит особенно остро, т.к. здесь, в первую очередь, внедряются самые прогрессивные «прорывные» технологии.

### Литература

1. Анипко О.Б., Бусяк Ю.М., Рикунев О.Н. Анализ изменения приоритетов легких боевых колесных и гусеничных машин. 1/ИТЭ, №3, 2007 с.
2. Бешенев С.Д., Гурвич Ф.Г. Экспертные оценки. М. Наука. 1973. 159 с.
3. Чуев Ю.Г. Прогнозирование в военном деле. М. Радио и связь. 1975.
4. Мітрахович М.М. Складні технічні системи. Системне математичне забезпечення проектних рішень. Київ: «Ніглава», 1998.–184 с.
5. Радвик В. Военное планирование и анализ систем. М. 1972.– 480 с.
6. Нарусбаев А.А. Введение в теорию обоснования проектных решений. Л. Судостроение 1976.– 221 с.

### Bibliography (transliterated)

1. Anipko O.B., Busyak Yu.M., Rikunov O.N. Analiz izmeneniya prioritetov leg-kih boevyih kolesnyih i gusenichnyih mashin. 1/ITE, #3, 2007 p.
2. Beshenev S.D., Gurchich F.G. Ekspertnyie otsenki. M. Nauka. 1973. 159 p.
3. Chuev Yu.G. Prognozirovanie v voennom dele. M. Radio i svyaz. 1975.
4. Mitrahovich M.M. Skladni tehichni sistemi. Sistemne matematichne zabezpechennya proektnih rishen. Kiyiv: «Niglava», 1998.–184 p.
5. Radvik V. Voennoe planirovanie i analiz sistem. M. 1972.– 480 p.

6. Narusbaev A.A. Vvedenie v teoriyu obosnovaniya proektnyih resheniy. L. Sudostroenie 1976.– 221 p.

УДК 681.322.06

Бусяк Ю.М.

**ПРО ФОРМУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПОКАЗНИКІВ ТАКТИКО-ТЕХНІЧНИХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ОБ'ЄКТА БРОНЕТЕХНІКИ ЕКСПЕРТНИМ МЕТОДОМ**

У статті наведено розроблений перелік показників щодо анкет, які використовуються для евристичної експертизи при формуванні раціональних характеристик об'єктів бронетехніки.

УДК: 533.15

Землянка О.О.

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ КІНЕТИКИ ПРОЦЕСУ  
АНАЕРОБНОГО БРОДІННЯ ОРГАНІЧНИХ ВІДХОДІВ  
В ФЕРМЕНТАТОРІ БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ***Український державний хіміко-технологічний університет, м. Дніпропетровськ***Вступ**

Малі біогазові установки є найбільш доступним джерелом відновлюваної енергії та утилізації сільськогосподарських відходів.

Потужність, ефективність установки та експлуатаційна надійність залежить від її типу та досконалості. Покращення цих показників – основний напрямок досліджень з метою, передусім, мінімізації терміну окупності та підвищенню рентабельності. Важливість такої роботи для України обумовлена необхідністю поширення малих біогазових установок в умовах зростання цін на енергоносії, вартості нового будівництва, підвищення екологічних вимог.

**Мета роботи**

В теперішній час доведено позитивний вплив перемішування на продуктивність метаногенерації та негативного впливу надмірної його інтенсивності на життєдіяльність метаногенних мікроорганізмів. Для рішення даної проблеми автором пропонується підхід, який базується на математичному моделюванні впливу перемішування та підігріву на кінетику процесу анаеробного бродіння органічних відходів.

При дослідженні процесів кінетики в системах анаеробного бродіння основна проблема полягає в багатостадійності кінетичного процесу [1], [3], та багатофазності реакційного середовища.

Виходячи з вказаних труднощів, автором пропонується застосування математичної моделі, яка дозволяє відобразити вплив температури та перемішування на інтенсивність генерації метану.

**Методика дослідження**

Структурно математична модель метаногенерації (анаеробного бродіння) складається з блоків, які описують гідродинаміку, теплообмін та кінетику в реакторі біогазової установки. Система рівнянь блоків, які описують гідродинаміку та теплообмін, наведена в [7]. В даній статті наведено систему рівнянь, яка описує кінетику в реакторі біогазової установки, що складається з рівнянь збереження хімічної компоненти [5]. В основу цієї системи рівнянь покладена модель [1], так як вона дозволяє відобразити вплив температури та перемішування на інтенсивність генерації метану.

Для випадку циліндричної системи координат та двомірної задачі маємо:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} + \frac{\partial(uW)}{\partial r} + \frac{\partial(vW)}{\partial z} + \frac{uW}{r} = -kWf_h(S); \quad (1)$$

$$\frac{\partial S}{\partial \tau} + \frac{\partial(uS)}{\partial r} + \frac{\partial(vS)}{\partial z} + \frac{uS}{r} = D_s \left( \frac{\partial^2 S}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial S}{\partial r} \right) + \chi k W f_h(S) - \rho_m T_f f_m(S) \frac{SB}{K_s + S}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial B}{\partial \tau} + \frac{\partial(uB)}{\partial r} + \frac{\partial(vB)}{\partial z} + \frac{uB}{r} = D_B \left( \frac{\partial^2 B}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 B}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial B}{\partial r} \right) + Y_i \rho_m T_f f_m(S) \frac{SB}{K_s + S} - k_d B; \quad (3)$$

$$\frac{\partial P}{\partial \tau} + \frac{\partial(uP)}{\partial r} + \frac{\partial(vP)}{\partial z} + \frac{uP}{r} = A(1 - Y_i) \rho_m T_f f_m(S) \frac{SB}{K_s + S}, \quad (4)$$

де  $r, z$  – поточні координати;  $u, v$  – радіальна та вагова складові швидкості;  $W$  – концентрація органічної речовини;  $k$  – константа гідролізу;  $k_d$  – коефіцієнт распаду біомаси;  $S$  – концентрація субстрату – летючих жирних кислот (ЛЖК);  $\chi$  – стехіометричний коефіцієнт видобутку субстрату з органічної речовини;  $B$  – концентрація метаногенних мікроорганізмів;  $P$  – концентрація продуктів метаболізму;  $\rho_m$  – максимальна питома швидкість утилізації ЛЖК;  $K_s$  – константа швидкості, яка дорівнює концентрації субстрату, при якій швидкість росту культури дорівнює половині максимальної;  $f_h(S)$  – функція інгібування стадії гідролізу субстратом;  $f_m(S)$  – функція інгібування стадії метаноутворення субстратом:

$$f_h(S) = \frac{1}{1 + \left( \frac{S}{K_h} \right)^{n_h}}; \quad f_m(S) = \frac{1}{1 + \left( \frac{S}{K_m} \right)^{n_m}},$$

$D_s$  – коефіцієнт дифузії субстрату;  $D_B$  – коефіцієнт дифузії мікроорганізмів;  $Y_i$  – економічний коефіцієнт виходу одиниці продукту з одиниці біомаси ( $\partial P / \partial B$ );  $A$  – масова частка метану в біогазі;  $T_f$  – безрозмірна температурна функція для реакцій метаноутворення [4]:

$$T_f = e^{-(t_m - t)^2 / \sigma^2},$$

$t$  – температура рідини,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_m$  – оптимальна температура розвитку мікроорганізмів;  $\sigma$  – діапазон температур в якому швидкість росту мікроорганізмів змінюється в  $e$  разів. У загальному вигляді побудована математична модель є задачею Коші для системи звичайних диференціальних рівнянь. Рівняння (1) описує швидкість реакцій гідролізу органічної речовини. Рівняння (2) описує швидкість споживання субстрату (ЛЖК) метаноутворюючими бактеріями. Рівняння (3) відображає швидкість розмноження мікроорганізмів. Рівняння (4) відображає швидкість утворення метану.

Для моделі анаеробного бродіння в реакторі біогазової установки мають місце наступні умови однозначності:

- граничних умов на стінках ферментатора, на вільній поверхні, у місцях завантаження і розвантаження;
- початкових умов;
- умови, які характеризують періодичність завантаження і вмикання перемішу-

вання.

Для даного прикладу умови однозначності наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Граничні умови на стінках ферментатора, на вільній поверхні

Границя	Область значень	Граничні умови
днище реактора	$0 < r < R, z = 0$	$u, v = 0; \frac{\partial T}{\partial z} = const; \frac{\partial}{\partial z}(W, S, B, P) = 0$
вільна поверхня	$0 < r < R, z = H$	$\frac{\partial}{\partial z}(u, v) = 0; \frac{\partial T}{\partial z} = const; \frac{\partial}{\partial z}(W, S, B, P) = 0$
вісь симетрії	$0 < z < H, r = 0$	$\frac{\partial}{\partial r}(u, v) = 0; \frac{\partial T}{\partial r} = 0; \frac{\partial}{\partial r}(W, S, B, P) = 0$
внутрішня бокова стінка	$0 < z < H, r = R$	$u, v = 0; \frac{\partial T}{\partial r} = const; \frac{\partial}{\partial r}(W, S, B, P) = 0$

Початкові умови характеризуються розподілом концентрацій та температур по об'єму реактора:

$$W(r, z, 0) = W_0; S(r, z, 0) = 0; B(r, z, 0) = B_0; P(r, z, 0) = 0.$$

Розподіл температур по об'єму реактора, який необхідний для розв'язання системи рівнянь  $T(r, z, 0)$ , обчислюється в результаті розв'язання системи рівнянь теплообміну.

Значення кінетичних констант в наведеній системі рівнянь брались у відповідності до робіт [1,2,6] наведені в таблиці 2. Частина констант розрахована автором у відповідності до умов об'єкту дослідження.

$k$  – константа гідролізу.

Враховуючи те, що органічна речовина умовно складається з білків, жирів, вуглеводів, розраховується по формулі

$$k = k_b \cdot g_b + k_{ж} \cdot g_{ж} + k_g \cdot g_g,$$

де  $g_b, g_{ж}, g_g$  – масові частки білків, жирів, вуглеводів в органічній речовині;  $k_b, k_{ж}, k_g$  – константи швидкостей реакцій гідролізу білків, жирів, вуглеводів:



Для конкретного виду відходів константа гідролізу знаходиться як константа швидкості реакцій першого порядку.

$\chi$  – стехіометричний коефіцієнт.

Згідно рівнянь реакцій (5)–(7) в залежності від складу відходів на одну молекулу субстрату пропонується підрахувати за формулою

$$\chi = \chi_{\bar{o}} \cdot g_{\bar{o}} + \chi_{\text{жс}} \cdot g_{\text{жс}} + \chi_e \cdot g_e.$$

$\rho_m$  – максимальна швидкість росту мікроорганізмів.

Визначається за формулою

$$\rho_m = \frac{\ln 2}{g},$$

де  $g$  – час подвоєння чисельності популяції.

$D_S, D_B$  – коефіцієнти дифузії ЛЖК та біомаси в воді.

У випадку субстратів невеликої молекулярної маси розраховуються за формулою Уилкі [8]:

$$D = 7,4 \cdot 10^{-8} \frac{T(x_a M)^{0.5}}{\mu_i \cdot V_m^{0.8}}$$

і для води як розчинника  $D = 7 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup>/с.

Процеси інгібування метаногенезу та відмирання мікроорганізмів не бралися до уваги, так як вони істотно не впливають на вихід метану в даному випадку.

Таблиця 2 – Значення кінетичних констант в системі рівнянь математичної моделі

Константа	значення	одиниця вимірювання	Константа	значення	одиниця вимірювання
$k$	0,11	1/добу	$Y$	0,08	-
$k_d$	0	1/добу	$D_S$	$3 \cdot 10^{-9}$	м <sup>2</sup> /добу
$\rho_m$	0,035	1/добу	$D_B$	$3 \cdot 10^{-9}$	м <sup>2</sup> /добу
$\chi$	0,18	-			
$A$	0,6	-			
$K_S$	0,8	г/л			

Систему (1–4) вирішено чисельно за допомогою методу контрольних об'ємів [5].

Параметри моделі підбрано для процесу бродіння з такими характеристиками: відходи – гній великої рогатої худоби; вологість 92 %; корисний об'єм реактора 6 м<sup>3</sup>.

### Результати і обговорення

Для перевірки адекватності моделі розраховано динаміку виходу метану для випадку реактора ідеального змішування періодичної дії, та при наявності однакової по

об'єму реактора температурі. Результати порівнювались з даними експериментів при різних температурах [3].

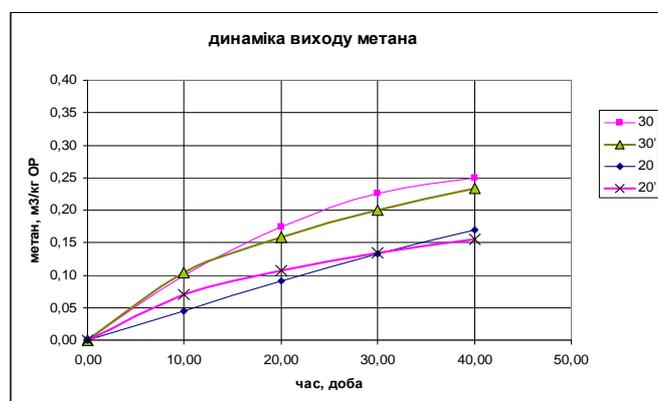


Рисунок 1 – Динаміка виходу біогазу

30 – експериментальні дані при 30 °С; 30' – результати розрахунків моделі при 30 °С;  
20 – експериментальні дані при 20 °С; 20' – результати розрахунків моделі при 20 °С

На рис. 1 відображено порівняння динаміки виходу біогазу за даними експерименту [3] з розрахунковими даними математичної моделі при температурах бродіння 20 та 30 °С, рівномірно розподілених по об'єму реактора. Максимальна розбіжність результатів складає 10–20 % від загального діапазону метаноутворення. Порівняння цих характеристик доводить, що результати запропонованої математичної моделі є фізично коректними, і не суперечать результатам відомих авторів [1,3,4].

Для апробації моделі в умовах поставленої мети розраховано поле концентрацій метану у випадку наявності поля температур по об'єму реактора, отриманого за допомогою моделювання процесу теплообміну, на основі якого було обчислено середній вихід метану в циліндричному реакторі корисним об'ємом 6 м<sup>3</sup>. В даному випадку обмежимося тим, що в реакторі перемішування не відбувається. Середній вихід метану в описаному випадку було порівняно з аналогічним випадком тільки з однаковою середньою температурою по об'єму реактора, розрахованої на основі поля температур.

На рис. 2 відображено розподілення концентрації видобутого метану по об'єму реактора при наявності поля температур, час перебування відходів в реакторі 40 діб. Середньоінтегральний вихід метану в реакторі при нерівномірному розподілу температур складає 152 м<sup>3</sup>. В цьому випадку газогенерація спливає швидше в зонах реактора з підвищеною температурою, що пояснюється зростом чисельності популяції метаногенної флори.

В аналогічному випадку, але при наявності середньої по реактору температури 26,7 °С, вихід метану по робочому об'єму складає 148 м<sup>3</sup>. Це доводить те, що модель дозволяє більш точно розраховувати вихід метану з врахуванням розподілу температур по об'єму реактора.

### Висновки

Розроблено математичну модель процесу бродіння, яка подається у формі задачі Коші для системи диференціальних рівнянь. Параметри моделі враховують залежність від температури. Одержані результати було узгоджено з експериментальними даними, що дало змогу застосовувати побудовану математичну модель для прогнозування процесу анаеробного бродіння за різних тепло- і гідродинамічних режимів з метою досягнення оптимальної продуктивності біогазової установки.

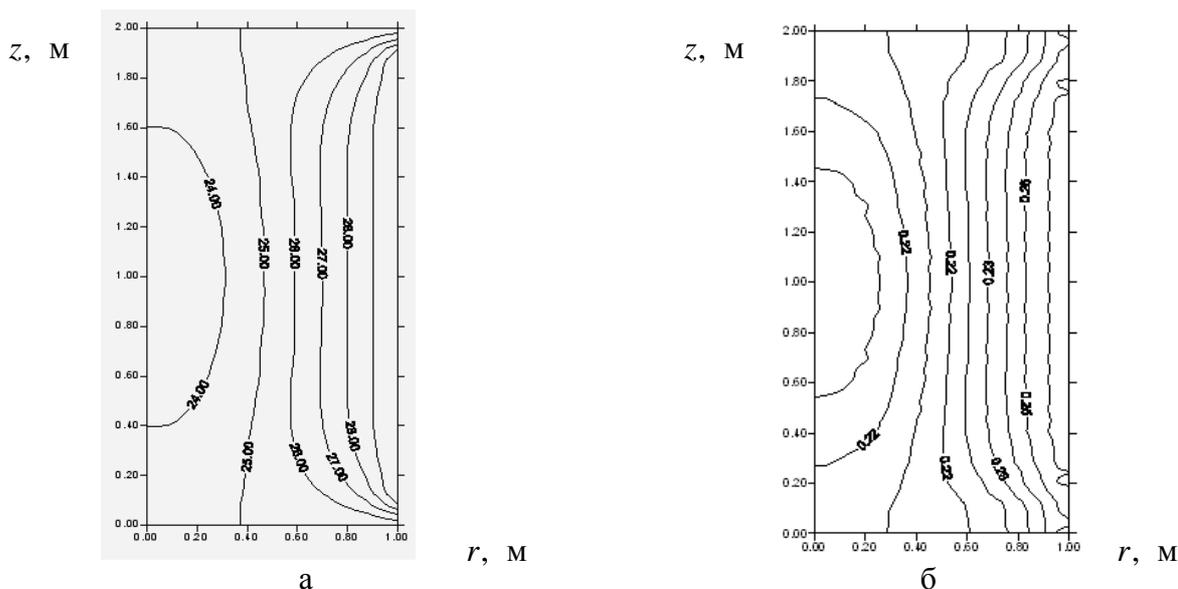


Рисунок 2 – Результаты расчетов модели при наличии поля температур  
 а – поле температур в реакторе, °С; б – поле газогенерации (биогаз), м<sup>3</sup>/кг органической речовини

#### Література

1. Vavilin VA, Schelkanov MY, Lokshina LYa. 2001. The effect of fatty acid diffusion in leachate on the propagation of concentration waves in the process of municipal solid waste decomposition. *Water Resources* 28: 756–762.
2. Vavilin VA, Rytov SV, Pavlostathis SG, Jokela J, Rintala J. 2003b. A distributed model of solid waste anaerobic digestion: sensitivity analysis. *Wat Sci Technol* 48/4: 147–154.
3. Баадер В. Биогаз. Теория и практика. Пер. с англ. под редакцией В.Д. Виленского. – М.: Энергоатомиздат, 1984.–152 с.
4. Botle J., Nordstedt R., Thomas M. Mathematical simulation of fixed bed reactors. - №4052 American society of agricultural engineers, 1983, p. 1–23.
5. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
6. Вавилин В.А., Васильев В.Б. Моделирование деструкции органического вещества сообществом микроорганизмов.– М.: Наука, 1993–200 с.
7. Землянка А.А. Математическая модель гидродинамики и теплообмена в цилиндрическом ферментаторе биогазовой установки с погруженным в него цилиндрическим теплообменником. *Вопросы химии и химической технологии* №1.– 2004 г., с. 181.
8. Бейли Дж., Оллис Д. Основы биохимической инженерии. Пер. с англ. А.А. Кирюшкина. В 2-х частях. Ч. 1-М.: Мир., 1989.– 692 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Vavilin VA, Schelkanov MY, Lokshina LYa. 2001. The effect of fatty acid diffusion in leachate on the propagation of concentration waves in the process of municipal solid waste decomposition. *Water Resources* 28: 756–762.
2. Vavilin VA, Rytov SV, Pavlostathis SG, Jokela J, Rintala J. 2003b. A distributed model of solid waste anaerobic digestion: sensitivity analysis. *Wat Sci Technol* 48/4: 147–154.

3. Baader V. Biogaz. Teoriya i praktika. Per. s angl. pod redaktsiey V.D. Vilen-skogo. – M.: Energoatomizdat, 1984.–152 p.
4. Botle J., Nordstedt R., Thomas M. Mathematical simulation of fixed bed reactors. - #4052 American society of agricultural engineers, 1983, p. 1–23.
5. Patankar S. Chislennyye metodyi resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti. Per. s angl. – M.: Energoatomizdat, 1984. – 152 p.
6. Vavilin V.A., Vasilev V.B. Modelirovanie destruktсии organicheskogo veschestva soobshchestvom mikroorganizmov.– M.: Nauka, 1993–200 p.
7. Zemlyanka A.A. Matematicheskaya model gidrodinamiki i teploobmena v tsilindricheskom fermentatore biogazovoy ustanovki s pogrzhennym v nego tsilindricheskim teploobmennikom. Voprosyi himii i himicheskoy tehnologii #1.– 2004 g., p. 181.
8. Beyli Dzh., Ollis D. Osnovy biokhimicheskoy inzhenerii. Per. s ang. A.A. Kuryushkina. V 2-h chastyah. Ch. 1-M.: Mir., 1989.– 692 p.

УДК: 533.15

Землянка А.А.

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА АНАЭРОБНОГО СБРАЖИВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ОТХОДОВ**

Построена математическая модель расчета выхода метана при сбраживании органических отходов на основе постановки сопряженной задачи. Рассчитано распределение концентраций метана по объему реактора. Проведено сравнение с экспериментом.

Черкашина В.В.

### РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ЗАДАЧ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ КРИТЕРИАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Вопросы повышения энергоэффективности и реализации потенциала энергосбережения связаны с решением ряда задач, относящихся к совершенствованию структуры электроэнергетических систем. Одним из путей совершенствования структуры электроэнергетических систем является и унификация воздушных линий (ВЛ) электропередачи. При решении задач унификации целесообразно руководствоваться системой иерархически построенных и взаимосвязанных технико-экономических моделей разных функциональных уровней, при этом стратегия поиска осложняется неполнотой исходной информации и многокритериальностью.

В качестве инструмента исследования данных технико-экономических задач в электроэнергетике применяется критериальный метод, позволяющий вести анализ при неполной исходной информации. Возможной реализацией критериального метода является решение по одному из критериев и замена дополнительных критериев системой ограничений. В каждом конкретном случае выделение "главного критерия" и построение системы ограничений связано с условиями задачи, с тактикой и методикой ее реализации. Чтобы построить общую методику унификации в целом, необходимо выявить целесообразное сокращение типоразмеров конструктивных элементов ВЛ, к которым, прежде всего, относятся опоры и провода линии электропередачи. Поскольку задача по сокращению типоразмеров опор в определенной мере решена, то задача обоснования шкалы сечений унифицированных ВЛ является актуальной с учетом многокритериальности и неопределенности исходной информации. [1,2]. Выбор направления зависит от вида подкласса, к которому относится функция цели. Обычно технико-экономические задачи в энергетике описываются с помощью полиномиальных уравнений нескольких переменных с учетом технических требований к этим переменным.

В 70-х годах прошлого века на кафедре МЭИ разработан метод критериального программирования, основанный на теории подобия, позволяющий минимизировать полином вида

$$Y_{(x)} = \sum_{i=1}^{T_1} A_i \prod_{j=1}^n x_j^{\alpha_{ij}}, \quad (1)$$

где  $A_i$  – положительные обобщенные константы, несущие детерминированный или вероятностный характер в зависимости от условий задачи и представляющие собой исходную информацию об объекте;  $x_j$  – параметры оптимизации, положительные переменные;  $\alpha_{ij}$  – показатели степени, действительные числа;  $m_1$  – число слагаемых в полиноме;  $n$  – число независимых параметров.

Ограничения, накладываемые на отдельные переменные  $x_j$  и на их комплексы, представляются в виде полиномов аналогичных (1) [3]

$$q_k(x) = \sum_{i=r_{k+1}}^{T_{k+1}} A_i \prod_{j=1}^n x_j^{\alpha_{ij}} \leq 1. \quad (2)$$

Необходимым условием существования условного минимума функции с учетом всех ограничений является требование каноничности функции, под которым понимают выполнение следующего соотношения:

$$M - n - 1 = 0, \quad (M = n + 1), \quad (3)$$

где  $M$  – общее число слагаемых в полиноме и ограничениях.

Достоинством разработанного метода является: определение оптимальных значений функции цели; параметров оптимизации; оценка устойчивости функции к изменению параметров в диапазоне точки минимума; исследование чувствительности решения задачи при изменении исходной информации. [4,5]

При решении технико-экономических задач важно знать влияние отклонения исходной информации на исходный экономический вариант. Исследование чувствительности позволит обосновать необходимую степень точности исходной информации. Особенно хорошо данному анализу поддаются канонические модели.

Канонические модели в энергетике могут быть представлены в виде полинома

$$Y = A_0 \sum_{i=1}^{n+1} A_i \prod_{j=1}^n x_j^{\alpha_{ij}}. \quad (4)$$

Критериальный метод позволяет исследование данной функции (4) в диапазоне  $n + 1$  базисной точки – мерном пространстве параметров оптимизации  $x_j$  и функции  $Y$ .

Постоянная составляющая  $A_0$  (4) имеет значение только при оценке полной величины функции, в других случаях ею можно пренебречь.

$$Y_1 = \sum_{i=1}^{n+1} A_i \prod_{j=1}^n x_j. \quad (5)$$

Очень часто обобщенные константы  $A_i$  известны лишь приближенно, поэтому применяемый критериальный метод позволяет вести исследования на критериальных моделях, имеющих вид:

$$Y_{*1} = \sum_{i=1}^{n+1} \pi_i \prod_{j=1}^n x_{*j}^{\alpha_{ij}}, \quad (6)$$

где  $\pi_i$  – критерий подобия, определяемый как:

$$\pi_i = \frac{A_i}{y_{i0}} \prod_{j=1}^n x_{j0}^{\alpha_{ij}}, \quad i = \overline{1, n+1}, \quad (7)$$

$x_{*j}$  – относительное значение параметров оптимизации;  $\alpha_{ij}$  – действительные числа;

$Y_{*1}$  – относительная величина переменной части функции (рис. 1).

Сформулировав основной признак канонической функции (5), необходимо соблюдать условие – число слагаемых в полиноме должно на единицу превышать число переменных  $x = (x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ . Систематические процедуры необходимо проводить, анализируя матрицу, составленную из показателей степени  $x_j$ . Так как аналогичные матрицы используются при определении критериев подобия методом анализа размерностей, то они называются матрицами размерностей [4]. Рассмотрим квадратичную матрицу  $A_1$  порядка  $(n+1)$ , полученную путем присоединения к матрице размерностей  $(\alpha_{ij})$  столбца, составленного из единиц

$$A_1 = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1n} & 1 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2n} & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{n+11} & \alpha_{n+12} & \dots & \alpha_{n+1n} & 1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

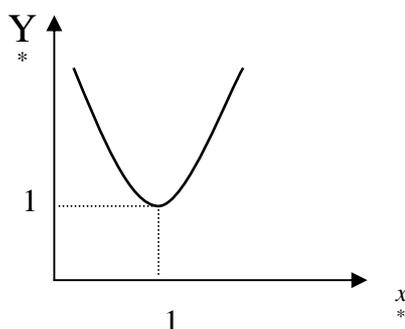


Рисунок 1 – Критериальная форма представления модели

Для того, чтобы функция (5) была канонической, необходимо, чтобы алгебраические дополнения элементов последнего столбца матрицы  $A_1$  были отличны от нуля и имели один знак. Если соблюдается условие каноничности, то функция имеет единственную точку экстремума  $x_0$ , в которой достигается минимум

$$d y (x_0) = 0. \quad (9)$$

Для анализа функции с ограничениями применяют функцию Лагранжа, минимум которой по переменным совпадает с условием минимумов целевой функции с ограничениями. Данная функция имеет вид:

$$L(x) = y(x) + \sum_{k=1}^p \mu_{k0} [q_k(x) - 1], \quad (10)$$

где  $L(x)$  – функция Лагранжа;  $y(x)$  – целевая функция;  $q_k(x)$  – количественные ограничения;  $\mu_{k0}$  – неопределенные множители Лагранжа, значения которых определяются при нахождении условного минимума.

Функция  $y(x)$  с ограничениями  $q_k(x)$  имеет условный минимум, если система уравнений:

$$\sum_{i=1}^M \alpha_{ij} \pi_i = 0, \quad j = \overline{1, n}, \quad (11)$$

полученная из частных производных функции Лагранжа в точке минимума, имеет хотя бы одно положительное решение  $\pi_i > 0, i = 1, M$  ( $M$  – общее число слагаемых целевой функции и ограничений). [4]

Таким образом, критериальный метод позволяет анализировать функции заданного подкласса и, при выполнении условий каноничности, технико-экономические модели реализуют все технико-экономические задачи при неопределенной исходной информации. Следовательно, одной из оптимальных форм решения технико-экономических задач является данное представление моделей, удовлетворяющее условиям каноничности и используемое для реализации существующих алгоритмов критериального метода.

#### Литература

1. Н.М. Черемисин, В.И. Романченко. Критериальный анализ технико-экономических моделей ВЛ в условиях неполноты исходной информации. // Питання електрофікації сільського господарства. (50 років – ювілейний випуск). Сборник научных трудов. – Харьков: ХДТУСГ – 1998.– С. 21–25.
2. Будзко И.А., Астахов Ю.Н., Черемисин Н.М. Унификация воздушных линий электропередачи // Электричество – 1982.-№2. – С. 1–8
3. Ю.Н. Астахов, Н.М. Черемисин, В.М. Зубков. К вопросу однозначности решения неканонических технико-экономических моделей // Применение электрической энергии в сельском хозяйстве. – Москва.– 1976.– Т.ХІІІ. вып.6 – С. 20–23.
4. Ю.Н. Астахов, Н.М. Черемисин, Б.М. Ильченко. Критериальный метод и его применение для анализа систем электроснабжения. Учебное пособие. М – 1986.– 45 с.
5. В.А. Веников, Ю.Н. Астахов, А.А. Федосеев. Критериальный анализ энергетических объектов при неполной исходной информации. // Фактор неопределенности при принятии оптимальных решений в больших системах энергетики. – Иркутск – 1974.– Т.1 – С. 18–22.

#### Bibliography (transliterated)

1. N.M. Cheremisin, V.I. Romanchenko. Kriterialnyiy analiz tehniko-ekonomicheskikh modeley VL v usloviyakh nepolnotyi ishodnoy informatsii. Pitannya elektrofikatsiyi silskogo gospodarstva. (50 rokov – yuvileyniy vipusk). Sbornik nauch-nyih trudov. – Harkov: HDTUSG – 1998.– p. 21–25.
2. Budzko I.A., Astahov Yu.N., Cheremisin N.M. Unifikatsiya vozdushnyih liniy elektroperedachi Elektrichestvo – 1982.-#2. – p. 1–8
3. Yu.N. Astahov, N.M. Cheremisin, V.M. Zubkov. K voprosu odnoznachnosti resheniya nekanonicheskikh tehniko-ekonomicheskikh modeley Primenenie elektricheskoy energii v selskom hozyaystve. – Moskva.– 1976.– Т.ХІІІ. vyip.6 – p. 20–23.
4. Yu.N. Astahov, N.M. Cheremisin, B.M. Ilchenko. Kriterialnyiy metod i ego primeneniye dlya analiza sistem elektrosnabzheniya. Uchebnoye posobie. M – 1986.– 45 p.
5. V.A. Venikov, Yu.N. Astahov, A.A. Fedoseev. Kriterialnyiy analiz energe-ticheskikh ob'ektov pri nepolnoy ishodnoy informatsii. Faktor neopredelennosti pri prinyatii optimalnyih resheniy v bolshih sistemah energetiki. – Irkutsk – 1974.– Т.1 – p. 18–22.

УДК 621.314

Черкашина В.В.

**РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ЗАДАЧ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЦІ  
КРИТЕРІАЛЬНИМ МЕТОДОМ**

Розглянуто критеріальний метод, який застосовується для рішення техніко-економічних задач в електроенергетиці. Даний метод дозволяє аналізувати функції заданого підкласу  $i$ , при виконанні умов канонічності техніко-економічної моделі, реалізує всі техніко-економічні задачі при невизначеній інформації. Запропоновано форму представлення моделі, яка задовольняє умовам канонічності і є оптимальною для рішення задач в електроенергетиці.

Черкашенко М.В., Фатеев А.Н., Фатеева Н.Н.

## К ВОПРОСУ СИНТЕЗА СХЕМ ГИДРОПНЕВМОАГРЕГАТОВ

Из существующих подходов к синтезу схем гидропневмоагрегатов можно выделить три, один из которых (элементный) предусматривает выражение выходных сигналов через входные с последовательным введением элементов памяти (ЭП) [1], второй – стандартное размещение памяти устройства с одновременной индикацией временных интервалов реализуемого процесса (агрегатный), с использованием командоаппарата [2,3]. Третий, предложенный М.В. Черкашенко [4,5], основанный на симбиозе и сочетает положительные особенности двух упомянутых выше. Основным преимуществом элементного подхода является то, что получаемая в результате проектирования схема содержит близкое к минимальному числу логических элементов.

В целом, главными недостатками элементного подхода является: последовательное неформальное введение ЭП и размещение внутренних состояний; совместная минимизация системы логических уравнений большого количества переменных с помощью карт Карно (что для управляющих автоматов большой размерности становится невозможным даже с применением ЭВМ) или неформальное удлинение наборов, которые вызывают переходы от одних технологических операций к другим. Агрегатный подход позволяет устранить названные недостатки элементного подхода, благодаря возможности синтеза схемы управляющих автоматов (УА) из отдельных блоков, что упрощает ее построение и сокращает сроки проектирования. Основным недостатком агрегатного подхода есть чрезмерность структуры, которая усложняет схему УА.

Целью настоящей работы является сравнительная оценка схем, построенных с использованием формализованных алгоритмов синтеза схем гидропневмоагрегатов, основанных на использовании второго и третьего подходов к их построению.

Сравнительную оценку покажем аналитическими зависимостями и иллюстрируем на примере синтеза пневматической системы управления автоматизированным токарным станком. Дадим количественную оценку и покажем выигрыш при использовании третьего подхода по отношению ко второму [6].

В основу принципа построения схем с использованием стандартной позиционной структуры (второй подход) положен метод построения схемы непосредственно по графу операций. Здесь используется командоаппаратный способ построения. Причем число ЭП командоаппарата выбирается равным числу вершин графа операций. Таким образом, осуществляется единичное кодирование внутренних состояний системы, а число внутренних состояний совпадает с числом операций технологического процесса.

Функции включения ЭП

$$S=f(P, Y)$$

зависят от соответствующего входного воздействия и от значения выхода предыдущего ЭП  $S_i = p_i y_{i-1}$ , где  $S_i$  – сигнал включения  $i$ -го ЭП;  $p_i$  – входной набор, переводящий систему из одного состояния к другому в  $i$ -ом переходе;  $y_{i-1}$  – выход ЭП в предыдущем переходе  $i-1$  (следующим после последнего перехода является первый).

Функция выключения ЭП

$$R = f(y),$$

$R_i = y_{i+1}$ , где  $y_m$  – выход следующего за  $i$ -м ЭП.

Функции выходов

$$Z = f(y)$$

зависят лишь от внутренних состояний и не зависят от входных наборов.

Функции включения «памяти» и выходов при третьем подходе определяются из следующих выражений

$$\begin{aligned} S &= f(X, Y); \\ Z &= f(X, Y). \end{aligned}$$

Оценим сложность схемы, построенной по третьему подходу, принимая, что ЭП, двухвходовая и трехвходовая конъюнкция (дизъюнкция) реализуются одним элементом. При этом будем различать два случая: число вершин графа  $G_r$ ,  $|B| > 2$  и  $|B| = 2$ . В первом случае сложность схемы для  $k$  контуров графа:

$$L_1 = |B| + k_1 + 2k_2 + 2 \sum_{\zeta=1}^m (k_{3_\zeta} - 1) + \sum_{\alpha=1}^{|B|} (k_{4_\alpha} - 1) - \Delta s,$$

где  $|B|$  – максимальное число блоков для одного разбиения;  $k_1$  – минимальное число удлиненных наборов  $Q$  за счет сигналов из множества  $X_c$  или  $Y$  без учета обязательного удлинения одинаковых наборов из множества  $P$ ;  $k_2$  – число одинаковых входных наборов  $UA$ ;  $k_{3_\zeta}$  – число включений  $z_\zeta$  ИУ;  $m$  – число ИУ;  $k_{4_\alpha}$  – число включений ЭП  $\alpha$  для  $k$  контуров графа  $G$ ;  $\Delta s$  – выигрыш от декомпозиции и факторизации СЛУ. Во втором случае:

$$L_2 = k_1 + 2k_2 + \sum_{\zeta=1}^m (k_{3_\zeta} - 1) + 2k_{4_\alpha} - 1 - \Delta s,$$

поскольку в этом случае  $\|B\| = 2$ , выбираем один ЭП с использованием двух инверсных выходов. Значения выбираем из расчета реализации многих контуров графа операций с общей памятью, так как контуры  $UA$  работают не одновременно.

По определению  $L_2 < L_1$ . При втором подходе:

$$L'_1 = 3 \cdot k,$$

где  $k$  – число ЭП, число элементов  $\vee$ , число элементов  $\wedge$ .

$$L'_1 \geq L_1, \text{ т.е. } 3 \cdot k \geq |B| + k_1 + 2k_2 + 2 \sum_{s=1}^m (k_{3_s} - 1) + \sum_{\alpha=1}^{|B|} (k_{4_\alpha} - 1) - \Delta s,$$

так как  $L'_1$  – это предельный случай для  $L_1$  и как показывает практика  $L_1$  всегда значительно меньше  $L'_1$

В формулах для расчета  $L_1$ ,  $L'_1$  и  $L_2$  не включены элементы из реализации поднаборов  $Q$ , так как они являются обязательными по техническому заданию на проектирование УА во всех случаях.

Рассмотрим синтез пневматической системы токарного станка. Исполнительными устройствами токарного станка служат пневматические цилиндры ( $\Pi_1$ – $\Pi_4$ ), которым соответствуют выходы  $Z_1$  –  $Z_4$ . Цилиндр  $\Pi_1$  производит загрузку питателем из магазина. Его исходное положение контролируется конечным выключателем  $X_1$ , а конечное –  $X_2$ . Цилиндр  $\Pi_2$  производит зажим заготовки зажимным механизмом, начальное положение которого контролируется конечным выключателем  $X_3$ . Цилиндр  $\Pi_3$  отводит суппорт в исходное положение. Цилиндр  $\Pi_4$  производит рабочую подачу суппорта, конечное положение которого контролируется конечным выключателем  $X_4$ .

Каждый цикл работы станка начинается после возврата в исходное положение пневмопривода механизма зажима заготовки ( $X_3=1$ ) и при включенном пневмотумблере ( $X_5=1$ ). По сигналу  $X_3=1$  и  $X_5=1$  происходит загрузка питателем из магазина и отвод суппорта в исходное положение  $Z_1=1$  и  $Z_3=1$ . Затем по сигналу  $\bar{X}_1=1$  от конечного выключателя, контролирующего исходное положение цилиндра  $\Pi_1$ , и сигналу  $X_5=1$  происходит включение движения подачи суппорта  $Z_4=1$ . Далее цилиндр  $\Pi_1$ , достигнув конечного положения, воздействует на конечный выключатель  $X_2=1$  и при сигнале  $\bar{X}_4=1$ , а также при  $X_5=1$  включается пневмопривод зажима заготовки  $Z_2=1$ . При включении  $\Pi_2$ , исходное положение которого контролируется конечным выключателем  $X_3$ , от выключателя исходит сигнал  $\bar{X}_3=1$  и при включенном пневмотумблере  $X_5=1$  механизм загрузки  $\Pi_1$  и пневмопривод отвода суппорта возвращаются в исходное положение  $\bar{Z}_1=1$  и  $\bar{Z}_3=1$ . Как только  $\Pi_1$  возвращается в исходное положение, воздействуя при этом на конечный выключатель  $X_1=1$  и при сигнале  $X_5=1$  происходит отключение движения подачи суппорта  $\bar{Z}_4=1$ , конечное положение которого контролируется конечным выключателем  $X_4$ . По сигналу  $X_4=1$  и по сигналу  $X_5=1$  происходит возврат в исходное положение пневмопривода зажима заготовки  $\bar{Z}_2=1$ . При отключении пневмотумблера  $X_5=0$  работа станка прекращается.

Режим работы – автоматический. Назначение ИУ, а также их взаимодействие с входными устройствами показаны в таблице. Каждый цикл работы станка начинается после возврата в исходное положение пневмопривода зажима заготовки ( $X_3=1$ ) при включенном пневмотумблере ( $X_5=1$ ). При отключении пневмотумблера ( $X_5=0$ ) работа станка прекращается.

Исходя из технического задания, строим ориентированный граф операций, вершины графа соответствуют количеству технологических операций, а дуги графа соответствуют переходам от одной операции к другой. Граф операций в общем случае состоит из контуров, каждый из которых отвечает одной программе работы УА. Минимальный граф операций получен в работе [5]. Описание цикла работы системы управления автоматизированным токарным станком в виде графа операций представлено ниже на рис. 1.

Функции включения (отключения) ИУ имеют вид:

$$Z_1 = y_1; \quad \bar{Z}_1 = y_4; \quad Z_2 = y_3; \quad \bar{Z}_2 = y_6; \quad Z_3 = y_1; \quad \bar{Z}_3 = y_4; \quad Z_4 = y_2; \quad \bar{Z}_4 = y_5.$$

По графу (рис. 1) и логическим уравнениям, для автоматического режима строим схему с использованием стандартной позиционной структуры. В данной схеме управление работой цилиндров (исполнительных устройств) осуществляется через последовательное включение триггеров (элементов памяти) командоаппарата. Каждой вершине графа сопоставляется один элемент памяти командоаппарата. Количество триггеров командоаппарата равно числу технологических операций или вершин графа. Схема построения с использованием стандартной позиционной структуры для автоматического режима представлена на рис. 2.

Таблица – Взаимодействие входных сигналов и ИУ

Выходные сигналы		Входные сигналы			
Обозначение	Наименование	Автоматический режим		Наладка	
		Исходное положение	Конечное положение	Включено	Отключено
Z <sub>1</sub>	Загрузка (питателем из магазина)	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>11</sub>	$\bar{X}_{11}$
Z <sub>2</sub>	Зажим заготовки	X <sub>3</sub>	–	X <sub>22</sub>	$\bar{X}_{22}$
Z <sub>3</sub>	Отвод суппорта в исходное положение	–	–	X <sub>33</sub>	$\bar{X}_{33}$
Z <sub>4</sub>	Включение движения подачи суппорта назад	–	X <sub>4</sub> (начальное положение)	X <sub>44</sub>	$\bar{X}_{44}$

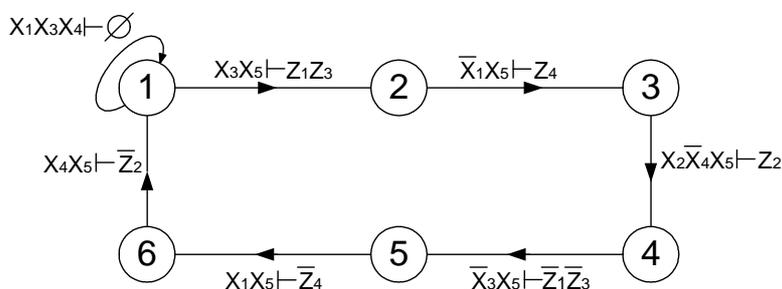


Рисунок 1 – Граф операций условий работы пневмоагрегата

Получим условия включения и отключения памяти:

$$\begin{aligned}
 S_1 &= X_3X_5; & R_1 &= y_2; & S_2 &= \bar{X}_1X_5y_1; & R_2 &= y_3; & S_3 &= X_2\bar{X}_4X_5y_2; & R_3 &= y_4; \\
 S_4 &= \bar{X}_3X_5y_3; & R_4 &= y_5; & S_5 &= X_1X_5y_4; & R_5 &= y_6; & S_6 &= X_4X_5y_5; & R_6 &= y_1.
 \end{aligned}$$

Минимизацию системы управления проведем, как указано в [4]. Внутренней памяти в нашем случае не требуется, так как входная последовательность не содержит одинаковые входные наборы. Минимальный граф операций получен в [7]. В нашем случае он содержит одну вершину.

Для минимизации воспользуемся матрицей соответствий, столбцы которой отвечают последовательности входных наборов, осуществляющих переходы, а строки – последовательности полных входных наборов, действующих в переходах. Матрица соответствий имеет вид

	$X_3X_5$	$\bar{X}_1X_5$	$X_2\bar{X}_4X_5$	$\bar{X}_1X_5$	$\bar{X}_1X_5$	$X_4X_5$	
$X_1X_3X_4$	0	0	0	0	0	0	$\emptyset$
$X_1X_3X_4X_5$	1	0	0	0	1	1	$Z_1Z_3$
$X_3X_4X_5$	1	1	0	0	0	1	$Z_4$
$X_2X_3X_5$	1	1	1	0	0	0	$Z_2$
$X_2X_5$	0	1	1	1	0	0	$\bar{Z}_1\bar{Z}_3$
$X_1X_5$	0	0	0	1	1	0	$\bar{Z}_4$
$X_1X_4X_5$	0	0	0	1	1	1	$\bar{Z}_2$

В данном случае противоречивых выходных сигналов нет, поэтому удлинения сигналов не требуется. Логические уравнения включения ИУ и ЭП получаем в сборках логических выражений, записанных сверху МС, для соответствующего перехода (жирной единице МС).

Проанализировав матрицу, имеем систему логических уравнений

$$Z_1 = X_3X_5; \quad \bar{Z}_1 = \bar{X}_3X_5; \quad Z_2 = X_2\bar{X}_4X_5; \quad \bar{Z}_2 = X_4X_5; \quad Z_3 = X_3X_5; \quad \bar{Z}_3 = \bar{X}_3X_5; \\ Z_4 = \bar{X}_1X_5; \quad \bar{Z}_4 = X_1X_5.$$

По уравнениям строим схему (рис. 3)

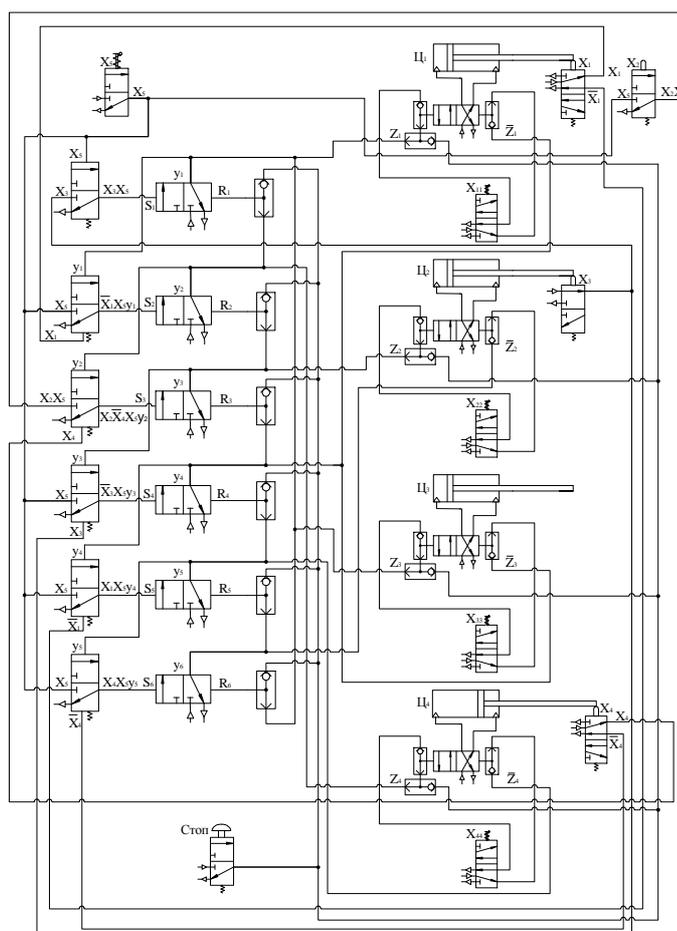


Рисунок 2 – Схема управления автоматизированным токарным станком, синтезированная с использованием стандартной позиционной структуры

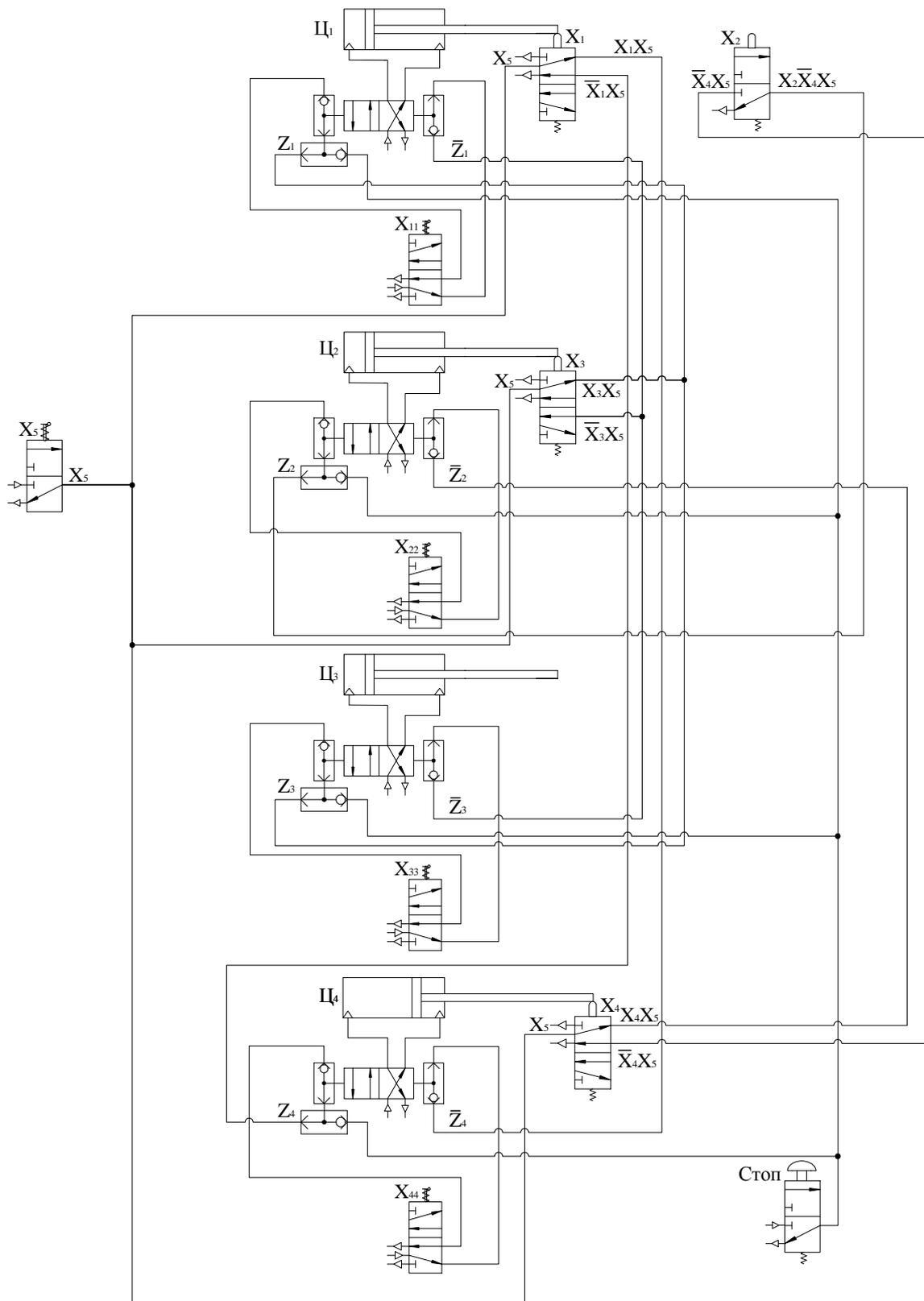


Рисунок 3 – Схема управления автоматизированным токарным станком, синтезированная методом минимизации

Как видно из приведенных схем, в схеме (рис. 2), построенной с использованием агрегатного подхода, число распределителей значительно больше, чем в схеме, представленной на рис. 3.

Литература

1. Герц Е.В., Зенченко В.П., Крейнин Г.В. Синтез пневматических приводов. – М.: Машиностроение. – 1966. – 212 с.
2. Юдицкий С.А. К вопросу описания и синтеза дискретных систем промышленной автоматики // Техническая кибернетика. – 1976. – №1. – с. 131–141.
3. Goedecke W.D. Bemerkungen zum Gespräch Taktkett contra Lodic?// Olhydraulik and pneumatik. – 1978. – N12. – p. 678–680.
4. Черкашенко М.В. Метод логического проектирования дискретных систем управления машин-автоматов с пневмо- или гидроприводом. Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления. – М.: Машиностроение. – 1981. – Вып.8. – с. 181–189.
5. Cherkashenko M.V. Computer-aided design of discrete control fluid power system. 2 Internationales Fluidtechnishes symposium. Germany.– 16–17 mart.– 2000. Band 1.– p. 495–500.
6. Черкашенко М.В. Автоматизация проектування систем гідро- і пневмоприводів з дискретним управлінням: Харків: НТУ «ХПІ». – 2001. – 182 с.
7. Черкашенко М.В. и др. Синтез дискретных систем управления промышленных роботов //Автоматика и телемеханика.– 1981.– №5.– с. 148–153. (Printed of USA “Automation and Remote Control”).

Bibliography (transliterated)

1. Gerts E.V., Zenchenko V.P., Kreynin G.V. Sintez pnevmaticheskikh privodov. – М.: Mashinostroyeniye. – 1966. – 212 p.
2. Yuditskiy S.A. K voprosu opisaniya i sinteza diskretnykh sistem promyshlennoy avtomatiki // Tehnicheskaya kibernetika. – 1976. – #1. – p. 131–141.
3. Goedecke W.D. Bemerkungen zum Gespräch Taktkett contra Lodic?// Olhydraulik and pneumatik. – 1978. – N12. – p. 678–680.
4. Cherkashenko M.V. Metod logicheskogo proektirovaniya diskretnykh sistem upravleniya mashin-avtomatov s pnevmo- ili gidroprivodom. Pnevmatika i gidravlika. Privodyi i sistemy upravleniya. – М.: Mashinostroyeniye. – 1981. – Vyip.8. – p. 181–189.
5. Cherkashenko M.V. Computer-aided design of discrete control fluid power system. 2 Internationales Fluidtechnishes symposium. Germany.– 16–17 mart.– 2000. Band 1.– p. 495–500.
6. Cherkashenko M.V. Avtomatizatsiya proektuvannya sistem gidro- i pnevmoprivodiv z diskretnim upravlinnyam: Harkiv: NTU «HPI». – 2001. – 182 p.
7. Cherkashenko M.V. i dr. Sintez diskretnykh sistem upravleniya promyshlennykh robotov //Avtomatika i telemehaniка.– 1981.– #5.– p. 148–153. (Printed of USA “Automation and Remote Control”).

УДК 62-522

Черкашенко М.В., Фатеев О.М., Фатеева Н.М.

### **ДО ПИТАННЯ СИНТЕЗУ СХЕМ ГІДРОПНЕВМОАГРЕГАТІВ**

Проводиться порівняльна оцінка схем, побудованих з використанням формалізованих алгоритмів синтезу схем гідропневмоагрегатів, заснованих на використанні агрегатного підходу й підходу, заснованого на симбіозі елементного і агрегатного підходів до їх побудови.

УДК 661.42:661.833.66

Райко В.Ф., Эстефане П.Х., Цейтлин М.А.

### ЛИМИТИРУЮЩИЕ СТАДИИ ПЕРЕНОСА ТЕПЛА И МАССЫ В ПРОЦЕССЕ ИСПАРИТЕЛЬНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ РАСТВОРА

Испарительное охлаждение воды в градирнях – способ, нашедший широкое распространение в промышленных водооборотных системах охлаждения технологических аппаратов и машин. Его использование связано с повышением солесодержания оборотной воды и, как следствие, необходимостью ее периодической замены. Этот недостаток может быть превращен в достоинство, если вместо воды для охлаждения аппаратов использовать технологические растворы, которые необходимо концентрировать. При испарении воды в градирне раствор будет упариваться за счет низкопотенциальной теплоты, тем самым экономя теплоэнергию.

Однако градирни традиционных конструкций с непрерывным контактом фаз не пригодны для реализации такого процесса из-за коррозионного разрушения и забивания осадками. Для испарительного охлаждения и концентрирования растворов представляет интерес градирня [0] со ступенчатым контактом фаз, снабженная провальными тарелками, имеющими большое свободное сечение и крупные (50–100 мм) отверстия. Статья посвящена выявлению лимитирующих стадий процесса испарительного концентрирования раствора на таких тарелках.

В теории испарительного охлаждения [0] различают «сухой» и «мокрый» теплообмен. Первый обусловлен разностью температур контактирующих фаз, второй – тепловым эффектом испарения (конденсации) воды. Оба эти вида теплообмена находятся в тесной взаимосвязи, что в значительной степени осложняет расчет градирни с использованием традиционных уравнений тепло- и массообмена. Для упрощения расчетов было предложено (см., например, [0]) рассматривать перенос теплоты за счет обоих механизмов, как единый процесс, движущей силой которого является разность фактической энтальпии воздуха, контактирующего с охлаждаемой жидкостью, и воздуха, равновесного с этой жидкостью. В этом случае кинетика переноса теплоты между контактирующими фазами описывается следующим уравнением:

$$G \frac{dH_r}{dS} = k_H (H_r - H^*), \quad (1)$$

где  $G$  – массовый расход воздуха, кг/с;  $H_r$  и  $H^*$  – энтальпия воздуха, контактирующего с охлаждаемой жидкостью и воздуха, равновесного с этой жидкостью, соответственно, кДж/кг сухого воздуха;  $S$  – поверхность контакта фаз, м<sup>2</sup>;  $k_H$  – коэффициент передачи энтальпии, кг/м<sup>2</sup>с.

Коэффициент передачи энтальпии  $k_H$  определяется из следующей формулы:

$$\frac{1}{k_H} = \frac{1}{k_z} + \frac{H^* - H_i}{\alpha_{жс}(t_i - t_{жс})}, \quad (2)$$

где  $k_z$  – коэффициент массотдачи в газе, кг/м<sup>2</sup>с;  $\alpha_{жс}$  – коэффициент теплоотдачи со стороны жидкости, Вт/м<sup>2</sup>·град;  $t_i$ ,  $t_{жс}$  – температуры поверхности раздела газ-жидкость и

основной массы жидкости, соответственно, °С,  $H_i$  – энтальпия воздуха, равновесного с раствором при температуре  $t_i$ .

Как видно из уравнения (2), общее сопротивление переносу энтальпии является суммой двух слагаемых, первое из которых определяет сопротивление в газовой, а второе – в жидкой фазе. Кажется, что поскольку на долю «мокрого» теплообмена приходится основная часть передаваемого от жидкости к воздуху тепла, то сопротивление в газовой фазе должно быть лимитирующим. Однако исследования насадок для традиционных градирен [0] показывают, что сопротивление со стороны жидкости составляет от 27 до 46 % общего сопротивления переносу энтальпии. Данные об аналогичных исследованиях, выполненных для провальных тарелок, отсутствуют.

Для выявления лимитирующей стадии процесса испарительного охлаждения раствора с использованием провальных тарелок, нами было выполнено экспериментальное исследование на традиционной для такого рода работ установке, включавшей, собственно, экспериментальный аппарат, комплект вспомогательного оборудования, обеспечивающего его работу, и комплект измерительных приборов. Экспериментальный аппарат состоял из царги-основания с вмонтированными трубопроводами для подачи воздуха и отвода рассола, установленных на нее трех изготовленных из органического стекла царг диаметром и высотой 0,5 м, и крышки, снабженной трубопроводом для отвода воздуха и устройством распределения поступающего в аппарат рассола. Между царгами монтировались исследуемые тарелки, которые представляли собой диски, перфорированные 25-ю равномерно распределенными по площади отверстиями диаметром 65 мм. Свободное сечение тарелок составляло 42 %. Концентрированию в установке подвергался раствор поваренной соли (рассол) с массовой долей NaCl – 24–25 %.

В начале, для того, чтобы убедиться в наличии значимого сопротивления переносу энтальпии со стороны жидкости, была выполнена серия опытов, в которой температура исходного рассола менялась в пределах 35–70 °С. Результаты представлены на рис.1 в виде зависимости коэффициента переноса энтальпии от средней температуры жидкости в аппарате (скорость газа в полном сечении аппарата – 0,8 м/с, плотность орошения – 5 кг/м<sup>2</sup>·с). Как видно из графика, температура оказывает существенное влияние на коэффициент переноса энтальпии. При росте температуры с 29 до 53 °С величина  $k_H$  падает более чем на треть: с 2,4 до 1,7 кг/м<sup>2</sup>·с. Причем с ростом температуры тенденция к падению  $k_H$  увеличивается. Столь сильное влияние температуры на коэффициент переноса энтальпии можно объяснить, анализируя уравнение (2).

Как известно, температура незначительно влияет на коэффициенты массоотдачи в газе  $k_g$  и теплоотдачи в жидкости  $\alpha$  [0]. В то же время, множитель  $\frac{H^* - H_i}{(t_i - t_{ж})}$  слагаемого, определяющего сопротивление переносу энтальпии со стороны жидкости, очень сильно зависит от температуры.

Из этого можно заключить, что значимое влияние температуры на коэффициент передачи энтальпии обусловлено тем, что сопротивление переносу энтальпии со стороны жидкости составляет значительную долю общего сопротивления.

Следующим этапом работы была разработка методики отдельного определения коэффициентов массоотдачи в газе и теплоотдачи в жидкости с целью определить влияние температуры на долю сопротивления переносу энтальпии, сосредоточенную в жидкости.

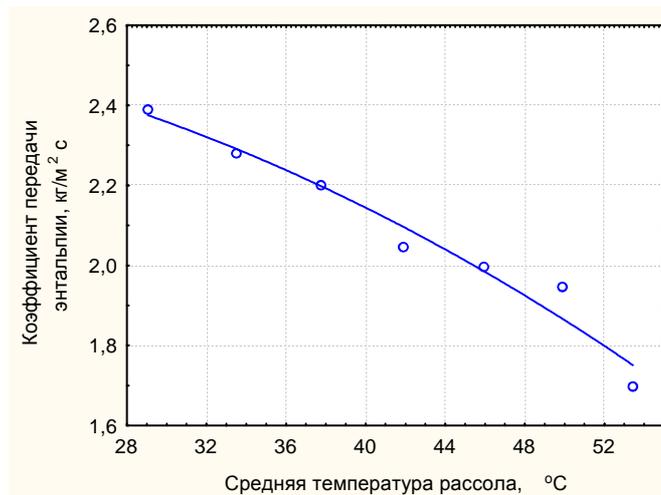


Рисунок 1 – Зависимость коэффициентов переноса энтальпии от температуры

Идея методики основана на том, что, проведя несколько опытов при одинаковых расходах воздуха и рассола (то есть при постоянных  $k_T$  и  $\alpha$ ), но различных температурах и найдя для каждого опыта величину отношения  $(H^* - H_i)/(t_{ж} - t_i)$ , можно вычислить коэффициенты массоотдачи в газе и теплоотдачи в жидкости в отдельности.

Определенную трудность при разработке методики вызвало нахождение величины отношения  $(H^* - H_i)/(t_{ж} - t_i)$ . Дело в том, что величину  $t_i$ , а следовательно и  $H_i$  невозможно определить опытным путем. В то же время хорошее приближение интересующего нас отношения можно получить, учтя то обстоятельство, что разность  $t_{ж} - t_i$  имеет величину в несколько градусов или даже долей градуса и потому с хорошей точностью можно считать, что  $\frac{H^* - H_i}{t_{жс} - t_i} \approx \left( \frac{dH}{dt} \right)_{t=t_{жс}}$ , где  $H$  – энтальпия воздуха, равновесного с рассолом при температуре  $t$ .

Нами были выполнены расчеты энтальпии воздуха, равновесного с насыщенным раствором поваренной соли при различных температурах рассола, а затем и производной от энтальпии по температуре. Результаты этих расчетов обобщены в виде следующего уравнения:

$$dH/dt = 0,7 + 0,0144 t + 0,00036 t^2, \quad (3).$$

Корреляции между расчетом по уравнению (3) и точечными оценками величины  $dH/dt$  равен 0,9997, остаточная среднеквадратическая ошибка расчета СКО = 0,32 кДж/кг·К.

Методика эксперимента по определению коэффициента теплоотдачи в жидкости и массоотдачи в воздухе была следующей. Выполняли 5–7 опытов при одинаковых расходах рассола и воздуха в установку и разных температурах питающего рассола. Последнюю меняли в интервале от 30 до 70 °C. Результаты опытов сводили в таблицу, в которую заносили значения линейной скорости воздуха в полном сечении лабораторного аппарата  $w$ , плотности орошения  $l$ , коэффициента переноса энтальпии  $k_H$ , средней температуры рассола в опыте  $t$  (среднеарифметическое значение температур рассола на верхней тарелке и выходе из лабораторного аппарата) и значение  $dH/dt$ , соответствующее этой температуре.

Затем методом регрессионного анализа находили значения коэффициентов  $a_0$  и  $a_1$  линейного уравнения

$$1/k_H = a_0 + a_1 (dH/dt), \quad (4)$$

Сравнивая уравнения (4) и (2) и, учитывая принятое допущение, можно видеть, что  $a_0 = 1/k_2$ , а  $a_1 = 1/\alpha$ . Откуда и могут быть найдены искомые значения коэффициентов теплоотдачи в жидкости –  $\alpha$  и массоотдачи в газе –  $k_r$ .

На рис. 2 для иллюстрации метода раздельного определения коэффициентов массоотдачи в газе и теплоотдачи в жидкости приведена корреляция между сопротивлением переносу энтальпии ( $1/k_H$ ) и производной  $dH/dt$  при скорости газа в полном сечении аппарата – 0,8 м/с и плотности орошения – 5 кг/м<sup>2</sup>·с.

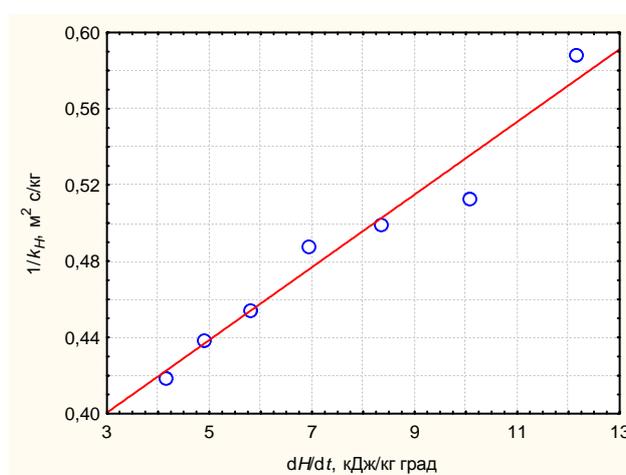


Рисунок 2 – Корреляция между сопротивлением переносу энтальпии и производной от энтальпии по температуре

Обработка данных, приведенных на рис. 2 по описанной выше методике дает следующие значения коэффициентов уравнения (4):  $a_0 = 0,34 \pm 0,01$ ,  $a_1 = 0,019 \pm 0,002$ , что соответствует коэффициентам массоотдачи в газе  $k_r = 1/a_0 = 2,94$  кг/м<sup>2</sup>·с и теплоотдачи в жидкости  $\alpha = 1/a_1 = 52,6$  кДж/м<sup>2</sup>·с·К

Пользуясь этими данными, можно подсчитать, что доля сопротивления со стороны жидкости в общем сопротивлении переносу энтальпии в исследованном температурном интервале меняется от 18 % при 29 °С до 40 % при 53 °С.

Из приведенных данных видно, что сопротивление переносу теплоты со стороны жидкости в процессе испарительного охлаждения раствора при использовании в градирне провальных тарелок столь же велико, как и при применении обычных оросителей. Это указывает на то, что попытка интенсификации охлаждения только за счет увеличения коэффициента массоотдачи в газе, например, путем увеличения скорости воздуха, не будет иметь большого эффекта, в особенности, при высоких температурах охлаждаемого рассола. Результат может быть достигнут только при одновременной турбулизации, как газовой, так и жидкостной фазы.

Методика раздельного определения коэффициентов  $k_r$  и  $\alpha$  позволяет изучить влияние основных факторов процесса переноса энтальпии на каждый из этих коэффициентов в отдельности, что может быть интересно как с точки зрения изучения меха-

низма процесса переноса энтальпии, так и для разработки методики расчета аппарата для водоиспарительного концентрирования рассола.

Литература

1. А.с. 1281860 (СССР). Градирня / Кичанов В.П., Суханов А.М., Штерле Э.Г., Смоляк В.Д., Лукьяненко Т.Н., Скрынник Ю.Н. – Оpubл. в Б.И., № 1, 1987.
2. Андреев Е.Н. Расчет тепло и массообменных контактных аппаратов. – Л: Энергоатомиздат, 1985.– 192 с
3. Шервуд Т., Пигфорд Р., Уилки Ч. Массопередача. – М.: Химия, 1982. – 696 с.
4. Mc'Adams W.H., Pohlens J.B., John R.C. Transfer of heat and mass between air and water // Chem. Eng. Progr.– 1949.–v.45.– p. 241–259.

Bibliography (transliterated)

1. A.s. 1281860 (SSSR). Gradirnya Kichanov V.P., Suhanov A.M., Shterle E.G., Smolyak V.D., Lukyanenko T.N., Skryinnik Yu.N. – Opubl. v B.I., # 1, 1987.
2. Andreev E.N. Raschet teplo i massoobmennyih kontaktnyih apparatov. – L: Energoatomizdat, 1985.– 192 p.
3. Shervud T., Pigford R., Uilki Ch. Massoperedacha. – M.: Himiya, 1982. – 696 s.
4. Mc'Adams W.H., Pohlens J.B., John R.C. Transfer of heat and mass between air and water Chem. Eng. Progr.– 1949.–v.45.– p. 241–259.

УДК 661.42:661.833.66

Райко В.Ф., Естефане П.Х., Цейтлин М.А.

**ЛІМІТУЮЧІ СТАДІЇ ПЕРЕНОСУ ТЕПЛА Й МАСИ  
У ПРОЦЕСІ ВИПАРНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ РОЗЧИНУ**

Розглянуто процес водовипарювального концентрування розчинів у градирні із провальними тарілками, що мають крупну перфорацію та великий вільний переріз. Розроблено методику розрахунку за результатами експериментів коефіцієнтів масовіддачі у газі та тепловіддачі у рідині. Встановлено, що опір переносу ентальпії у рідині становить від 20 до 40 % від його загальної величини.

УДК 678.5 : 691.175

Рассоха А.Н., Черкашина А.Н.

### СТРУКТУРНО-ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДИСПЕРСНО НАПОЛНЕННЫХ ФУРАНО-ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ

При создании дисперсно наполненных ПКМ существует два принципиально различных способа подбора гранулометрического состава плотных многокомпонентных систем: с прерывистым и непрерывистым гранулометрическим составом [1]. Экономическим целесообразным является подбор составов с использованием прерывистой гранулометрии. В практике материаловедения принято рассматривать [1–4] три случая упаковки частиц наполнителя сферической формы в единице объема: ромбоэдрическая упаковка (коэффициент заполнения объема 0,7405), кубическая упаковка (0,5236) и статистическая упаковка частиц наполнителя (коэффициент – 0,637).

Представляло интерес исследовать влияние характера упаковки дисперсных частиц (наполнителя) на структурно-топологические параметры фурано-эпоксидных полимеров, наполненных кварцевым песком и кварцевой мукой.

Дисперсно-неупорядоченные статистически (случайно) упакованные системы являются одним из основных типов при формировании ПКМ. На практике гранулометрический состав дисперсной фазы имеет существенный разброс по размерам.

Сферические частицы наполнителя диаметром  $D_o$  заполняют исходный объем композита  $V_o = 1$  (в относительных единицах объема) с плотностью упаковки  $v_o = 0,637$ , которая соответствует статистически неупорядоченной упаковке частиц. Параметр  $v_o$  характеризует относительное содержание сфер в объеме  $V_o$  и равен:

$$v_o = \frac{N_o \cdot \pi \cdot D_o^3}{6 \cdot V_o},$$

где  $N_o$  – число частиц наполнителя в объеме  $V_o$ .

Оставшийся свободный объем, составляющий в относительных единицах объема  $(1 - 0,637)$ , заполняют сферы диаметром  $D_1 = 0,1547 D_o$  (случай, когда в свободном пространстве между тремя плотно сомкнутыми сферами  $D_o$  размещается касающаяся их сфера  $D_1$ ) с плотностью упаковки 0,637. Сферические частицы наполнителя диаметром  $D_1$  занимают относительный объем  $v_1 = 0,637 (1 - 0,637) = 0,231$ . Концентрация частиц наполнителя диаметром  $D_1$  составляет:

$$N_1 = \frac{6 \cdot v_1}{\pi \cdot D_1^3}.$$

Общий занятый частицами наполнителя объем составляет  $0,637 + 0,231 = 0,868$ . Оставшийся объем  $(1 - 0,868)$  заполняется сферами диаметра  $D_2 = 0,1547 D_1 = 0,1547^2 D_o$  с плотностью упаковки 0,637, которые заполняют объем  $v_2 = (1 - 0,868) 0,637 = 0,084$ . Количество частиц наполнителя диаметром  $D_2$  можно оценить по формуле:

$$N_2 = \frac{6 \cdot v_2}{\pi \cdot D_2^3}.$$

Дальнейшее заполнение оставшегося объема частицами  $D_3, D_4$  и т.д. осуществляется в рамках определенной закономерности, которая выражается в автомодельности заполнения оставшихся пустых объемов (подмножеств низшего уровня иерархии).

На рис. 1 представлены последовательные этапы заполнения начального объема частицами наполнителя различных фракций.

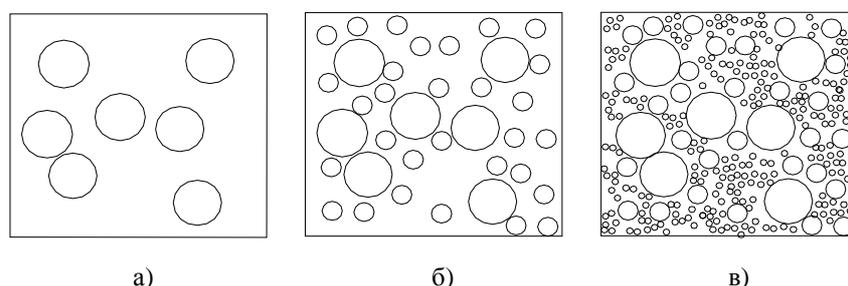


Рисунок 1 – Схема заполнения объема композита полифракционным наполнителем:  
а) фракция  $D_0$ ; б) смесь фракций  $D_0+D_1$ ; в) смесь фракций  $D_0+D_1+D_2$

Автомодельное отношение для частиц соседних подмножеств составляет  $z = D_n/D_{n-1}$ . В свою очередь, отношение заполняющих соседние подмножества сфер равно  $p = N_n/N_{n-1} = v_n/v_{n-1} \cdot z^3$ , при условии, что  $n \gg 1$ .

Фрактальная размерность рассматриваемых систем  $d_m$  (размерность Хаусдорфа-Безиковича) можно определить по формуле  $d_m = \ln p / \ln(1/z)$ .

В табл. 1–4 приведены параметры, характеризующие рациональный подбор фракций наполнителя (кварцевые песок и мука), при формировании структуры фурано-эпоксидных композитов при различных типах упаковки.

Дробное значение размерности  $d_m$  характеризует фрактальный характер композиционной системы при упаковке полидисперсных частиц наполнителя. Так как  $3 > d > 2$ , то свойства полимерного композита с фрактальной структурой в значительной мере определяются шероховатостью поверхности частиц наполнителя. В целом структура композита представляет собой пространственное образование с размерностью 3. Фрактальность системы проявляется в некоторой степени больше при статистической упаковке частиц наполнителя ( $d_m = 2,47$ ), чем в случае ромбоэдрической и кубической упаковки ( $d_m$  соответственно 2,62 и 2,61).

При статистической упаковке частиц наполнителя при определенной концентрации  $N_c$  в композите формируется каркас, в которой частицы чередуются с пленочной фазой матрицы или находятся в контакте между собой, т.е. возникает смешанный перколяционный кластер из касающихся ( $D$ ) и перекрывающихся ( $D_t$ ) сфер [1].

Минимальную критическую концентрацию частиц наполнителя  $N_c$  в объеме композита, необходимую для формирования первичного каркаса, можно оценить из формулы:  $N_c = 0,96/(\pi \cdot D^3)$ , а диаметр  $D_t$  – из зависимости  $D_t = (1,28 \pm 0,01) \cdot D$ . Средний оптимальный размер пленочной структуры фурано-эпоксидной матрицы ( $h_o$ ), необходимый для формирования первичного каркаса в композите можно оценить из соотношения:  $h_o = (0,14 \pm 0,01) \cdot D$ . Расстояние между частицами наполнителя  $h$  в объеме фурано-эпоксидного композита при различной решетчатой упаковке (статистическая, ромбоэдрическая, кубическая) определяется размером частиц  $D$ , объемным содержанием  $v$ , плотностью упаковки  $\eta$ :

$$h = D \cdot [(\eta/v)^{1/3} - 1],$$

а диаметр перекрывающихся сфер  $D_i$  можно оценить, исходя из зависимости:

$$D_i = D \cdot (\eta/v)^{1/3} \quad [1].$$

Таблица 1 – Параметры гранулометрического состава смесей

Наименование параметра	Значение параметра при $D_o$ (мм)				
	1	2	3	5	10
Статистическая упаковка частиц наполнителя					
$D_1=D_o \cdot 0,1547^1$ , мм	0,155	0,310	0,465	0,775	1,547
$D_2=D_o \cdot 0,1547^2$ , мм	0,024	0,048	0,072	0,120	0,240
$D_3=D_o \cdot 0,1547^3$ , мм	0,004	0,008	0,012	0,020	0,037
$D_4=D_o \cdot 0,1547^4$ , мм	0,001	0,001	0,002	0,003	0,006
$N_o, 10^3, м^{-3}$	1217	152,1	45,08	9,437	1,217
$N_1, 10^3, м^{-3}$	441,4	55,17	16,35	3,531	0,441
$N_2, 10^3, м^{-3}$	160,5	20,06	5,945	1,284	0,160
$N_3, 10^3, м^{-3}$	58,47	7,309	2,165	0,468	0,058
$N_4, 10^3, м^{-3}$	21,21	2,651	0,785	0,170	0,021
Ромбоэдрическая упаковка частиц наполнителя					
$D_1=D_o \cdot 0,225^1$ , мм	0,225	0,450	0,675	1,125	2,250
$D_2=D_o \cdot 0,225^2$ , мм	0,051	0,102	0,152	0,253	0,506
$D_3=D_o \cdot 0,225^3$ , мм	0,011	0,022	0,034	0,056	0,114
$D_4=D_o \cdot 0,225^4$ , мм	0,003	0,006	0,008	0,013	0,026
$N_o, 10^3, м^{-3}$	1000	125,1	37,05	8,004	1,000
$N_1, 10^3, м^{-3}$	476,5	59,57	17,65	3,812	0,476
$N_2, 10^3, м^{-3}$	227,2	28,40	8,414	1,817	0,227
$N_3, 10^3, м^{-3}$	108,1	13,52	4,005	0,865	0,108
$N_4, 10^3, м^{-3}$	57,71	7,213	2,137	0,417	0,058
Кубическая упаковка частиц наполнителя					
$D_1=D_o \cdot 0,414^1$ , мм	0,414	0,828	1,242	2,070	4,140
$D_2=D_o \cdot 0,414^2$ , мм	0,171	0,343	0,514	0,857	1,714
$D_3=D_o \cdot 0,414^3$ , мм	0,071	0,142	0,213	0,355	0,710
$D_4=D_o \cdot 0,414^4$ , мм	0,029	0,060	0,088	0,147	0,294
$N_o, 10^3, м^{-3}$	1415	176,9	52,41	11,32	1,415
$N_1, 10^3, м^{-3}$	366,5	45,81	13,57	2,932	0,366
$N_2, 10^3, м^{-3}$	96,31	12,04	3,567	0,770	0,096
$N_3, 10^3, м^{-3}$	24,84	3,105	0,920	0,199	0,025
$N_4, 10^3, м^{-3}$	6,497	0,812	0,241	0,052	0,006

Таблица 2 – Объем, занимаемый фракциями и пустотность системы

Вид упаковки частиц наполнителя	Параметры структуры с фракциями				
	$D_o$	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$D_4$
Статистическая	<u>0,637</u>	<u>0,231</u>	<u>0,084</u>	<u>0,0306</u>	<u>0,0111</u>
	0,363	0,132	0,048	0,0174	0,0063
Ромбоэдрическая	<u>0,5236</u>	<u>0,2494</u>	<u>0,1189</u>	<u>0,0566</u>	<u>0,0302</u>
	0,4764	0,2270	0,1081	0,0515	0,0213
Кубическая	<u>0,7405</u>	<u>0,1918</u>	<u>0,0501</u>	<u>0,0130</u>	<u>0,0034</u>
	0,2591	0,0677	0,0176	0,0046	0,0012

Примечание: числитель – объем, занимаемый фракцией  $D_i$  ( $v_i$ ); знаменатель – оставшийся свободный объем. Параметры выражены в относительных единицах объема.

Таблица 3 – Параметры фрактальной структуры сформированной дисперсной фазы

Вид упаковки частиц наполнителя	$z$	$p$	$d_m$
Статистическая	0,1547	$\approx 100$	2,47
Ромбоэдрическая	0,225	$\approx 50$	2,62
Кубическая	0,414	$\approx 10$	2,61

Таблица 4 – Структурно-топологические параметры анализируемых композитов

Наименование параметра	Значение параметра при $D$ (мкм)							
	1	10	20	50	100	200	500	1000
$D_t$ , мкм	1,28	12,8	25,6	64	128	256	640	1280
$h_o$ , мкм	0,14	1,4	2,8	7	14	28	70	140

Минимальная критическая концентрация  $N_c$  в анализируемом диапазоне содержания дисперсного наполнителя (1 – 1000 мкм) составляет  $0,30573 \cdot 10^{18} - 0,30573 \cdot 10^9 \text{ м}^{-3}$ .

Для монодисперсного (монофракционного) наполнителя максимально возможная плотность упаковки равна  $\eta = 0,7405$  (соответствует кубической гранецентрированной решетке), для полидисперсного наполнителя со статистической упаковкой –  $\eta = 0,868$ . Это соответствует плотности упаковки частиц диаметром  $D_o$  и  $D_1$  (табл. 2). Доля оставшегося незаполненного объема 0,132 меньше порога протекания по касающимся сферам – 0,16 [2] и фракция наполнителя с диаметром частиц  $D_2$  не имеет непрерывной связности в композите, т.е. не образует бесконечного кластера.

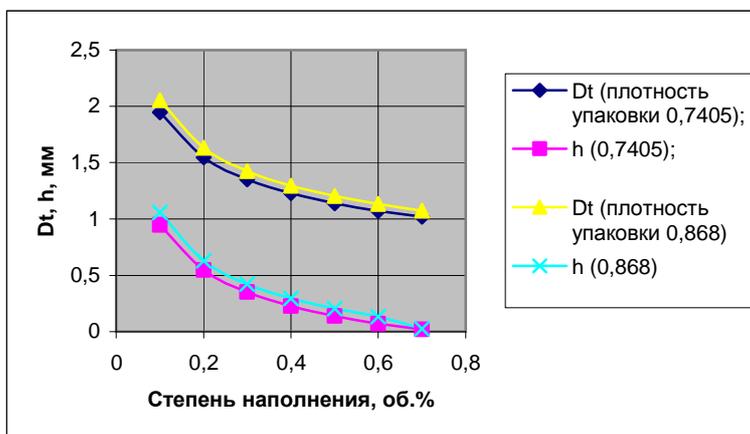


Рисунок 2 – Зависимость диаметра перекрывающихся сфер  $D_t$  и средней толщины полимерной пленки  $h$  от степени заполнения

При практическом использовании полученных результатов следует учитывать фактическую анизометрию и шероховатость частиц наполнителя, что в определенной мере требует корректировки фракционного состава с целью получения максимально плотной упаковки.

При топологическом анализе структуры полимерных композитов в рамках теории перколяции (протекание по касающимся и перекрывающимся сферам) можно оце-

нить необходимое количество дисперсной фазы (наполнителя) в объеме композиционной системы.

В случае топологического анализа структуры фурано-эпоксидных композитов в изделиях, когда его толщина существенно меньше других геометрических параметров (например, защитные покрытия на поверхности стальных и бетонных конструкций), целесообразно использовать плоские решетки, в остальных случаях – объемные. При упорядоченной упаковке частиц в объеме можно выделить следующие типы объемных решеток: простая кубическая, объемноцентрированная кубическая, гранецентрированная кубическая; при упаковке частиц на плоскости – треугольная, квадратная и шестиугольная решетки [5].

Для решения задач перколяции на плоскости и в объеме применимы следующие эмпирические формулы [5]:

– плоская решетка:  $Z \cdot X_{cv} \approx 2$ ;  $f \cdot X_y \approx 0,5$ ;

– объемная решетка:  $Z \cdot X_{cv} \approx 1,5$ ;  $f \cdot X_y \approx 0,16$ ,

где  $Z$  – координационное число;  $X_{cv}$  и  $X_y$  – пороги перколяции соответственно по узлам и связям;  $f$  – коэффициент заполнения.

Учитывая, что в реальных условиях наполнения фурано-эпоксидных полимеров при упаковке дисперсной фазы (кварцевого песка и кварцевой муки) в той или иной мере проявляются все типы решеток, целесообразно ввести усредненные параметры  $Z$  и  $f$  (среднегеометрические величины):

$$Z_{пл} = \sqrt[3]{Z_m \cdot Z_k \cdot Z_{ш}} ; Z_{об} = \sqrt[3]{Z_{нк} \cdot Z_{ок} \cdot Z_{зк}} ; f_{пл} = \sqrt[3]{f_m \cdot f_k \cdot f_{ш}} ; f_{об} = \sqrt[3]{f_{нк} \cdot f_{ок} \cdot f_{зк}} ,$$

где  $Z_{пл}$ ,  $Z_{об}$ ,  $f_{пл}$ ,  $f_{об}$  – среднегеометрические значения координационного числа и коэффициента заполнения для плоской и объемной решетки соответственно;  $Z_m$ ,  $Z_k$ ,  $Z_{ш}$ ,  $f_m$ ,  $f_k$ ,  $f_{ш}$  – значения координационного числа и коэффициента заполнения для треугольной, квадратной, шестиугольной плоской решетки соответственно;  $Z_{нк}$ ,  $Z_{ок}$ ,  $Z_{зк}$ ,  $f_{нк}$ ,  $f_{ок}$ ,  $f_{зк}$  – значения координационного числа и коэффициента заполнения для простой кубической, объемноцентрированной кубической, гранецентрированной кубической объемной решетки соответственно.

Значения порогов перколяции для различных типов решеток, характерных для упорядоченных упаковок частиц наполнителя в объеме, приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Структурно-топологические параметры композита в рамках теории перколяции

Тип решетки	$X_{cv}$	$X_y$	$Z$	$f$
Плоские решетки				
Треугольная	0,35	0,50	6	0,91
Квадратная	0,50	0,59	4	0,79
Шестиугольная	0,65	0,70	3	0,61
Объемные решетки				
Простая кубическая	0,25	0,31	6	0,52
Объемноцентрированная кубическая	0,18	0,25	8	0,68
Гранецентрированная кубическая	0,12	0,20	12	0,74

В табл. 6 представлены структурно-топологические параметры для наполненных композиционных систем для усредненного типа решетки

Таблица 6 – Структурно-топологические характеристики анализируемого композита

Решетка	$X_{св}$	$X_y$	$Z$	$f$
Плоская решетка	0,48065	0,6581	4,1605	0,7597
Объемная решетка	0,18027	0,2502	8,3208	0,6395

Значения  $X_{св}$  и  $X_y$  в первом приближении характеризует минимальное количество монофракционного наполнителя для формирования рациональной структуры фурано-эпоксидного полимерного композита. Очевидно, что порог перколяции монотонно уменьшается с увеличением размерности пространства (табл. 6).

Таким образом, в результате проведенного анализа определены оптимальные структурно-топологические характеристики структуры фурано-эпоксидных полимеров, наполненных кварцевой мукой и кварцевым песком, позволяющие формировать композиционные системы с регулируемым комплексом прочностных, технологических и эксплуатационных свойств.

#### Литература

1. Бобрышев А.Н., Козомазов В.Н., Бабин Л.О., Соломатов В.И. Синергетика композитных материалов / Под ред. В.И. Соломатова.– Липецк, НПО ОРИУС, 1994.– 151 с.
2. Соломатов В.И., Бобрышев А.Н., Химмлер К.Г. Полимерные композиционные материалы в строительстве / Под ред. В.И. Соломатова.– М.: Стройиздат, 1988.– 312 с.
3. Патуроев В.В. Полимербетоны.– М.: Стройиздат, 1987. – 286 с.
4. Кузмин В.И., Оболдуев А.Т. К вопросу оптимизации начального состава полимербетона // Известия вузов. Строительство. – 1994, № 5,6. – С. 40–44.
5. Эфрос А.Л. Физика и геометрия беспорядка.– М.: Наука, 1982.– 176 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Bobryshev A.N., Kozomazov V.N., Babin L.O., Solomatov V.I. Sinergetika kompozitnyih materialov Pod red. V.I. Solomatova.– Lipetsk, NPO ORIUS, 1994.– 151 p.
2. Solomatov V.I., Bobryshev A.N., Himmler K.G. Polimernye kompozitsionnye materialy v stroitelstve Pod red. V.I. Solomatova.– М.: Stroyizdat, 1988.– 312 p.
3. Paturoev V.V. Polimerbetonyi.– М.: Stroyizdat, 1987. – 286 p.
4. Kuzmin V.I., Obolduev A.T. K voprosu optimizatsii nachalnogo sostava polimerbetona // Izvestiya vuzov. Stroitelstvo. – 1994, # 5,6. – p. 40–44.
5. Efros A.L. Fizika i geometriya besporyadka.– М.: Nauka, 1982.– 176 p.

УДК 678.5 : 691.175

Рассоха О.М., Черкашина Г.М.

**СТРУКТУРНО-ТОПОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ  
ДИСПЕРСНО НАПОВНЕНИХ ФУРАНО-ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИТІВ**

В статті наведена оцінка структурно-топологічних параметрів дисперсно наповнених фурано-епоксидних композитів. Здійснено підбір фракційного складу дисперсного наповнювача для фурано-епоксидних композитів з різними схемами ущільнення дисперсної фази (статистичною, ромбоєдричною, кубічною).

УДК 536.248.2

Братута Э.Г., Акмен Р.Г., Чубарова В.В.

**ЗАВИСИМОСТЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТАКТНОГО АППАРАТА  
ФОРСУНОЧНОГО ТИПА ОТ ТОПОЛОГИИ РАСПЫЛИТЕЛЕЙ**

В настоящее время в проектной практике применяются несколько методов теплотехнических расчетов контактных форсуночных воздухоохладителей или камер орошения, широко используемых в системах централизованного кондиционирования воздуха.

Сложность процессов, протекающих в камерах орошения, а в ряде случаев недостаточная информация о дисперсном составе капель и граничных условиях их взаимодействия с воздушным потоком, предопределили сугубо эмпирический подход к расчету камер орошения.

Из-за отсутствия возможностей аналитического определения конечного состояния воздуха на выходе из камер, обычно пользуются эмпирическими зависимостями.

Для расчетов камер орошения центральных кондиционеров применяют коэффициент эффективности полного теплообмена политропных процессов [1]

$$E = 1 - \frac{t_{M2} - t_{BK}}{t_{M1} - t_{BH}}, \quad (1)$$

где  $t_{M1}$  и  $t_{M2}$  – начальная и конечная температура воздуха по мокрому термометру,  $t_{BH}$  и  $t_{BK}$  – начальная и конечная температура воды, а также коэффициент эффективности теплообмена [1]

$$E' = 1 - \frac{t_{c2} - t_{M2}}{t_{c1} - t_{M1}}, \quad (2)$$

где  $t_{c1}$  и  $t_{c2}$  – начальная и конечная температура воздуха по сухому термометру.

На основании обширных экспериментальных исследований форсуночных камер орошения, выполненных НИИ санитарной техники и другими предприятиями и организациями, проектирующими и изготавливающими центральные кондиционеры, получены данные по зависимости коэффициентов эффективности от расходных характеристик камер орошения.

Расчет камер орошения на основании коэффициентов эффективности позволяет определить лишь глобальные параметры камеры, но не может дать ответ о рациональном размещении оросителей в пространстве камеры, распределить расход воды по стоякам оросителей и т.п.

Очевидно, что наиболее перспективным является метод математического моделирования процессов тепло- и массообмена в камерах орошения, базирующийся на информации о дисперсном составе капель, их стартовой скорости, производительности одиночного распылителя и граничных условиях обменных процессов на поверхности одиночной капли.

Основу математической модели процесса контактного тепло- и массообмена применительно к форсуночным камерам орошения составляют следующие соотношения.

Функция распределения капель по размерам [2]

$$v(D) = \frac{2}{3\pi} \delta^4 D^3 K_1(\delta D), \quad (4)$$

где  $\delta$  – параметр функции распределения, устанавливаемый экспериментально,  $D$  – диаметр капли,  $K_1$  – модифицированная функция Бесселя второго рода первого порядка.

Для практических расчетов соотношение (4) заменялось кусочно-линейной интерполяцией. При этом, как показали предварительные расчеты, достаточным оказалось разбиение диапазона размеров капли от 0 до  $D_{\max}$  на 16 равных интервалов.

Для определения траектории движения капли, а соответственно и времени ее пребывания в рабочем пространстве аппарата, используется уравнение движения капли. Было принято, что на каплю действует только сила аэродинамического сопротивления движению и сила тяжести, что подтверждается различными источниками. Поток воздуха считается одномерным, движение капель – трехмерное.

При этих допущениях уравнение движения капли в векторном виде

$$m_i \frac{d\vec{U}_i}{d\tau} = \pm m_i \vec{g} - C_{Di} \Psi(D)_i f_i \rho_s \frac{\vec{U} |\vec{W} - \vec{U}|}{2}, \quad (5)$$

где  $m_i$  – масса капли  $i$ -го интервала разбиения непрерывной функции  $v(D)$ ;  $\vec{U}$  – скорость капли;  $C_{Di}$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $\Psi(D)_i$  – коэффициент деформации капли;  $f_i$  – площадь миделевого сечения капли;  $\rho_s$  – плотность воздушной среды;  $\vec{W}$  – скорость воздуха.

Коэффициент аэродинамического сопротивления сферической капли

$$C_{Di} = 24 / \text{Re}_i + 4,4 / \sqrt{\text{Re}_i} + 0,32, \quad (6)$$

а коэффициент деформации [3]

$$\Psi(D)_i = \exp(0,03 \text{We}_i^{1,5}), \quad (7)$$

где  $\text{Re}_i$  и  $\text{We}_i$  – критерии Рейнольдса и Вебера.

Спроектировав (5) на оси координат (для декартовой системы координат, когда ось  $x$  совпадает с направлением движения воздуха, а ось  $y$  направлена по высоте камеры), получим

$$m_i \frac{dU_{x,i}}{d\tau} = -C_{Di} \Psi(D)_i f_i \rho_s \frac{(U_{x,i} - W) |U_{x,i} - W|}{2}; \quad (8)$$

$$m_i \frac{dU_{y,i}}{d\tau} = -m_i g - C_{Di} \Psi(D)_i f_i \rho_s \frac{U_{y,i} |U_{y,i}|}{2}; \quad (9)$$

$$m_i \frac{dU_{z,i}}{d\tau} = -C_{Di} \Psi(D)_i f_i \rho_g \frac{U_{z,i} |U_{z,i}|}{2}. \quad (10)$$

Численное решение системы уравнений (8÷10) проводилось методом Рунге-Кутты-Мерсона. В качестве допущений принималось:

- взаимодействие факелов распыления различных форсунок отсутствует;
- стартовые скорости фракций распыления одинаковы;
- инжекционный эффект факела распыленной воды отсутствует;
- при контакте капли с боковыми стенками камеры капля оседает на стенке;
- при контакте капли с потолком камеры вторичное дробление отсутствует, и капля под действием силы тяжести отражается вертикально.

Изменение температуры капли при ее движении в пространстве камеры орошения определялось в предположении, что перенос теплоты в капле осуществляется только теплопроводностью вследствие сравнительно малого изменения ее температуры.

Уравнение теплопроводности капли записывалось как для твердой сферы

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left( \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad (11)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности,  $r$  – радиус капли,  $\tau$  – время.

Начальное условие:

$$t(r, 0) = t_{в1}. \quad (12)$$

Граничные условия:

$$r = 0 \quad \partial t / \partial r = 0, \quad (13)$$

$$r = R \quad -\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial r} \right) = \alpha_c [t_c(\tau) - t(R, \tau)]. \quad (14)$$

В уравнении (14)  $\alpha_c = \alpha_k + \alpha_d$  – суммарный коэффициент теплоотдачи, учитывающий конвективный и диффузионный перенос теплоты совместно с конденсирующейся или испаряющейся влагой,  $t_c(\tau)$  – текущая температура среды,  $t(R, \tau)$  – температура поверхности капли.

Конвективный и диффузионный перенос теплоты рассчитывается по уравнениям

$$Nu = 2 + 1,07 Re^{0,48} Pr^{0,33} Gu^{0,175}; \quad (15)$$

$$Nu_d = 2 + 0,85 Re^{0,52} Pr_d^{0,33} Gu^{0,135}, \quad (16)$$

где  $Nu$  и  $Nu_d$  – конвективное и диффузионное число Нуссельта,  $Pr$  и  $Pr_d$  – конвективное и диффузионное число Прандтля,  $Gu$  – критерий Гухмана.

Коэффициент теплопереноса диффузией

$$\alpha_d = \frac{r \beta_p \Delta P}{t_c(\tau) - t(R, \tau)}, \quad (17)$$

где  $\beta_p$  – коэффициент массоотдачи, отнесенный к парциальному давлению и определенный из (16),  $\Delta P$  – разность парциальных давлений пара на поверхности капли и в объеме камеры.

В случае, когда  $t(R, \tau)$  меньше температуры точки росы  $t_p$ , на поверхности капель идет конденсация пара из воздуха, т.е.  $\alpha_d > 0$ . Когда  $t(R, \tau) > t_p$  имеет место испарение капель и  $\alpha_d < 0$ .

Для решения уравнения (11) при условиях (12), (13), (14) использовалась неявная конечно-разностная аппроксимация уравнения (11) с применением метода прогонки.

Средняя температура капли определялась как

$$\bar{t}_i = \frac{3}{R_i^3} \int_0^{R_i} r^2 t(r) dr = \frac{3\Delta r}{R_i^3} \sum_{k=0}^{nk} r_k^2 t_k, \quad (18)$$

где  $nk$  – число шагов сеточной области по радиусу капли,  $\Delta r$  – шаг сеточной области.

Для расчета распределения параметров воздуха по длине рабочего пространства камеры орошения, последняя разбивалась на  $m$  равных объемов, в пределах которых параметры воздуха полагались постоянными. Если в процессе траекторного расчета движения капли она попадала в некоторый ( $j$ -й объем), то теплосъем капли определялся

$$dq_{i,j} = c_p \rho dv_i (\bar{t}_{i,2} - \bar{t}_{i,1}), \quad (19)$$

где  $\bar{t}_{i,1}$ ,  $\bar{t}_{i,2}$  – средние температуры капли на входе в  $j$ -й объем и выходе из него,  $dv_i$  – суммарный объем капель  $i$ -го разряда, продуцируемый  $k$ -й форсункой и определяемый по (4).

Суммируя (19) по всем разрядам капель, выходящим из каждой форсунки, и по всем форсункам, получим теплосъем капель воды в данном объеме. Тогда тепловой баланс  $j$ -го объема будет иметь вид

$$dQ_j = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l dq_{i,j} = L(I_{j,2} - I_{j,1}), \quad (20)$$

где  $L$  – расход воздуха через камеру,  $I_{j,1}$ ,  $I_{j,2}$  – соответственно энтальпия воздуха на входе и выходе их слоя.

Аналогично тепловому балансу для  $j$ -го объема составлялся и баланс массы водяного пара в объеме. Расчет коэффициента массоотдачи  $\beta_p$  позволил определить количество либо испарившейся воды с поверхности капли при  $t(R, \tau) > t_p$ , либо количество водяного пара, сконденсировавшегося на поверхности капли при  $t(R, \tau) < t_p$ .

$$dm_{i,j} = \beta_p df_i (p_{j,o} - p_{i,n}), \quad (21)$$

где  $df_i$  – суммарная поверхность капель  $i$ -го разряда, выходящих из  $k$ -й форсунки,  $p_{i,0}$ ,  $p_{i,n}$  – парциальное давление водяного пара в воздухе и на поверхности капли соответственно. Суммируя (21) по всем разрядам капель и по всем форсункам, получим баланс влаги в  $j$ -м объеме

$$dM_j = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^l dm_{i,j} = L(d_{j,2} - d_{j,1}), \quad (22)$$

где  $d_{j,1}$ ,  $d_{j,2}$  – влагосодержание воздуха соответственно на входе в  $j$ -й объем и выходе из него.

Объектом для проверки адекватности предложенной модели была выбрана камера орошения КД20 с производительностью по воздуху  $20 \cdot 10^3$  м<sup>3</sup>/ч. Длина камеры 1,8 м, поперечное сечение 1,3×1,54 м, общее число форсунок 72÷96 при плотности их размещения в одном ряду 18÷24 шт./м<sup>2</sup>. При реализации рассмотренной выше математической модели были определены как интегральные параметры камеры, например, коэффициент эффективности, так и распределение параметров воздуха по длине камеры.

На рис. 1 представлены результаты сравнения коэффициента эффективности камеры  $E$  в трактовке по уравнению (1) как табличные (экспериментальные) [1], так и полученные при реализации математической модели камеры.

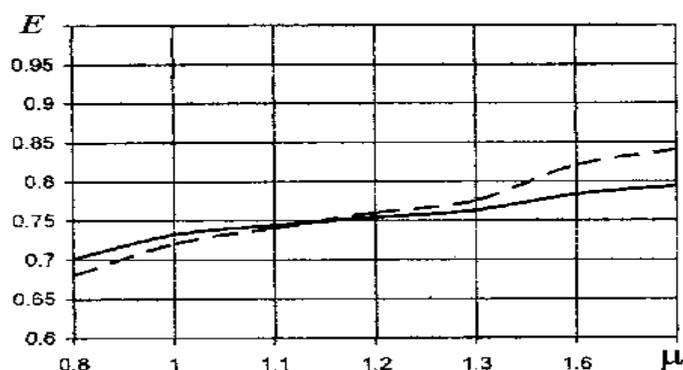


Рисунок 1 – Сопоставление результатов расчета с экспериментальными данными  
Сплошная линия – расчет, пунктирная – экспериментальные данные

Из рис. 1 следует, что максимальное рассогласование расчетных и экспериментальных величин  $E$  не превосходит 8 %, что с учетом большого числа возможных погрешностей, как при проведении испытаний камер орошения, так и при установлении дисперсных характеристик форсунок У-1 с помощью счетно-импульсного метода, следует признать вполне удовлетворительным.

Распределение параметров воздуха и величины локального теплосъема по длине камеры при двухрядном расположении форсунок, когда первый ряд составляют форсунки с распылом воды по прямоточной схеме, а второй ряд – по противоточной схеме, показано на рис. 2.

Анализ полученных данных показывает, что максимальный теплосъем второго (противоточного) ряда форсунок оказывается на 25 % меньше, чем максимальный теплосъем первого (прямоточного) ряда. В то же время относительная скорость потока, а, соответственно, и интенсивность теплообмена капельной среды второго ряда форсунок выше, чем у первого ряда. Этот факт можно объяснить тем, что мелкие фракции распы-

ла форсунок второго ряда практически не участвуют в теплообмене, т.к. полностью уносятся на сепаратор, устанавливаемый после камеры орошения.

Приведенные выше данные указывают на тот факт, что, очевидно, должно иметь место оптимальное расположение противоточных форсунок в камере орошения.

Созданная математическая модель камеры орошения центральных кондиционеров была использована для определения оптимального расположения противоточных форсунок в камере орошения. При решении поставленной задачи предполагалось:

- отсутствие прямоточного ряда форсунок для того, чтобы исключить их влияние на интегральные параметры камеры орошения;
- расходные характеристики распылителей соответствуют форсункам У-1;
- рассматриваются камеры типа КД с площадью проходного сечения для воздуха 1, 2 и 3 м<sup>2</sup> длиной 1,8 и 2,42 м.

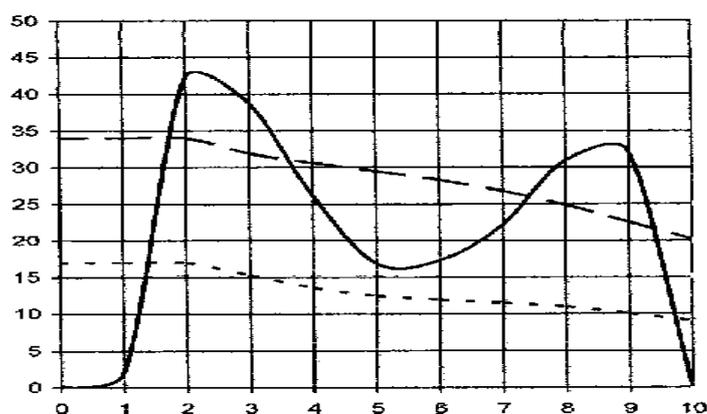


Рисунок 2 – Распределение параметров по длине камеры  
 — теплоъем, кВт; — — температура, °С;  
 - - влажность, г/кг с.в.

В процессе моделирования изменялись:

- коэффициент орошения  $\mu = 0,5 \div 1,2$ ;
- расстояние форсунок от входного сечения камеры  $x = 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,4; 1,6$  м;
- температура воды на входе  $t_{в1} = 9 \div 13$  °С.

Параметры воздуха на входе в камеру полагались одинаковыми для всех режимов и составляли  $t_{с1} = 28$  °С,  $d = 0,01$  кг. вл./кг с.в.), что соответствовало температуре мокрого термометра  $t_{м1} = 18,7$  °С, температуре точки росы  $t_p = 13,8$  °С.

Из приведенных на рис. 3 результатов математического моделирования одно-рядных камер орошения следует, что для различных камер при различных исходных температурах воды и количестве форсунок, максимальная эффективность камеры наблюдается при расположении противоточного ряда форсунок на расстоянии  $\approx (1 \div 1,1)$  м от входа воздуха в камеру. Полученные результаты совпадают с результатами [4].

Из выше изложенного можно сделать следующие основные выводы:

1. Предлагается универсальная математическая модель процесса тепло- и массообмена в форсуночной камере орошения, справедливая для произвольного сочетания режимно-геометрических характеристик камер.

2. В отличие от известных эмпирических методик расчета, в предложенном методе используются только результаты исследования дисперсных характеристик в фа-

келе распыла, позволяющие проводить как многовариантные предпроектные разработки, так и решать оптимизационные задачи.

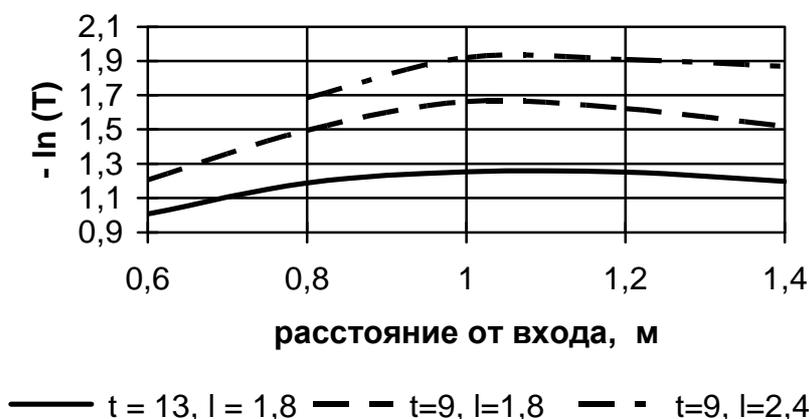


Рисунок 3 – Зависимость эффективности камеры от расположения противоточных форсунок при  $\mu = 1$

#### Литература

1. Нестеренко А.В. Основы термодинамических расчетов вентиляции и кондиционирования воздуха. – М.: Высшая школа, 1971. – 460 с.
2. Братута Э.Г. Диагностика капельных потоков при внешних воздействиях. – Харьков: Вища школа, 1987. – 144 с.
3. Раушенбах Б.В., Белый С.А., Беспалов И.В. и др. Физические основы рабочего процесса в камерах сгорания воздушно-реактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 1964. – 526 с.
4. Братута Э.Г., Соин И.В., Юхно И.Ф. Исследование влияния схемы оросительной сети на теплоэнергетическую характеристику камеры испарительного охлаждения воздуха// Кондиционеростроение. Вып.4. – Харьков, 1975. – С. 43–49.

#### Bibliography (transliterated)

1. Nesterenko A.V. Osnovy termodinamicheskikh raschetov ventilyatsii i konditsionirovaniya vozduha. – M.: Vysshaya shkola, 1971. – 460 p.
2. Bratuta E.G. Diagnostika kapelnykh potokov pri vneshnih vozdeystviyah. – Harkov: Vischa shkola, 1987. – 144 p.
3. Raushenbah B.V., Belyiy S.A., Bepalov I.V. i dr. Fizicheskie osnovyi rabocheho protsessa v kamerah sgoraniya vozduшно-reaktivnykh dvigateley. – M.: Mashinostroenie, 1964. – 526 p.
4. Bratuta E.G., Soyn I.V., Yuhno I.F. Issledovanie vliyaniya shemy orositel'noy seti na teploenergeticheskuyu harakteristiku kameryi isparitel'nogo ohlazhdeniya vozduha// Konditsionerostroyeniye. Vyip.4. – Harkov, 1975. – p. 43–49.

УДК 536.248.2

Братута Е.Г., Акмен Р.Г., Чубарова В.В.

**ЗАЛЕЖНІСТЬ ЕФЕКТИВНОСТІ КОНТАКТНОГО АПАРАТУ  
ФОРСУНОЧНОГО ТИПУ ВІД ТОПОЛОГІЇ РОЗПИЛЮВАЧІВ**

Розроблена та реалізована математична модель трьохмірного руху та тепло- і масообміну крапельного середовища у камері зрошування контактного апарату форсуночного типу. Отримано, що для апаратів з однорядним розташуванням розпилювачів має місце оптимальна відстань розташування розпилювачів від входу повітря в апарат, що забезпечує максимальний коефіцієнт ефективності апарату. Результати моделювання добре збігаються з експериментальними даними.

УДК 665:664.3

Некрасов П.О., Решетняк Н.В.

**РЕОЛОГИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИРОВИХ ПРОДУКТІВ,  
ЗБАГАЧЕНИХ ДІАЦИЛГЛІЦЕРИНАМИ**

Спосіб життя сучасної людини істотно змінився за останні кілька десятиліть, при цьому багато факторів – харчовий раціон, рівень фізичних і нервових навантажень, швидкість обміну інформацією, стан навколишнього середовища – прямо впливають на його здоров'я, емоційний настрій та ефективність роботи. Одним із шляхів підтримки працездатності організму в цих умовах є більш уважне ставлення до рівня надходження живильних речовин в організм. Звідси – зростаюча популярність функціональних продуктів харчування, склад яких розробляється саме з метою поповнення нутрієнтного профілю раціону харчування.

За сучасними уявленнями, жири, що грають важливу роль у харчуванні людини, – це не тільки джерело енергетичного та пластичного матеріалу, але також й поставальники функціональних інгредієнтів, що мають здатність сприятливо впливати на фізіологічні функції та обмін речовин в організмі людини. Рівень споживання жирів, що рекомендують, становить 30–35 % від загальної калорійності раціону.

Розвиток харчової промисловості в Україні поставив перед олійно-жировою галуззю завдання – випуск жирів функціонального призначення, що відповідають потребам людини, що живе в 21 столітті.

На сьогоднішній день у світі з кожним роком зростає число людей з надлишковою вагою. Згідно даним Всесвітньої організації охорони здоров'я, їхнє число в цей час уже перевищило 1 мільярд. Багато чоловіків у віці понад 30 років і жінок у віці понад 50 років страждають гіперліпемією, тобто надлишком жиру в кровоносній системі.

В 1989 році була висунута теорія «смертельного квартету», відповідно до якої ризик ішемічної хвороби серця істотно підвищується при наявності 4-х аномальностей: надлишкова вага, порушення вуглеводного обміну, гіперліпемія та підвищений кров'яний тиск.

Сучасними дослідженнями доведено, що споживання діацилгліцеринів знижує рівень нейтрального жиру в крові [1,2]. Було досліджено процес метаболізму діацилгліцеринів і встановлено, що вони поглинаються тонким кишечником і використовуються організмом як джерело енергії без ресинтезу в нейтральний жир. Тривале застосування людиною жирів продуктів, які збагачено діацилгліцериновою фракцією, перешкоджає виникненню ожиріння та особливо відкладенню жиру на внутрішніх органах.

Діацилгліцерини можуть бути синтезовані хімічним шляхом за допомогою реакції гліцеролізу жирів та олій при температурі понад 200 °С з використанням лужного каталізатора [3]. Промислове застосування цього процесу ускладнюють низькі вихід та чистота цільового продукту. Ферментативна технологія гліцеролізу дозволяє вирішити ці проблеми.

Ферменти діють набагато ефективніше хімічних каталізаторів, а крім того, більш вибірні: можуть вибирати зі складної суміші тільки одну речовину й перетворювати її не в кілька продуктів, а в один. Біокаталізатори призначені для роботи в живих клітинах, тому їх можна використовувати при атмосферному тиску, відносно низьких температурах, середніх значеннях кислотності. Крім того, ферментативні процеси не пот-

ребують жаростійкого, а також стійкого до корозії і високого тиску обладнання, що зменшує обсяг необхідних інвестицій. Таким чином, біокаталітична технологія дає можливість в м'яких умовах реакції одержати продукти з більш високим вмістом діацилгліцеринів без молекулярної перегонки, яка є обов'язковою в існуючих хімічних промислових методах. Ферментативні методи перетворення триацилгліцеринів шляхом гліцеролізу широко вивчаються на даний час.

Наприклад, Yamane та ін. [4] застосували цей процес для одержання високого виходу (до 90 %) діацилгліцеринів у двофазному гліцеролізі гідрогенізованого жиру яловичини, витримуючи при 60 °С (2 години), 55 °С (4 години) і при 48 °С протягом 3 днів.

В інших дослідженнях джерелом ліпази для алкохолізу служив порошок з насіння *Nigella sativa*, що було суспензовано в ацетоні [5]. Досліджували гліцероліз без розчинників у соняшниковій олії з використанням згаданої ліпази. При 60 °С одержували найбільший вихід часткових ацилгліцеридів. При молярних співвідношеннях між соняшниковою олією і гліцерином 1:1, 2:1 і 3:1, вмісті 30 % ліпази у вигляді порошку в ацетоні досягали рівноважного стану після 2 годин. При молярних співвідношеннях між соняшниковою олією і гліцерином 1:1 і 2:1 одержували максимальний вихід часткових ацилгліцеридів, що становив, відповідно, 66 % і 60 % .

У роботі [6] вивчався ензимний гліцероліз соєвої олії. Порівнювали ефективність ліпаз із *Penicillium roqueforti*, видів роду *Pseudomonas mucor*, *Aspergillus niger*, *Rhizopus oryzae*, *R. niveus*, *P. camamberti*, *Candida rugosa*. При ферментативному гліцеролізі освітленої, рафінованої соєвої олії найбільший вихід часткових ацилгліцеридів одержували при застосуванні ліпаз PS з видів роду *Pseudomonas*, які проявляли активність і мали термостабільність при 30–70 °С при співвідношенні ферменту до олії 0,05–0,2 г/10 г, молярному співвідношенні гліцерину до олії 1:1–1:3 протягом 1 години. При >40 °С денатурація ліпаз супроводжувалася ростом активності. Оптимальні умови безперервного технологічного процесу: 40 °С, молярні співвідношення гліцерину до олії 2:1, співвідношення ліпаз до олії 0,1 г/10 г.

Zaher F.A. та ін. освітлену рафіновану і дезодоровану соняшникову олію змішували з гліцерином і проводили гліцероліз із використанням як каталізатора ліпаз із підшлункової залози свині, *Chromobacterium viscosum*, *Rhizopus arrhizus*, зародків пшениці й *R. japonicus* (A-10 і B-2) [7]. Найбільшу і найменшу активність мали ліпази із відповідно *C. viscosum* і зародків пшениці. Використані ліпази в різному ступені впливали на вміст полярних сполук в одержуваних продуктах, використовуваних у якості харчових емульгаторів. Найменший і найбільший вміст полярних сполук одержували при використанні ліпаз із відповідно *C. viscosum* і *R. japonicus* (A-10). На вміст полярних сполук також впливали температури гліцеролізу. При застосуванні ліпаз із *R. japonicus* (A-10), підшлункової залози свині й *C. viscosum* швидкість гліцеролізу складала відповідно (%/година): 10,7; 15,64 і 24,4.

Автори роботи [8] описують метод використання ліпази *Candida rugosa* для синтезу гліцеридів з середньою величиною ланцюга. Запропоновано ферментативний синтез гліцеридів із середньою довжиною ланцюга з капрінової кислоти й гліцерину в присутності ліпази, яка продуктується *Candida rugosa*. Оптимальні умови реакції естерифікації, що дозволяють одержувати моно-, ді- і трикапріни з високим виходом (0,99, 14, 97 і 17,28 % відповідно): температура = 37 °С; час реакції (24 г); молярне співвідношення субстратів – капрінової кислоти й гліцерину 2,5, у ліпази 100 мг, використання як розчинників ГК, ізооктану й н-октану; розчинники відіграють важливу роль у солюбілізації капрінової кислоти й зниженні в'язкості системи: активність води 0,328. Аналіз про-

дуктів реакції здійснювався методом ГХ, який підтвердив, що 33,24 % капрінової кислоти перетворювалися в гліцериди, причому частка дікапринів і трикапринів була більше, ніж монокапринів (відповідно 14,97 %; 17,28 % і 0,99 %).

Крім того, з метою поглибленого вивчення гліцеролізу, який каталізувався ліпазою із *Candida rugosa*, іммобілізованою в різних поліуретанових пінах, вчені моделювали поверхні відгуку гліцероліза для отримання окремих гліцеридів [9]. Моно- і дігліцериди, отримані етерифікацією залишку очищеної оливкової олії гліцерином у гексані. Як каталізатор використана ліпаза, іммобілізована в різних біосумісних гідрофільних поліуретанових пінах. Для моделювання реакції використана методологія поверхні відгуку. Найкращі результати отримані в менш гідрофільній піні.

Стримуючими факторами до втілення ферментативного гліцеролізу на промисловому рівні є ще недостатня вивченість процесу та особливостей застосування жирів, збагачених діацилгліцеридами, в олійно-жировій технології.

Одним із кроків до створення ферментативної технології отримання функціональних жирів в Україні було дослідження кінетики реакції біокаталітичного гліцеролізу [10], подальшим етапом є вивчення фізико-хімічних властивостей жирів, що збагачено діацилгліцеридами.

Для одержання досліджуваних жирів було використано метод ферментативного гліцеролізу за допомогою іммобілізованого препарату Новозим 435 («Novozymes», Данія). Новозим 435 являє собою адсорбовану на макропористу смолу термостабільну В-ліпазу з *Candida Antarctica*, отриману за допомогою глибинного бродіння генетично модифікованого мікроорганізму *Aspergillus oryzae* [11]. Порядок дій при експерименті був наступним. Пальмову олію та гліцерин (у співвідношенні триацилгліцерини пальмової олії : гліцерин 1 моль : 1 моль), відважували в тригорлу колбу, яку поміщали на гліцеринову баню, що була обладнана контактним термометром та електричним нагрівачем з терморегулятором, та включали нагрів з перемішуванням під шаром азоту. Коли температура суміші досягала 60 °С, у реакційну колбу вносився ферментний препарат у кількості 10 % від маси пальмової олії. Реакцію проводили при температурі 60 °С протягом 2 годин при постійному перемішуванні під шаром азоту.

Досліджувались стабілізуюча здатність, антирозприскуюча здатність та реологічні характеристики продукту гліцеролізу. За зразки зіставлення були взяті пальмова олія з розчиненням у неї промисловим емульгатором МГД, а також чиста пальмова олія. Згідно з методиками, на основі вищеозначених речовин готувались емульсії, які далі аналізувалися.

Результати дослідження стабілізуючої та антирозприскуючої здатності наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика стабілізуючої та антирозприскуючої здатності продукту гліцеролізу пальмової олії

Показник	Продукт гліцеролізу	Пальмова олія + МГД	Пальмова олія
Стабілізуюча здатність	<u>відсутність</u> видимих частинок вологи	<u>відсутність</u> видимих частинок вологи	<u>присутні</u> видимі частинки вологи
Антирозприскуюча здатність (% розприскування жиру)	0,13	0,17	0,45

Аналіз даних табл. 1 дає змогу зробити висновок, що продукт гліцеролізу виявляє стабілізуючу дію та має найкращу серед досліджуваних зразків антирозприскуючу здатність.

Реологічні дослідження зразків проводились на ротаційному віскозиметрі Фенна – модель OFITE виробництва фірми Varoid (Хьюстон, штат Техас, США). Постійна прилада  $c = 4,788$  Па/град; відносний зазор приладу – 0,9375 мм. Зведені результати аналізу реологічних властивостей емульсій представлені в табл. 2 і табл. 3.

Таблиця 2 – Пластична в'язкість  $\eta$ ,  $c^{-1}$

Температура	Продукт гліцеролізу	Пальмова олія + МГД	Пальмова олія
20 °C	2,1960	2,0197	2,0381
35 °C	0,4553	0,4250	0,4823
50 °C	0,2483	0,2335	0,1964

Таблиця 3 – Динамічне напруження зсуву  $\tau_0$ , Па

Температура	Продукт гліцеролізу	Пальмова олія + МГД	Пальмова олія
20 °C	109,29	95,28	281,57
35 °C	85,26	76,41	49,56
50 °C	15,29	11,96	9,50

Дані табл. 2 свідчать про те, що усі досліджувані зразки мають приблизно однакові значення пластичної в'язкості. У той же час емульсія на основі продукту гліцеролізу має найбільші значення динамічного напруження зсуву (ДНЗ) (див. табл. 3), що свідчить про утворення міцної тиксотропної структури. Аномально високе значення ДНЗ при 20 °C у емульсії на основі пальмової олії пояснюється гідрофобною коагуляцією зразка, що призвело до утворення моноліту жиру.

Досліджувані емульсії також перевірялись на стабільність шляхом їх фільтрації при різних температурах на фільтрпресі під тиском 0,7 МПа протягом 30 хвилин та вимірюванні кількості фільтрату, що утворився. Використовувався фільтрпрес виробництва фірми Varoid (Хьюстон, штат Техас, США). Результати аналізу наведено в табл. 4.

Таблиця 4 – Стабільність емульсій,  $cm^3/30xv$  при 0,7 МПа

Температура	Продукт гліцеролізу	Пальмова олія + МГД	Пальмова олія
20 °C	0,6	1,0	1,2
35 °C	1,4	1,5	1,9
50 °C	2,2	2,6	3,1

Аналіз даних табл. 4 дає змогу зробити висновок, що найвищу стабільність має емульсія на основі продукту гліцеролізу.

Таким чином, особливості фізико-хімічних властивостей жирів, збагачених діацилгліцеридами, обумовлюють високу ефективність їхнього застосування в сучасних технологіях виробництва нових сортів салатних масел, майонезів, маргаринів, спредів, кулінарних і кондитерських жирів, що мають функціональні, лікувально-профілактичні властивості та позитивно впливають на здоров'я людини.

Література

1. Maki KC, Davidson MH, Tsushima R, Matsuo N et al. Consumption of diacylglycerol oil as part of a reduced-energy diet enhances loss of body weight and fat in comparison with consumption of a triacylglycerol control oil // *Am. J. Clin. Nutr.*– 2002.– Vol. 76.– P.1230–1236.
2. *Healthful Lipids*. Casimir C. Akoh and Oi-Ming Lai.– 2005.– 762 pages.
3. Sontang, N.O.V. New Developments in the Fatty Acid Industry in America // *JAOCS.*– 1984.– Vol. 61.– P. 229–232.
4. Yamane T, Tang ST, Kawahara K and Koizumi Y. High-yield diacylglycerol formation by solid-phase enzymatic glycerolysis of hydrogenated beef tallow // *JAOCS.*– 1994.– Vol. 71.– P. 339–342.
5. El Naciye, Dandik Levent, Aksoy H.Ayse. Solvent-free glycerolysis catalyzed by acetone powder of *Nigella sativa* seed lipase // *JAOCS.* – 1998. – Vol. 75, №9.– P. 1207–1211.
6. Houreddind H., Harmeier S.E. Enzymatic glycerolysis of soybean oil // *JAOCS.* – 1998. – Vol. 75, №10.– P. 1359–1365.
7. Zaher F.A., Aly Saadi M., El-Kinavy O.S. Lipase-catalyzed glycerolysis of sunflower oil to produce partial glycerides // *Grsas y aceites (Esp).* – 1998. – Vol. 49, № 5–6. – P. 411–414.
8. Wong W. C, Basri M., Razak C. N. A., Salleh A. B. (Centre for Research in Enzyme & Microbial Technology, Fakulti Sains & Pengajian Alam Sekitar, Universiti Putra Malaysia, 43400 UPM Serdang, Malaysia). Synthesis of medium-chain glycerides using lipase from *Candida rugosa* // *JAOCS.*– 2000.– Vol. 77, №1.– P. 85–88.
9. Response surface modeling of glycerolysis catalyzed by *Candida rugosa* lipase immobilized in different polyurethane foams for the production of partial glycerides. Ferreira – Dias S., Correia A.C., Da Fonseca M.M.R. // *J.Mol. Catal. B.*– 2003.– Vol. 21, №1–2.– P. 71–80.
10. Гладкий Ф.Ф., Гасюк Л.В., Богодіст-Тимофєєва О.Ю., Некрасов П.О. та ін. Дослідження кінетики ферментативного гліцеролізу ацилгліцеринів // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. –Харків: НТУ «ХПІ», 2006.– №12. – С. 3–6.
11. Матеріали фірми «Novozymes».

Bibliography (transliterated)

1. Maki KC, Davidson MH, Tsushima R, Matsuo N et al. Consumption of diacylglycerol oil as part of a reduced-energy diet enhances loss of body weight and fat in comparison with consumption of a triacylglycerol control oil *Am. J. Clin. Nutr.*– 2002.– Vol. 76.– P.1230–1236.
2. *Healthful Lipids*. Casimir C. Akoh and Oi-Ming Lai.– 2005.– 762 pages.
3. Sontang, N.O.V. New Developments in the Fatty Acid Industry in America *JAOCS.*– 1984.– Vol. 61.– P. 229–232.
4. Yamane T, Tang ST, Kawahara K and Koizumi Y. High-yield diacylglycerol formation by solid-phase enzymatic glycerolysis of hydrogenated beef tallow *JAOCS.*– 1994.– Vol. 71.– P. 339–342.
5. El Naciye, Dandik Levent, Aksoy H.Ayse. Solvent-free glycerolysis catalyzed by acetone powder of *Nigella sativa* seed lipase *JAOCS.* – 1998. – Vol. 75, #9.– P. 1207–1211.

6. Houreddind H., Harmeier S.E. Enzymatic glycerolysis of soybean oil JAOCS. – 1998. – Vol. 75, #10.– P. 1359–1365.

7. Zaher F.A., Aly Saadi M., El-Kinavy O.S. Lipase-catalyzed glycerolysis of sunflower oil to produce partial glycerides Grsas y aceites (Esp). – 1998. – Vol. 49, # 5–6. – P. 411–414.

8. Wong W. C, Basri M., Razak S. N. A., Salleh A. B. (Centre for Research in Enzyme & Microbial Technology, Fakulti Sains & Pengajian Alam Sekitar, Universiti Putra Malaysia, 43400 UPM Serdang, Malaysia). Synthesis of medium-chain glycerides using lipase from *Candida rugosa* JAOCS.– 2000.– Vol. 77, #1.– P. 85–88.

9. Response surface modeling of glycerolysis catalyzed by *Candida rugosa* lipase immobilized in different polyurethane foams for the production of partial glycerides. Ferreira – Dias S., Correia A.C., Da Fonseca M.M.R. J.Mol. Catal. B.– 2003.– Vol. 21, #1–2.– P. 71–80.

10. Gladkiy F.F., Gasyuk L.V., Bogodist-Timofeeva O.Yu., Nekrasov P.O. ta in. Doslidzhennya kinetiki fermentativnogo glitserolizu atsilglitseriniv Visnik Natsiona-Inogo tehničnogo universitetu «HPI». –Harkiv: NTU «HPI», 2006.– #12. – p. 3–6.

11. Materiali firmi «Novozymes».

УДК 665:664.3

Некрасов П.А., Решетняк Н.В.

### **РЕОЛОГИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЖИРОВЫХ ПРОДУКТОВ, ОБОГАЩЕННЫХ ДИАЦИЛГЛИЦЕРИНАМИ**

Подтверждена возможность получения жиров, обогащенных диацилглицеринами, путём ферментативного глицеролиза. В качестве биокатализатора использовался ферментный препарат Новозим 435 («Novozymes», Дания). Установлены эмульгирующие свойства продукта реакции, а также осуществлен сравнительный анализ реологических характеристик эмульсий на его основе.

УДК 66.097.3

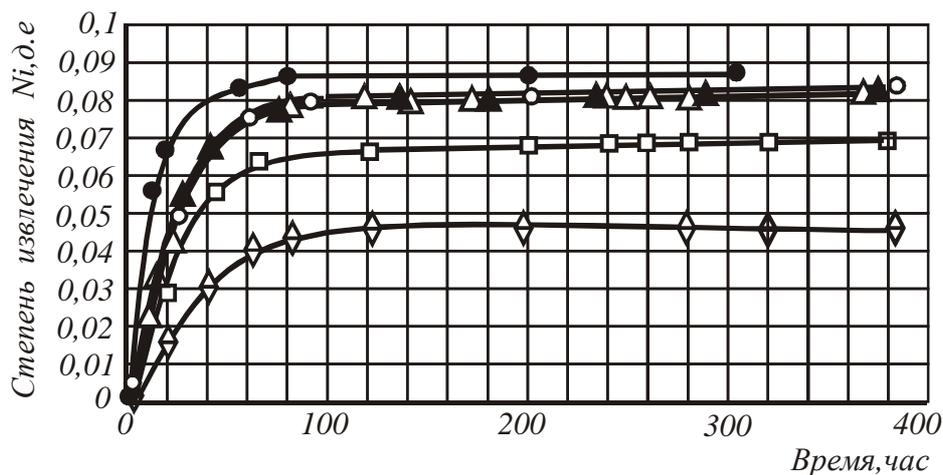
Суворин А.В., Савенков А.С., Доценко А.Д.

**КИНЕТИКА ЭКСТРАКЦИИ НИКЕЛЯ ИЗ ОТРАБОТАННОГО КАТАЛИЗАТОРА ГИАП-3-6Н РАСТВОРОМ АЗОТНОЙ КИСЛОТЫ НИЗКОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ**

Опубликованные работы, касающиеся методов извлечения металлов из отработанных катализаторов азотной кислотой дают информацию, которая относится к условиям использования высокой концентрации кислоты (55÷58 или 90 %-ной) [1–5], а также [6, 7 и ссылки на них]. Исследования совмещенных процессов хемосорбции оксидов азота, которые содержатся в отходящих газах, в том числе катализаторных производств, и экстракции металлов из отработанных катализаторов, проведенные нами с системами, содержащими механически малопрочные катализаторы [6, 8], показали, что жидкая фаза системы продолжительное время имеет значение  $pH$  близкое к 1. В этой связи для определения лимитирующей стадии на границе раздела фаз газ-жидкое в рассматриваемой системе проведена серия экспериментов по методу "вращающегося диска" [9, 10] с использованием азотной кислоты с концентрацией 0,1 моль/л при температурах 20÷40 °С. Для экспериментов использовался отработанный в условиях шахтной конверсии метана производства аммиака катализатор ГИАП-3-6Н, характеристика которого представлена в работе [11].

Схема экспериментальной установки, позволяющая изучать кинетику экстракции из твердого тела в режиме "вращающегося диска", аналогична описанной в [8], только вместо лопастей мешалки на валу электродвигателя с помощью силиконовой трубки закреплялся образец катализатора таким образом, что жидкая фаза, находящаяся в термостатированной ячейке, имела доступ только к нижней поверхности гранулы катализатора. В термостатированную ячейку заливалось 50 мл раствора  $HNO_3$  с концентрацией 0,1 моль/л, после установления заданной температуры (20÷40 °С) в нее погружалась ось вращающейся мешалки с закрепленным на ней образцом катализатора. Число оборотов регулировалось ЛАТРОм в интервале 0÷480 об/мин и контролировалось стробоскопом СШ-2. Точность измерения температуры составляла  $\pm 0,5$  °С, объема –  $\pm 0,1$  мл, точность определения скорости вращения вала мешалки –  $\pm 1$  об/мин. Через определенные промежутки времени отбирались пробы раствора объемом по 1 мл и анализировались на содержание  $Ni^{2+}$  фотокалориметрически по известным методикам [12]. Для сохранения объема жидкой фазы и постоянства концентрации азотной кислоты после отбора каждой пробы, в ячейку 4 вводили по 1 мл свежей 0,1Н  $HNO_3$ . Доступная жидкой фазе поверхность образца катализатора массой  $\approx 3,50$  г с содержанием никеля  $\approx 5,03$  % масс составляла  $\approx 0,98$  см<sup>2</sup>.

Динамика изменения степени извлечения никеля из катализатора, которую рассчитывали как отношение текущей массы ( $m_t$ ) извлеченного никеля к максимально возможной массе ( $m_0$ ), представлена на рис. 1. На приведенных графических зависимостях четко выделяются две области – интенсивной и замедленной экстракции  $Ni^{2+}$  из катализатора. Перемешивание практически не влияет на изменение интенсивности экстракции никеля из отработанного катализатора при 20 °С и скоростях вращения вала мешалки  $N_{вр}$  более 120 об/мин.



$N_{ep}$ :  $\diamond$  - 0,  $\square$  - 60,  $\Delta$  - 120,  $\circ$  - 240,  $\blacktriangle$  - 480 об/мин при  $t=20$  °C;  $\bullet$  - 240 об/мин при  $t=40$  °C

Рисунок 1 – Динамика изменения степени извлечения никеля при разных скоростях вращения мешалки,  $C_{HNO_3}=0,1$  моль/л,  $t = 20$  и  $40$  °C

Средняя скорость экстракции  $Ni^{2+}(U_{Ni})$ , которую рассчитывали как отношение количества извлеченного из катализатора никеля ( $\Delta m_t$  моль) за момент времени ( $\Delta t$ , час) к площади контакта ( $S$ ,  $cm^2$ ), до достижения степени его извлечения  $7 \div 7,5$  % масс в первой области, составляет  $(9,5 \div 10,1) \cdot 10^{-10}$  моль/ $cm^2 \cdot сек$  при  $N_{ep} > 120$  об/мин. Уменьшение  $N_{ep}$  от 120 до 0 об/мин (условия естественной конвекции) приводит к снижению скорости экстракции в  $\approx 7$  раз. Увеличение от 0 до 60 об/мин и затем до  $120 \div 480$  об/мин, как это следует из рис. 1, приводит к увеличению  $\alpha_{Ni}$  от  $4 \div 4,5$  до  $6 \div 6,5$  и до  $7 \div 7,5$  % масс соответственно, при которых начинается резкое снижение  $U_{Ni}$ . Такой характер увеличения  $\alpha_{Ni}$  с увеличением  $N_{ep}$  в интервале  $0 \div 120$  и более об/мин, при которой начинается замедление процесса экстракции никеля, объясняется усилением турбулизации жидкой фазы [9] в устьях пор катализатора на наружной поверхности его гранул. Превышение выше указанных величин  $\alpha_{Ni}$  вызывает внутри диффузионное торможение процесса, поскольку средняя скорость экстракции  $Ni^{2+}$  на этом участке при  $20$  °C составляет  $8,4 \cdot 10^{-12}$  моль/ $cm^2 \cdot сек$  (т.е.  $\approx$  в  $140 \div 20$  раз меньше, чем на участке интенсивного растворения) и не зависит от интенсивности перемешивания. Повышение температуры от  $20$  до  $40$  °C при  $240$  об/мин приводит к увеличению  $U_{Ni}$  от средней  $9,9 \cdot 10^{-10}$  до  $25,1 \cdot 10^{-10}$  моль/ $cm^2 \cdot сек$ , т.е. в 2,5 раза на участке интенсивной экстракции, а на участке замедленной экстракции от  $(8,6$  до  $8,9) \cdot 10^{-12}$  моль/ $cm^2 \cdot сек$ , т.е. практически не меняется. Этот факт подтверждает внутри диффузионное лимитирование процесса.

Обработка экспериментальных данных по формально-кинетическим уравнениям, выведенным исходя из продвижения фронта взаимодействия по принципу "сжимающейся сферы" при наличии химической реакции 1-го порядка для кинетической области

$$1 - (1 - \alpha)^{1/3} = k \cdot \tau \quad (1)$$

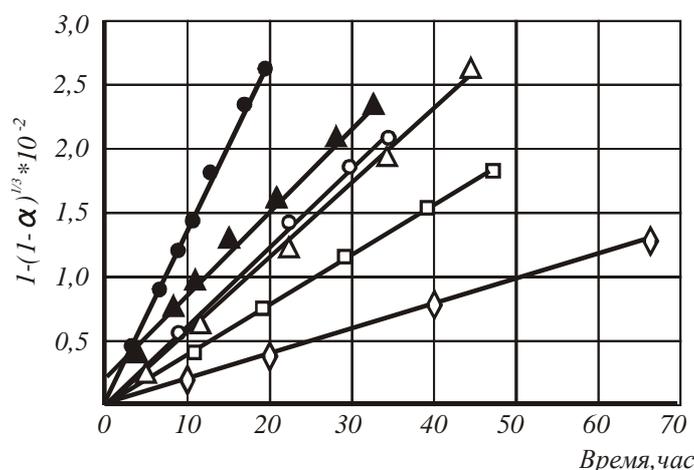
и

$$1 - 2/3 \cdot \alpha - (1 - \alpha)^{2/3} = k \cdot \tau \quad (2)$$

для диффузионной области [13] свидетельствует, что при  $N_{ep} = 120 \div 480$  об/мин и до достижения  $\approx 7 \div 7,5$  %-ной степени экстракции  $Ni^{2+}$  процесс протекает в кинетической

области (рис. 2.). Константа скорости, оцененная по тангенсу угла наклона аппроксимирующей прямой к оси  $\tau$ , составляет  $5,7 \cdot 10^{-4} \text{ час}^{-1}$ . Среднее квадратичное отклонение расчетных данных от аппроксимирующей прямой по уравнению (1) составляет 0,96, а по уравнению (2) – 0,81 в этом же интервале степеней извлечения никеля. Уменьшение  $N_{ep}$  до 60 об/мин приводит к снижению константы скорости до  $4 \cdot 10^{-4} \text{ час}^{-1}$ , а в условиях естественной конвекции – до  $2 \cdot 10^{-4} \text{ час}^{-1}$ .

В области замедленной экстракции (рис. 3) кинетика удовлетворительно описывается внутридиффузионным уравнением (2). Среднее квадратичное отклонение экспериментальных точек от аппроксимирующей прямой по уравнению (2) составляет 0,98, а по уравнению (1) – 0,87. Константа скорости на этом участке, как и следовало ожидать, не зависит от  $N_{ep}$  и составляет  $1,8 \div 2 \cdot 10^{-7} \text{ час}^{-1}$  при 20 °С и  $2,3 \cdot 10^{-7} \text{ час}^{-1}$  при 40 °С.



$N_{ep}$ :  $\diamond$  - 0,  $\square$  - 60,  $\Delta$  - 120,  $\circ$  - 240,  $\blacktriangle$  - 480 об/мин при  $t=20$  °С;  $\bullet$  - 240 об/мин при  $t=40$  °С

Рисунок 2 – Обработка экспериментальных данных по уравнению (1)

Оценка энергии активации по тангенсу угла наклона прямой, построенной в координатах  $\ln k = f(1/T)$  для условий 240 об/мин при 20 и 40 °С дает значения  $E = 33,4$  и  $5,3 \text{ кДж/моль}$ , а также значения  $\ln k_0 = 6,1$  и  $-13,2$ , соответственно для участков степеней извлечения никеля  $<7$  и  $>8 \text{ \% масс}$ . Расчет температурного коэффициента ускорения процесса в интервале  $t = 20 \div 40$  °С по формуле  $\beta_T = \left( \frac{k_{T_2}}{k_{T_1}} \right)^{\frac{10}{T_2 - T_1}}$  для участка интенсив-

ной экстракции дает результат  $\beta_T = 1,6$ , который близок к численному значению верхней границы внешнедиффузионно лимитируемых процессов ( $\leq 1,5$ ). Для участка замедленной экстракции  $\beta_T = 1,1$ , что характерно для процессов, лимитируемых внутренней диффузией [14].

Зависимость константы скорости на участке интенсивной экстракции от числа оборотов мешалки при  $N_{ep} \leq 120 \text{ об/мин}$  (рис. 4) практически прямолинейна (среднее квадратичное отклонение 0,96), что позволяет вывести зависимость константы скорости экстракции  $Ni^{2+}$  от интенсивности перемешивания:

$$k = 0,0002 + 3 \cdot 10^{-6} \cdot N_{ep},$$

где 0,0002 – константа скорости при естественной конвекции,  $\tau^{-1}$ ;  $3 \cdot 10^{-6}$  – коэффициент, численно равный тангенсу угла наклона аппроксимирующей прямой (рис. 4).

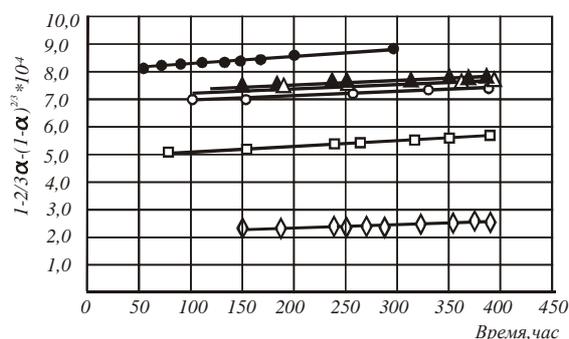


Рисунок 3 – Обработка экспериментальных данных по уравнению (2)

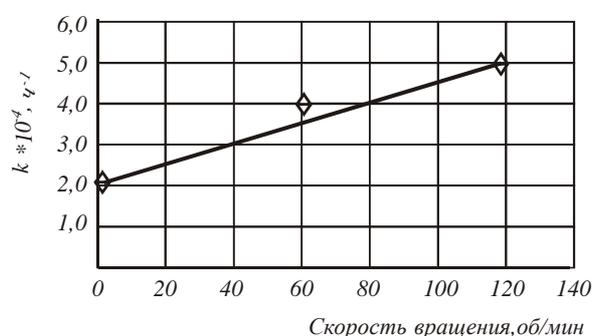


Рисунок 4 – Зависимость константы скорости экстракции  $Ni^{2+}$  от интенсивности перемешивания

Это позволяет записать основные кинетические уравнения для областей интенсивной и замедленной экстракции никеля из катализатора в 0,1  $HNO_3$  (таблица 1).

Таблица 1 – Кинетические уравнения и константы при экстракции никеля из отработанного катализатора ГИАП-3-6Н с помощью 0,1  $HNO_3$

$N_{ep}$ , об/мин	Кинетические уравнения
Кинетическая область (интенсивная экстракция)	
0 ÷ 120	$1 - (1 - \alpha)^{1/3} = (2 + 3 \cdot 10^{-2} \cdot N_{ep}) \cdot 10^{-4} \cdot \tau$
240	$1 - (1 - \alpha)^{1/3} = 445,8 \cdot e^{-\frac{4019,3}{T}} \cdot \tau$
480	$1 - (1 - \alpha)^{1/3} = 5,7 \cdot 10^{-4} \cdot \tau$
Внутридиффузионная область (замедленная экстракция)	
0 ÷ 120	$1 - 2/3 \cdot \alpha - (1 - \alpha)^{2/3} = (1,8 \div 2) \cdot 10^{-7} \cdot \tau$
240	$1 - 2/3 \cdot \alpha - (1 - \alpha)^{2/3} = 1,85 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-\frac{637,8}{T}} \cdot \tau$
480	$1 - 2/3 \cdot \alpha - (1 - \alpha)^{2/3} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \tau$

Такие соотношения между численными значениями скоростей, а также оценочное значение энергии активации, полученные для скорости вращения вала мешалки 240 *об/мин*, свидетельствуют о том, что на участке степеней извлечения никеля до 7÷8 % масс процесс экстракции никеля может протекать в переходной между кинетической и внешнедиффузионной областями.

Таким образом, проведенными исследованиями показано, что при экстракции никеля из отработанного катализатора ГИАП-3-6Н 0,1 *N* раствором азотной кислоты, процесс протекает в двух областях: до степени экстракции никеля 4÷7 % *масс* – в переходной между кинетической и внешнедиффузионной, а затем – во внутридиффузионной. Определены константы в кинетических уравнениях, а также оценена их зависимость от температуры и интенсивности перемешивания. Полученные результаты могут быть использованы при расчетах совмещенного процесса хемосорбции оксидов азота и экстракции металлов из отработанных катализаторов.

#### Литература

1. А.С. №187739 (СССР). МКИ В 01J 23/99. Способ регенерации катализаторов из окиси никеля и окиси алюминия.
2. А.С. №1303555 (СССР). МКИ В 01J 23/94 Способ получения азотнокислого никеля из отработанных катализаторов.
3. А.С. №2559201 (СССР). МКИ В 01J 11/18. Извлечение никеля из отработанного катализатора азотной кислотой.
4. А.С. №1011237 (СССР). МКИ В 01J 23/94. Способ извлечения никеля из отработанных катализаторов.
5. Суворин А.В., Суворин В.А. Промышленный круговорот катализаторов. Вісник Східноукраїнського державного університету № 4 (26). 2000, с. 209–215.
6. Суворин А.В. Катализаторные производства с позиции безотходности и комплексного использования сырья.// "Экотехнологии и ресурсосбережение", № 4, 2003, с. 12–15.
7. Recycling of metals and Engineered materials Edited by D.L. Stewart, R. Stephens and I.C. Daley TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2000, p. 741–758.
8. Суворин А.В., Доценко А.Д., Трубникова Л.В., Савенков А.С. Исследование совмещенного процесса сорбции NO<sub>x</sub> и экстракции кобальта из отработанных катализаторов.// Вестник национального технического университета «ХПИ» № 15, 2004 г., с. 95–100.
9. Аксельруд Г.А., Альтшулер М.А. Введение в капиллярно-химическую технологию./ М.: Химия, 1983, 263 с.
10. Романков П.Г., Курочкина М.И. Экстрагирование из твердых материалов./ Л.: Химия, 1983, 256 с.
11. Суворин В.О., Суворин О.В. Характеристика спрацьованих алюмонікелевих каталізаторів конверсії метану нанесеного типу.// Хімічна промисловість України. № 1, 2001, с. 46–50.
12. Унифицированные методы анализа вод. Под. ред. докт. хим. наук, проф. Ю.Ю. Лурье./ М.:Химия, 1971 г., 375 с.
13. Будников П.П., Гинтслинг А.М. Реакции в смесях твёрдых веществ./ М. Стройиздат, 1965 г., 474 с.
14. Здановский А.Б. Галлургия./ Л.: Химия, 1972, с. 74.

Bibliography (transliterated)

1. A.S. #187739 (SSSR). MKI V 01J 23/99. Sposob regeneratsii katalizatorov iz okisi nikelya i okisi alyuminiya.
2. A.S. #1303555 (SSSR). MKI V 01J 23/94 Sposob polucheniya azotnokislogo nikelya iz otrabotannykh katalizatorov.
3. A.S. #2559201 (SSSR). MKI V 01J 11/18. Izvlechenie nikelya iz otrabotannogo katalizatora azotnoy kislotoy.
4. A.S. #1011237 (SSSR). MKI V 01J 23/94. Sposob izvlecheniya nikelya iz otrabotannykh katalizatorov.
5. Suvorin A.V., Suvorin V.A. Promyshlennyiy krugovorot katalizatorov. *VIIsnik ShIdnoukraYinskogo derzhavnogo unIversitetu* # 4 (26). 2000, p. 209–215.
6. Suvorin A.V. Katalizatornyie proizvodstva s pozitsii bezothodnosti i kompleksnogo ispolzovaniya syiryia. "Ekotehnologii i resursosberezhenie", # 4, 2003, p. 12–15.
7. Recycling of metals and Engineered materials Edited by D.L. Stewart, R. Stephens and I.C. Daley TMS (The Minerals, Metals & Materials Society), 2000, p. 741–758.
8. Suvorin A.V., Dotsenko A.D., Trubnikova L.V., Savenkov A.S. Issledovanie sovmeschennogo protsessa sorbsii NOx i ekstraktsii kobalta iz otrabotannykh katalizatorov. *Vestnik natsionalnogo tehnikeskogo universiteta «HPI»* # 15, 2004 g., p. 95–100.
9. Akselrud G.A., Altshuler M.A. Vvedenie v kapillyarno-himicheskuyu tehnologiyu. M.: Himiya, 1983, 263 p.
10. Romankov P.G., Kurochkina M.I. Ekstragirovanie iz tverdyykh materialov. L.: Himiya, 1983, 256 p.
11. Suvorin V.O., Suvorin O.V. Harakteristika spratsovanih alyumonikelevih katalizatoriv konversiyi metanu nanesenogo tipu. *Himichna promislovist Ukrayini*. # 1, 2001, p. 46–50.
12. Unifitsirovannyye metodyi analiza vod. Pod. red. dokt. him. nauk, prof. Yu.Yu. Lure. M.:Himiya, 1971 g., 375 p.
13. Budnikov P.P., Gintsling A.M. Reaktsii v smesyah tvyordyykh veschestv. M. Stroyizdat, 1965 g., 474 p.
14. Zdanovskiy A.B. Gallurgiya. L.: Himiya, 1972, p. 74.

УДК 661.062

Гринь С.О., Казаков В.В.

## **ТЕХНОЛОГІЯ ЗВ'ЯЗАНОГО АЗОТУ У ФУНДАМЕНТАЛЬНИХ ПРАЦЯХ ІЗ ЗАГАЛЬНОЇ ІСТОРІЇ РОЗВИТКУ ХІМІЧНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ**

### **Вступ**

Наука про технологію зв'язаного азоту займає окреме особливе місце в хімічній інженерії. Проблема зв'язаного азоту має давню історію розвитку, яку творили талановиті науковці. Необхідно відзначити, що жодне явище в технології зв'язаного азоту неможливо зрозуміти без глибокого з'ясування хімічної, хіміко-фізичної природи. Наука про хімічні сполуки азоту тісно пов'язана з технологією неорганічних речовин, каталізом. Тому до історіографічного аналізу залучено широкий обсяг літератури, інформацію про закономірності розвитку цієї галузі науки від давніх часів до сьогодення. Такий методологічний підхід дозволив отримати широкі знання щодо історичного розвитку цієї науки, визначити внесок до неї науковців різних поколінь. Високим досягненням у технології зв'язаного азоту сприяла наявність значних наукових і технічних досягнень визначних вітчизняних учених: М.М. Жаворонкова, І.Є. Ададунова, О.І. Горбова, В.Ф. Міткевича, В.М. Іпатьєва, Н.І. Кобозєва, М.І. Темкіна, І.Р. Кричевського, Н.С. Горочешнікова, Н.І. Гільперіна, І.І. Андрєєва, закордонних дослідників Ф. Габера, К. Боша, Ф. Кульмана, В. Нернста, В. Оствальда, К. Біркелянда, С. Ейде та ін. Наукова школа В.І. Атроценка у свою чергу внесла вагомі здобутки в досягнення вчених-попередників, збагатила науку про хімічну технологію, технологію зв'язаного азоту, об'єктивні умови для зародження й становлення якої виникли наприкінці ХІХ ст.

### **Мета й завдання дослідження**

Метою досліджень є вивчення та аналіз фундаментальних джерел із загальної історії (В.А. Смолій, В.І. Ніколаєнко, С.В. Кульчицький, І.К. Рибалка, В.В. Кулініченко та ін.) та загальні проблеми історії науки й техніки (Л.М. Бесов, Дж. Бернал, Г.М. Добров, В.А. Кирилін, А.П. Огурцов, В.І. Онопрієнко, С.В. Шувардін, В.С. Віргинський, Б.І. Іванов, Б.М. Кедров, Н.А. Бердяєв, А.А. Воронін, В.П. Горюнов, Х. Ленк, В.І. Купрін, В.Н. Розін та ін.) про галузь технології зв'язаного азоту. У зв'язку з цим необхідно систематизувати закономірності розвитку взаємовідношень промислового виробництва із створенням нових хімічних технологій зв'язаного азоту.

### **Викладання основної частини дослідження**

Наука виконує функції загальнонаукового збагачення та проведення прикладних досліджень, зусилля науковців зосереджені на вирішенні найактуальніших завдань розвитку прогресивних підприємств у той чи інший історичний момент розвитку держави. Тому при проведенні історико-наукового аналізу діяльності наукової школи з проблеми кінетики та каталізу зв'язаного азоту академіка В.І. Атроценка, необхідно дослідити численні літературні джерела різного напрямку: загальної історії, історії науки й техніки, наукової та спеціальної, громадсько-публіцистичної, фондів архівів державних, сімейних та підприємств, організацій, навчальних закладів тощо в нерозривному контексті історичних умов розвитку суспільства, промислового виробництва.

Необхідно відзначити, що розвиток наукових пошуків промислового виробництва продуктів зв'язаного азоту безпосередньо залежав від участі держав світу у військових діях та війнах. Головним використанням сполук азоту було застосування їх для

одержання вибухівки, пороху, боеприпасів. Тому в певні періоди історії України в ХХ столітті промислове виробництво вимагало створення нових хімічних технологій, пошуки нових сировинних джерел для одержання аміаку, азотної кислоти, селітри тощо. Вирішення проблеми зв'язаного азоту для людства також вирішувало б проблему харчування, оскільки азотні мінеральні добрива сприяють різкому підвищенню урожайності сільськогосподарських рослин, які забезпечують людину продуктами харчування. Тому хімічні сполуки азоту мають подвійне застосування, з одного боку, для забезпечення добробуту людини, а, з іншого – її знищення [1–3]. Аналізуючи суспільно-політичну й економічну характеристику ХХ століття, перші наукові дослідження в технології зв'язаного азоту та неорганічних речовин, показано, що з періоду початку розвитку капіталістичних відносин, збільшення промислового виробництва дедалі складними ставали вимоги до застосування природознавчих і технічних наук, результатів наукових пошуків, підготовки інженерних кадрів тощо. Зародження й розвиток технічних наук, організація підготовки інженерів і технологів у вищих навчальних закладах, у тому числі в Харківському практичному технологічному інституті, який засновано у 1885 р., проаналізовано в праці Б.І. Козлова [4]. Таким чином, у кінці ХІХ – на початку ХХ ст. виникли об'єктивні умови для зародження й становлення нової галузі технічних наук – технології зв'язаного азоту. Характеристика суспільного розвитку від першої світової війни до перших десятиліть радянської влади детально проаналізовано в працях з історії України під редакцією В.А. Смоля [5,6] та В.І. Ніколаєнка [7]. Авторами показано необхідність створення й упровадження в промислове виробництво нових технологій з використанням нової сировини та забезпечення економії енергетичних ресурсів [5].

Прогрес технічної хімії було зумовлено розвитком металургії, фарбувальної справи й медицини. У працях з історії науки й техніки авторів – А.Ю. Гольян-Нікольський, Р.Д. Іскович-Лотоцький, Л.М. Бесов [8–10] показано, що промислова революція в Росії здійснювалась з великим відставанням від інших країн. Від мануфактурного до фабричного виробництва промисловий переворот розпочався з першої половини ХІХ ст., тобто із запізненням від Англії й Америки приблизно на 40 років [10]. Наприкінці першої половини ХІХ ст. в Росії фактично не існувало хімічної промисловості. Наприклад, на її території було 111 кустарних хімічних майстерень, де працювало близько 3300 робітників. Тут вироблялись хромові сполуки (калієвий хромпик), які були потрібні для обробки шкіри, різні хімічні речовини в незначній кількості (Петербург, Варшава, Ржев, Козельськ та інші міста) [10]. У цей же час Німеччина мала значні успіхи в розвитку хімічної технології, створенні продуктів хімії.

Перехід від ручної праці до машинного виробництва в Росії завершився, в основному, наприкінці 70-х – на початку 80-х років ХІХ ст. У 1879 р. за допомогою машин вироблялось продукції (%): у суконній та шерстяній галузі – 54,8; паперовій – 96,3; металообробних підприємствах – 86,3 %; цукробуряковій промисловості – 85,1; у прядінні, ситцевибиванні і паперовій – 100 [10]. Однією з характерних рис промислової революції у Росії було те, що вона мала слабо розвинені окремі галузі, зокрема, хімічну промисловість. Тут зміни відбувались з великим відставанням від країн Західної Європи і США, а процес змін був значно тривалий. При цьому матеріально-технічні умови здійснення промислового перевороту в Росії були не менш сприятливими, ніж у країнах Європи і США. Лише у 1917 р., після завершення будівництва й уведення в дію виробництва азотної кислоти й аміачної селітри м. Юзівка (Донецьк) на основі наукових досліджень І.І. Андрєєва [11–14], було створено сучасне хімічне виробництво за кращими показниками у світі.

Перед Другою світовою війною Радянський Союз повністю відмовився від імпорту технології та обладнання для виробництва азотної кислоти, а у 70-ті роки ХХ ст. за об'ємом виробництва продуктів зв'язаного азоту вийшов на перше місце у світі за рахунок новітніх досягнень вчених у галузі науки й техніки.

На початку 30-х років ХХ ст. завершилась реорганізація вищих технічних навчальних закладів, з'явилися достатні передумови для продовження широких наукових пошуків у галузі технології зв'язаного азоту, використовуючи досягнення попередніх учених. Організації наукових пошуків, внеску вчених у розвиток технічних наук на початку ХХ ст. присвячені ґрунтовні праці В.І. Онопрієнка [15, 16], Л.І. Сухотеріної [17], а також видання АН СРСР “Організація науки в перші роки Радянської влади (1917–1925)” [18]. На той час на хімічних кафедрах ВНЗ створені сучасні лабораторії для дослідження основних хімічних технологій, з'явилися нові форми організації наукових пошуків [15, 16], залучення до науки обдарованої молоді після закінчення інститутів, наявність кваліфікованих і досвідчених викладачів, а також початок уведення в експлуатацію багатьох потужних на той час хімічних підприємств – усе це сприяло формуванню творчих колективів – наукових шкіл у хімічній технології, у тому числі технології зв'язаного азоту. У перші роки радянської влади технічні науки не знаходили місця в структурах академічної науки [15, 16, 18], а розвивались у галузевих та навчальних інститутах, що має місце і сьогодні.

Аналізуючи праці науковців з історії науки й техніки, необхідно відзначити, що фахівці головну увагу приділяли базовим галузям промисловості: гірничодобувній, металургійній, енергетиці, хімічній.

Щодо розвитку хімічного виробництва, то Дж. Бернал у монографії “Наука в истории общества” [19] та В.А. Кирилін у праці “Страницы истории науки и техники” [20] наводять загальні відомості щодо наукових досліджень та промислового впровадження основних хімічних речовин: соди, сірчаної кислоти, лугів тощо. Але нічого не повідомляється і не аналізується щодо проблеми зв'язаного азоту, яка в той час хвилювала багатьох дослідників та проводилися широкі дослідження для вирішення цього складного питання. У якійсь мірі це можливо пояснити таємницею, що супроводжувалась у дослідженнях та виробництві в галузі азотної кислоти. Так Л.М. Бесов, аналізуючи особливості науково-технічного розвитку, звертає увагу, що однією з характеристик є використання досягнень науки й техніки для задоволення потреб війни [10], що особливо стосувалось речовин зв'язаного азоту. Автором показано, що в ХХ ст. було розв'язано дві світові війни, і тому цілий ряд фундаментальних досліджень не торкнувся покращення життя людей аж до кінця Другої світової війни. Досягнення хімічної науки були спрямовані на створення хімічної зброї, вибухівки, боєприпасів тощо. Така тенденція спостерігалась з початку ХХ ст., коли творчі сили науки й техніки були спрямовані на створення багатьох видів озброєння, на що витрачались матеріальні, сировинні, трудові ресурси, інтелектуальні сили.

Унаслідок використання тільки хімічної зброї у Першу світову війну постраждало близько 1,3 млн. чоловік, із них 100 тис. загинуло [10].

У фундаментальній праці “Техника в ее историческом развитии” (Отв. ред. С.В. Шухардин), що видана у 1982 та 1979 рр. [21, 22] Інститутом історії природознавства й техніки АН СРСР, значну увагу приділено розвитку техніки у 70-ті р. XIX ст. – на початку ХХ ст., зроблено аналіз від з'явлення ручних знарядь праці до техніки машинно-фабричного виробництва. Але, на жаль, автори приділяли значну увагу розвитку системи машин, а не технологій, у тому числі і хімічного виробництва.

Становлення й розвиток вітчизняної історії техніки є невід'ємною частиною наукових інтересів історіографів різних поколінь. Основні події, які зв'язані з дисциплі-

нарним зародженням вітчизняної історії та формуванням історико-технічної спільноти, відносяться до ХХ ст. До цього історико-технічних праць в їх сучасному розумінні були одиниці і присвячені вони, головним чином, гірничому і рудному виробництву та їх енергетичній базі – паросиловим установкам [23–25].

В останні десятиріччя ХІХ – на початку ХХ ст. помітно зростає цікавість до історико-технічних робіт. Збільшується кількість публікацій у нових науково-технічних журналах “Записки Императорского Русского технического общества”, “Техник”, “Техническое образование”, “Труды Политехнического общества”, “Электричество”, “Железнодорожное дело”, “Вестник общества технологов”, “Вестник инженеров” та ін., які приділяли значну увагу галузевій історії техніки, розповідали про видатних учених та винахідників, їх внесок у розвиток технічного виробництва. Періодично друкувались дослідження, які можуть бути віднесені сьогодні до історії технічних наук.

Зусиллями видатних російських інженерів на початку ХХ ст. А.П. Гавриленка, В.І. Гриневецького, В.Л. Кирпичова, О.Л. Павловського, Л.Н. Стахова та ін. [26–29, 9, 10] були розроблені такі важливі теоретично-практичні питання як технічна творчість та інженерна діяльність, машина й знаряддя, інженер і техніка, відкриття й винахід, технічний пріоритет і авторське право тощо. У працях П.К. Енгельмайера [30, 31] розроблено теорію будови, розвитку і соціально-філософського змісту техніки, він у тлумачення техніки включає і технічні знання, і фундаментальні науки, і саму природу. Висунув нетрадиційну для свого часу ідею паралелізму й накладання технічної історії та науки про еволюційний розвиток. Потім Б.І. Купрін [32], відповідно з аналогією про теорію природного відбору, розробив концепцію інформаційного відбору, запропонував у науковий обіг “технетика”, а С. Тулмін [33] – використовувати дарвінізм як загальну методологічну модель для описування еволюції наукових гіпотез і концепцій.

Важливим значенням для розробки конкретних питань з історії техніки було створення 5 березня 1917 р. Всеросійського союзу інженерів (перейменоване через рік у Всеросійську асоціацію інженерів, а в 1926 р. – у Всесоюзну асоціацію інженерів), у 1915 р. журналу “Вісник інженерів”, який став офіційним органом ВАІ. Розвитку історії техніки сприяли й активність учених у міжнародному співробітництві, і в першу чергу, участь у німецько-радянському науковому товаристві “Культура й техніка” яким керували А. Ейнштейн та А.І. Риков. Неформальним громадським об’єднанням, котре ставило задачі дослідження історії техніки, став “Кружок загальних питань техніки”, який створено 5 травня 1927 р. на Загальних зборах Політехнічного товариства. При цьому основними напрямками діяльності було вивчення загальної, галузевої та регіональної історії техніки; аналіз зв’язку й взаємодії техніки з наукою, мистецтвом, правом, етикою; розробка науково-бібліографічної спадщини інженерів і формування теорії технічної творчості; удосконалення системи технічної освіти тощо. Активну участь у вирішенні цих проблем приймали Н.К. Голованов, В.В. Добровольський, Л.В. Дрейер, А.К. Кауфман-Клементьєв, П.К. Енгельмейер, І.Н. Юрловський та ін. Вони опублікували звернення “К работникам техники и промышленности”, в якому говорилось, що *“история техники не есть вопрос пустого любопытства, а является серьезным делом, разработка ее необходима, притом не для одних техников, но и с общеисторической и в то же время и с педагогической точки зрения... Необходимо собрать свидетельства оставшихся в живых деятелей отходящей полосы в истории нашей техники и промышленности; следует, в меру досугов, писать свои воспоминания... Необходимо позаботиться о сохранении памятников и реликвий историко-технического характера, имеющих в СССР, каковыми являются всевозможные здания, мосты и прочие сооружения, машины, орудия и т.п., имеющие историко-техническую ценность”* [34, с. 400]. Але більшовицька дійсність не могла змиритись з деїдеологізованими вченими, їх діяль-

ністю. Тому діяльність “Кружка загальних питань техніки” директивно була припинена в 1929 р. Цією подією закінчився перший етап становлення вітчизняної історії техніки (кінець XIX ст. – 1929 р.), закінчилась епоха вільних наукових і організаційних пошуків. Наступив час жорстких ідейно-політичних реалій 1930–1950-х рр.

У першій половині 30-х років XX ст. технічна політика Радянської влади мала два діаметрально протилежних початки: з одного боку, була розгорнута політика гоніння широких шарів професури вищих технічних навчальних закладів, фальсифіковані політичні процеси проти видатних інженерів, конструкторів, керівників промисловості (справи Промислової партії, шахтинської групи, “Контреволюційного центру у ВРНГ і Держплані” тощо), заборонена діяльність ВАІ та її друкованого органу “Вісник інженерів”. У той же час була розгорнута широкомасштабна пропагандистська компанія, яка оспівувала індустріалізацію країни і її централізовано-планову основу, технічне переозброєння народного господарства, формування нової робітничо-селянської технічної інтелігенції. Усе це вимагало серйозного інтелектуального забезпечення, яке б об’єднало нову ідеологію і науково-технічний зміст [35]. Одним із шляхів рішення цієї задачі було, відповідно постанові пленуму ЦК ВКП(б) у листопаді 1929 р., формування марксистської історії техніки. У резолюції партійного форуму указувалось, що *“...необхідно забезпечити у програмах ВТНЗів конкретну економіку і марксистську історію техніки”* [36, с. 338]. У 1932 р. у Ленінграді створено Інститут історії науки й техніки АН СРСР, який мав шість секцій, у тому числі й секцію історії техніки, яку очолив В.Ф. Міткевич. Пізніше при інституті створено Музей історії науки й техніки. Організаційні кроки і наукові дослідження в цей час аналізує С.С. Єлізаров [37] у роботі “Материалы к историографии истории науки и техники”.

У фундаментальних працях В.В. Данилевського, Г.М. Кржижановського, В.Ф. Міткевича, А.А. Ратцига, С.Г. Струмиліна, М.А. Шателена, К.І. Шенфера та ін. [38–43] досліджувалась історія галузей вітчизняної техніки, досвід світового технічного розвитку, спадщина видатних інженерів та винахідників. У цей час виходять серійні видання “Історії заводів” про розвиток підприємств і ремесел; із 1933 до 1937 рр. побачили світ дев’ять випусків “Архів історії науки й техніки”; шість збірників “Історія техніки”, які відзначились своєю фундаментальністю і продовжували традиції російської історичної школи. Але на охороні ідеологічної чистоти стояли конформісти від науки, котрі прийняли нові правила політичної гри і готові щомиті за сигналом шельмувати кожного науковця, організувати друковані статті, як, наприклад, надрукована у “Віснику АН СРСР” за 1937 р. стаття О.О. Зворикіна “Ликвидировать до конца последствия троцкистско-бухаринского вредительства на фронте истории науки и техники” [252]. Таким був механізм формування марксистської парадигми історії техніки, який визначив на багато років кордони й зміст дисциплінарного дослідницького поля.

У 40–50-ті роки найбільшу цікавість представляють роботи В.В. Данилевського “Русская техника” і Н.І. Фальбовського “Москва в истории техники” [253, 254], які базувались не тільки на письмових, але і на речових історичних джерелах. Рукописи, архівна періодика, стародруковані видавництва, експонати музеїв, патенти, промислово-археологічні свідчення минулого – усе це органічно вплетене в єдину тканину книг і сьогодні є великою науковою і культурно-художньою цінністю.

У другій половині 1950-х рр. розвиток історично-технічної думки у значній мірі пов’язаний з працями І.Я. Конфедератова, який працював професором кафедри історії техніки МЕТ [255–259]. Його головною заслугою є постановка й розробка комплексу теоретичних проблем технічного розвитку, дослідження кількісних і якісних сторін розвитку техніки, вивчення еволюції історії техніки. Він розробив концепцію трьох рівнів дослідження розвитку історії техніки: перший рівень – фактологічний; другий – аналі-

тичний; третій – характеризується знаходженням та дослідженням тенденцій і закономірностей технічного розвитку. Головне значення таких досліджень є в тому, що “...установленные на основе наблюдаемых фактов тенденции и направления развития могут с достаточной степенью достоверности быть экстраполированы в будущее” [259, с. 23]. Це також стимулювало прибічників рішення історією техніки прогностичних задач. Спроба зв’язати в єдину лінію розвиток знань про минуле техніки і зробити на їх основі прогноз на перспективу має давню традицію. Ще на початку ХХ ст. німецький учений В. Оствальд відзначав, що якщо історія техніки – це наука, тоді як і вся наука вона виявляє, досліджує й формулює закони, які з’єднують минуле, теперішнє і майбутнє [260]. Прихильники цієї концепції стверджують [261], що розробка прогнозу – важлива мета установок історії техніки. У зв’язку з цим необхідно відзначити, що історія техніки є частиною єдиної історичної науки, яка вивчає минуле. Формування прогнозів – задача інших наук. Історія техніки немає безпосереднього відношення до розробки перспектив технічного розвитку. Вона формує в інженерного товариства загальну й професійну культуру, історизм мислення, ерудицію по відношенню розвитку й техніки в цілому, її галузевих компонентів. Ці знання підвищують аргументацію й професіоналізм судження (міркування) про майбутнє, міркування, які мають виключно асоціативно-вірогідний, передбачуємий характер. Такі, на думку В.Л. Гвоздецького [255, 256] прогностичні межі історії техніки.

Дисциплінарний нахил у 1960-ті роки у бік теоретично-методологічних питань – результат пошуків не тільки І.Я. Конфедератова, а також і інших науковців, і в першу чергу Ю.С. Мелещенка і С.В. Шухардіна [44]. Обумовлені ідеологічним імперативом методологічні й тематичні межі дозволяють їм розглядати період 1930–1960-х років як час “малого кола”. У ці десятиріччя історія техніки знайшла своє місце у кваліфікаційній номенклатурі наук, сформувалась система діючих дослідних структур, побачили світ десятки праць, які одержали широке визначення в Росії і за кордоном, склались стійкі механізми відтворення кадрів.

У 60–70-ті роки ХХ ст. відбувалось поступове розхитування пануючої декілька десятиліть марксистської парадигми історії техніки. У результаті на початку 1990-х років сформовано трактування, яка розглядала техніку як результат людської діяльності, частину культури; пройшло поступове повернення на більш високому рівні знань до енгельмейєровським напрацюванням початку ХХ століття. При цьому нове тлумачення не перекреслювало старі трактування, а більш розширювала й добавились принципи спадкоємності, кумулятивності, еволюції. Одним із тематичних фрагментів “великого кола” історії техніки у цей час є сучасна науково-технічна революція, що викликало проведення досліджень багатьох філософів, соціологів, науковців, економістів, фахівців у галузі прикладних наук та інженерів, а також і істориків техніки [264].

У другій половині 60-х років ХХ століття важливою компонентою історії техніки стає історія й теорія технічних наук, яка до цього часу досліджувалась епізодично і тільки в цей період пошуки набули організаційної й предметної цілісності.

Загальноновизнаним центром дослідження технічних наук стає колектив науковців у складі Ю.С. Мелещенка, О.М. Волосевича, Б.І. Іванова, В.В. Чешева та ін. [45], які зробили цілісну систему знань із таких питань як генезис технічних наук; об’єкт, предмет і метод дослідження, формування технічної мови, графічних і математичних символів; технічної теорії та ідеальних об’єктів; єднання знань і діяльності; періодизація технічних наук і їх основні етапи розвитку; функціонування системи “фундаментальні знання – технічні науки – інженерна практика”; класифікація технічних наук та їх місце й зв’язок із природничими та суспільними науками; закономірності розвитку і будови технічних наук тощо.

Важливим питанням історії техніки є соціальні проблеми розвитку вітчизняної техніки. Було опубліковано безліч фундаментальних досліджень, у яких ґрунтовно висвітлена соціальна складова [269–271]. Але поруч із цим є питання при розгляді історії техніки [276, 277], які потрібно по-новому проаналізувати: дослідження, пропаганда й захист глибоких і об'єктивних праць відомих дослідників Л.Д. Белькінда, В.С. Віргінського, І.Я. Конфедератова, А.А. Радцига та ін.; переосмислити та критично переглянути суб'єктивні та далекі від реальної дійсності праці [272, 273]; проблеми еміграції науково-технічної інтелігенції, наукову спадщину репресованих учених [46] тощо.

У полі зору історії новітньої техніки знаходиться і різке посилення в останній час антропогенної дії на навколишнє середовище, наслідки техногенного втручання в природу, що визвало масовий розвиток у населення технофобії. Про це німецький дослідник Х. Ленк пише: *“Поворот общества в его отношении к технике был в два последних десятилетия ошеломляющим... Если в 1972 г. 72 % населения считало технику “скорее за благо”, а лишь 3 % – “скорее проклятием”, то первый показатель снизился до 50 в 1976 г. и до 30 в 1981 г.; второй же показатель поднялся до 18 %. Следовательно, вместо трех четвертей населения теперь технику считают благом только одна треть! И почти одна пятая часть – в шесть раз больше, чем в 1972 г. – считает технику проклятием! У молодежи (возраст от 16 до 20 лет) картина еще более разительная: “благословляющих” технику в 1972 г. было 83 %, а в 1981 г. – 23 % !”* [275, с. 19].

Значення історії техніки в рішенні цих проблем досить велике. Її головний потенціал заключається в можливості демонстрації попереджувальних уроків минулого, а також мінімізувати наслідки соціальних, науково-технічних і моральних проблем.

### **Висновок**

Сьогодні в Україні спостерігається значне зростання інтересів науковців до проведення історико-наукових досліджень. Такі пошуки з історії науки й техніки мають давні традиції. Окремі розробки проводились ще в 20-ті роки ХХ ст. коли В.В. Данилевський розпочав читати у вищій школі курс історії техніки і організував першу в Україні кафедру з історії техніки в Харкові. Необхідність дослідження проблем науки й техніки, зокрема, історії розвитку хімічної технології, широко усвідомлюється в світі, а вивчення закономірностей розвитку науки й техніки є невід'ємною складовою загальнолюдської культури. Про розвиток хімічної технології, а саме про галузь зв'язаного азоту, викладено в різноманітних літературних джерелах. З метою комплексного підходу та наукового методу класифікації ці численні джерела було умовно розподілено на окремі групи напрямків дослідження, один із яких проаналізовано в запропонованій статті.

Таким чином, проаналізувавши значну кількість публікацій, відзначимо, що в них галузь технології зв'язаного азоту окремо не розглядалась. У матеріалах, які присвячено розвитку хімічної технології, поза увагою залишалась історія вирішення проблеми хімічних сполук азоту. Характерною особливістю цих праць є те, що представлені в них дослідження, які стосуються історії технічних наук, малоінформативні, розрізнені і мають не системний характер. Більша частина даних відноситься до розвитку техніки, ніж зародження та розвиток певної галузі технічних наук, що в особливій мірі характерно і для технології неорганічних речовин. Автори досліджень не виділяють в окрему область знань науку про технологію зв'язаного азоту, а розглядають її в контексті загальної історії розвитку хімічної технології. У перспективі подальших досліджень є вивчення інших джерел щодо технології неорганічних речовин, виробництва азотної кислоти, аміаку, мінеральних добрив та промислового каталізу.

## Література

1. Жаворонков Н.М. Азот и его значение в природе и народном хозяйстве. – Журнал Всесоюз. хим. общества им. Д.И.Менделеева. – 1978, т. 23, № 1. – С. 9–22.
2. Химическая промышленность в обеспечении победы советского народа в Великой Отечественной войне. – Журнал Всесоюз. хим. общества им. Д.И.Менделеева. – 1975, т. 20, № 4. – С. 364.
3. Жаворонков Н.М. Вклад советских химиков в победу над фашистской Германией. – Журнал Всесоюз. хим. общества им. Д.И.Менделеева. – 1978, т. 20, № 4. – С. 425–430.
4. Козлов Б.И. Возникновение и развитие технических наук: опыт историко-теоретического исследования. – Л.: Наука, 1987. – 248 с.
5. Історія України: нове бачення //Верстюк В.Ф., Гончаров О.В., Даниленко В.М. та ін.//Під ред. В.А.Смоля. – К.: Україна, 1995.– Т. 2.– 494 с.
6. Історія України //Верстюк В.Ф., Гарань О.В., Гурій О.І. та ін. //Під ред. В.А.Смоля. – К.: Альтернатива, 1997.– 416 с.
7. Історія України: Курс лекцій для студентів технічних ВУЗів // Арбузова С.С., Бесов Л.М., Морозов В.В. та ін. // Під заг. ред. В.І.Ніколаєнка. – Харків: Новий вид. – 2001. – 452 с.
8. Голян-Нікольський А.Ю. Вклад вітчизняних вчених у розвиток світової науки і техніки. – К.: 1954. – 29 с.
9. Ісакович-Лотоцький Р.Д., Севастянов І.В. Історія інженерної діяльності: Навчальний посібник в 2 ч. – Вінниця: ВДТУ, 2003. – Ч.2. – 126 с.
10. Бесов Л.М. Історія науки і техніки. – Х: НТУ “ХП”. – 2005. – 376 с.
11. Атрощенко В.І. Проблема зв’язаного азоту.– К.: Знання, 1969.– 47 с.
12. Жаворонков Н.М. Азот в природе и технике. Источники технического связанного азота. – М.: Правда, 1951. – 120 с.
13. Технология связанного азота. /В.И. Атрощенко, А.М. Алексеев, А.П. Засорин и др. – К.: Вища школа, 1985. – 327 с.
14. Лукьянов П.М. К истории фиксации атмосферного азота в России //Труды института истории естествознания и техники АН СССР. – 1958. – Т. 18. – С. 385.
15. Оноприенко В.И. Фундаментализация научного поиска в технических науках. К 70- летию АН УССР. – К.: Знание, 1988. – 48 с.
16. Оноприенко В.І. Історія української науки ХІХ–ХХ століть: Навчальний посібник. – К.: Либідь, 1998. – 304 с.
17. Сухоперіна Л.І. Внесок учених в розвиток технічних наук в Україні в 30-х роках ХХ століття: Монографія. – Одеса: АстраПринт, 1999. – 268 с.
18. Организация науки в первые годы советской власти (1917-1925). – Л.: Наука, 1968. – 420 с.
19. Бернал Дж. Наука в истории общества. – М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1956. – 135 с.
20. Кирилин В.А. Страницы истории науки и техники. – М.: Наука, 1986. – 511 с.
21. Техника в ее историческом развитии (70-е годы ХІХ–начало ХХ века). /Отв. ред. С.В. Шухардин. – М.: Наука, 1982. – 510 с.
22. Техника в ее историческом развитии: от появления ручных орудий труда до становления техники машинно-фабричного производства. /Отв. ред. С.В. Шухардин. – М.: Наука, 1979. – 416 с.
23. Богиерянов Н. Описание изобретения и постепенного усовершенствования паровых машин. – СПб., 1842. – 24 с.

24. Хотинский М. История машин, пароходов и паровозов. – СПб., 1853. – 92 с.
25. Араго Ф. Историческая заметка о паровых машинах. – СПб., 1861. – 120 с.
26. Асс И.М. Виктор Львович Кирпичев. // Вестник высшей школы. – М., 1952. – С. 59–63.
27. Бесов Л.М. Історія науки і техніки з найдавніших часів до кінця ХХ століття. – Х., 2000. – 251 с.
28. Чеканов А.А. Виктор Львович Кирпичев (1845-1913). – М.: Наука. – 1982. – 175 с.
29. Віктор Львович Кирпичев – перший директор. До 150-річчя від дня народження. //Київський політехнік. – 1995. – 28 вересня. – № 26 (2329). – С. 1–2.
30. Энгельмейер П.К. Технический итог XIX века. – М., 1998. – 253 с.
31. Горохов В.Г. Петр Климентьевич Энгельмейер. – М., 1997. – 224 с.
32. Кудрин Б.И. Введение в технетику. – Томск, 1991. – 384 с.
33. Тулмин С. Человеческое понимание. – М., 1984. – 198 с.
34. К работникам техники и промышленности. //Вестник инженеров. – 1928, № 8. – С. 398–402.
35. За большевизацию науки и техники. //Вестник инженеров и техников. – 1931, № 4. – С. 5–9.
36. КПСС в резолюциях и решениях съездов, конференций и пленумов ЦК. – М., 1970, т. 4. – 215 с.
37. Илизаров С.С. Материалы к историографии истории науки и техники. – М., 1989. – 180 с.
38. Богаевский Б.Л. Техника первобытно-коммунистического общества. – М.-Л., Т. 1, 1936. – 145 с.
39. Данилевский В.В. И.И. Ползунов. Труды и жизнь первого русского теплотехника. – М.-Л., 1940. – 446 с.
40. Ратциг А.А. История теплотехники. – М.-Л., 1936. 315 с.
41. Струмилин С.Г. Черная металлургия в России и СССР. – М.-Л., 1936. – 285 с.
42. Данилевский В.В. Очерки истории техники XVIII–XIX вв. – М.-Л., 1934. – 384 с.
43. Данилевский В.В. О методике изучения истории техники. //Сообщения Государственной Академии истории. – М.- Л., 1935. – С. 35–42.
44. Шухардин С.В. Основы истории техники. – М., 1961. – 187 с.
45. Иванов Б.И., Чешев В.В. Становление и развитие технических наук. – Л., 1977. – 289 с.
46. Российские ученые и инженеры в эмиграции. – М., 1996. – 185 с.

Bibliography (transliterated)

1. Zhavoronkov N.M. Azot i ego znachenie v prirode i narodnom hozyaystve. – Zhurnal Vsesoyuz. him. obschestva im. D.I.Mendeleeva. – 1978, t. 23, # 1. – p. 9–22.
2. Himicheskaya promyshlennost v obespechenii pobedy sovetskogo naroda v Velikoy Otechestvennoy voyne. – Zhurnal Vsesoyuz. him. obschestva im. D.I.Mendeleeva. – 1975, t. 20, # 4. – p. 364.
3. Zhavoronkov N.M. Vklad sovetskih himikov v pobedu nad fashist-skoy Germaniey. – Zhurnal Vsesoyuz. him. obschestva im. D.I.Mendeleeva. – 1978, t. 20, # 4. – p. 425–430.
4. Kozlov B.I. Vozniknovenie i razvitie tehnicheskikh nauk: opyt istoriko-teoreticheskogo issledovaniya. – L.: Nauka, 1987. – 248 p.

5. Istoriya Ukrayini: nove bachennya Verstyuk V.F., Goncharov O.V., Danilenko V.M. ta in. Pid red. V.A.Smoliya. – K.: Ukrayina, 1995.– T. 2.– 494 p.
6. Istoriya Ukrayini Verstyuk V.F., Garan O.V., Guriy O.I. ta in. Pid red. V.A.Smoliya. – K.: Alternativa, 1997.– 416 p.
7. Istoriya Ukrayini: Kurs leksiy dlya studentiv tehnicnih VUZiv Arbuzova S.S., Besov L.M., Morozov V.V. ta in. Pid zag. red. V.I.Nikolaenka. – Harkiv: Noviy vid. – 2001. – 452 p.
8. Golyan-Nikolskiy A.Yu. Vklad vitchiznyanih vchenih u rozvitok svitovoyi nauki i tehniki. – K.: 1954. – 29 p.
9. Isakovich-Lototskiy R.D., Sevastyanov I.V. Istoriya inzhenernoyi diyalnosti: Navchalniy posibnik v 2 ch. – Vinnitsya: VDTU, 2003. – Ch.2. – 126 p.
10. Besov L.M. Istoriya nauki i tehniki. – H: NTU “HPI”. – 2005. – 376 p.
11. Atroschenko V.I. Problema zv'yazanogo azotu.– K.: Znannya, 1969.– 47 p.
12. Zhavoronkov N.M. Azot v prirode i tehnike. Istochniki tehniceskogo svyazannogo azota. – M.: Pravda, 1951. – 120 p.
13. Tehnologiya svyazannogo azota. V.I. Atroschenko, A.M. Alekseev, A.P. Zasorin i dr. – K.: Vischa shkola, 1985. – 327 p.
14. Lukyanov P.M. K istorii fiksatsii atmosferного azota v Rossii Trudyi instituta istorii estestvoznaniya i tehniki AN SSSR. – 1958. – T. 18. – p. 385.
15. Onoprienko V.I. Fundamentalizatsiya nauchnogo poiska v tehniceskikh naukah. K 70- letiyu AN USSR. – K.: Znanie, 1988. – 48 p.
16. Onoprienko V.I. Istoriya ukrayinskoyi nauki XIX–XX stolit: Navchalniy posibnik. – K.: Libid, 1998. – 304 p.
17. Suhoperina L.I. Vnesok uchenih v rozvitok tehnicnih nauk v Ukrayini v 30-h rokah XX stolittya: Monografiya. – Odesa: AstraPrint, 1999. – 268 p.
18. Organizatsiya nauki v pervyie godyi sovetskoy vlasti (1917-1925). – L.: Nauka, 1968. – 420 p.
19. Bernal Dzh. Nauka v istorii obschestva. – M.: Izd-vo inostr. lit-ryi, 1956. – 135 p.
20. Kirilin V.A. Stranitsyi istorii nauki i tehniki. – M.: Nauka, 1986. – 511 p.
21. Tehnika v ee istoricheskom razvitii (70-e godyi HIIH–nachalo HH veka). Otv. red. S.V. Shuhardin. – M.: Nauka, 1982. – 510 p.
22. Tehnika v ee istoricheskom razvitii: ot poyavleniya ruchnyih orudiy truda do stanovleniya tehniki mashinno-fabrichnogo proizvodstva. Otv. red. S.V. Shuhardin. – M.: Nauka, 1979. – 416 p.
23. Bogieryanov N. Opisaniye izobreteniya i postepennoyo usovershenstvovaniya parovyih mashin. – SPb., 1842. – 24 p.
24. Hotinskiy M. Istoriya mashin, parohodov i parovozov. – SPb., 1853. – 92 p.
25. Arago F. Istoricheskaya zametka o parovyih mashinah. – SPb., 1861.– 120 p.
26. Ass I.M. Viktor Lvovich Kirpichev. Vestnik vyisshyey shkolyi. – M., 1952. – p. 59–63.
27. Besov L.M. Istoriya nauki i tehniki z naydavnishih chasiv do kintsya XX stolittya. – X., 2000. – 251 p.
28. Chekanov A.A. Viktor Lvovich Kirpichev (1845-1913). – M.: Nauka. – 1982. – 175 p.
29. Viktor Lvovich Kirpichov – pershiy direktor. Do 150-richchya vid dnya narodzhennya. Kiyivskiy politehnik. – 1995. – 28 veresnya. – # 26 (2329). – p. 1–2.
30. Engelmeyer P.K. Tehniceskii itog XIX veka. – M., 1998. – 253 p.
31. Gorohov V.G. Petr Klimentevich Engelmeyer. – M., 1997. – 224 p.
32. Kudrin B.I. Vvedenie v tehnetiku. – Tomsk, 1991. – 384 p.

33. Tulmin S. Chelovecheskoe ponimanie. – М., 1984. – 198 p.
34. K rabotnikam tehniki i promyshlennosti. Vestnik inzhenerov. – 1928, # 8. – p. 398–402.
35. Za bolshevizatsiyu nauki i tehniki. Vestnik inzhenerov i tehnikov. – 1931, # 4. – p. 5–9.
36. KPSS v rezolyutsiyah i resheniyah s'ezdov, konferentsiy i plenumov TsK. – М., 1970, t. 4. – 215 p.
37. Ilizarov S.S. Materialy k istoriografii istorii nauki i tehniki. – М., 1989. – 180 p.
38. Bogaevskiy B.L. Tehnika pervobyitno-kommunisticheskogo obschestva. – М.-Л., Т. 1, 1936. – 145 p.
39. Danilevskiy V.V. I.I. Polzunov. Trudy i zhizn pervogo russkogo teplotehnika. – М.-Л., 1940. – 446 p.
40. Rattsig A.A. Istoriya teplotehniki. – М.-Л., 1936. 315 p.
41. Strumilin S.G. Chernaya metallurgiya v Rossii i SSSR. – М.-Л., 1936. – 285 p.
42. Danilevskiy V.V. Ocherki istorii tehniki HVIII–XIX vv. – М.-Л., 1934. – 384 p.
43. Danilevskiy V.V. O metodike izucheniya istorii tehniki. Soobscheniya Gosudarstvennoy Akademii istorii. – М.-Л., 1935. – p. 35–42.
44. Shuhardin S.V. Osnovy istorii tehniki. – М., 1961. – 187 p.
45. Ivanov B.I., Cheshev V.V. Stanovlenie i razvitie tehniceskikh nauk. – Л., 1977. – 289 p.
46. Rossiyskie uchenyie i inzheneryi v emigratsii. – М., 1996. – 185 p.

УДК 661.062

Гринь С.А., Казаков В.В.

### **ТЕХНОЛОГИЯ СВЯЗАННОГО АЗОТА В ФУНДАМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТАХ ОБЩЕЙ ИСТОРИИ РАЗВИТИЯ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕХНОЛОГИИ**

Предлагается подход научных исследований к развитию химической технологии и определено место в области знаний технологии связанного азота. Показано, что в конце XIX – в начале XX века возникли объективные условия для рождения и становления новой отрасли технических наук – технологии связанного азота.

УДК 661.665

Гринь С.О., Кузнецов П.В., Казаков В.В.

## РОЗРОБКИ ВЧЕНИХ ПРО ФІКСАЦІЮ АТМОСФЕРНОГО АЗОТУ В 20-ТІ РОКИ ХХ СТОЛІТТЯ

Дано оцінку стану пошуків учених перших шляхів фіксації атмосферного азоту: способу добування сполук нітрогену в полум'ї електричної дуги, ціанамідного та синтезу аміаку. Показано, що економічність синтезу аміаку дозволила на початку 20-их років ХХ ст. посісти провідне місце в азотній промисловості й одержувати хімічні речовини, які містять нітроген.

### Вступ

Основною складовою живого на Землі – від бактерій до людини – є білок, який має близько 13–16 % азоту. Він також складова частина атмосферного повітря, в якому об'ємна частка його складає 78,16 %. Над кожним гектаром земної поверхні знаходиться 80 тис. т молекулярного азоту. Але тварини й рослини не можуть засвоювати безпосередньо азот із повітря, виняток складають бактерії, які розвиваються на коренях бобових рослин. Безжиттєвим називається цей газ, котрий найбільш поширений у природі, молекула якого має два атоми нітрогену. Основна маса рослин отримують сполуки нітрогену з ґрунту, який поступово втрачає його і запаси якого поповнюються внесенням добрив. Д.І. Менделєєв у своїй праці “Основы химии” писав “Так как азотистые вещества играют весьма важную роль в жизни, то вопрос о способах превращения азота воздуха в почвенные азотистые соединения представляют великий теоретический и практический интерес” [1–3]. Знайдення шляхів фіксації атмосферного повітря, спроба скопіювати в природі одержання нітрогену знаходило втілення в пошуках учених ще на початку ХХ століття. Тому так необхідно, розглядаючи історію науки про технологію зв'язаного азоту, оцінити діяльність науковців, важливих їх відкриттів, внесок кожного фахівця починаючи з цього часу. Робились певні спроби різними авторами у цьому напрямку, але детальна історія даної науки ще не написана, а є окремі аналітичні роботи щодо історичного розвитку окремих хімічних сполук, а саме  $\text{NH}_3$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{HCN}$  та ін. Слід відзначити, що більш-менш ґрунтовні праці щодо проблеми зв'язаного азоту з'явилися у 50–60-ті роки ХХ ст. Тільки у цей історичний час науковці змогли дати аналіз історії розвитку виробництва окремих речовин. Фахівці показали, що проблема одержання хімічних сполук азоту є дуже важливою для розвитку людства, тому що люди навчались використовувати азотні сполуки з дуже далеких часів.

### Мета й завдання дослідження

Метою досліджень є вивчення джерел для історіографічного аналізу, які розглядають праці про технологію зв'язаного азоту в історичному аспекті. Як і будь-яка інша галузь, технологія зв'язаного азоту, має свій початок, коли у 1901 р. норвезьким теоретиком К. Біркеландом у співробітництві з інженером С. Ейде було здійснено одержання оксидів азоту при сполученні азоту з киснем за допомогою електричної дуги. Надалі розробка методів фіксації азоту продовжувалась іншими способами і тому так важливо здійснити аналіз науково-обґрунтованих праць відомих фахівців у даній галузі.

**Викладення основної частини дослідження**

У 1772 р. англієць Данієл Резерфорд виявив, що повітря, яке залишилось після життєдіяльності тварин, не підтримує горіння та дихання. Цей газ він назвав отруйним або зіпсованим повітрям, а Антуан Лоран Лавуаз'є запропонував назвати цю частину повітря азотом (від грецького слова "а" – заперечення та "зоє" – життя). Але всупереч своїй назві азот необхідний для життя організмів. Установлено, що нітроген є складовою частиною кожної молекули, кожної клітини організму, незалежно від того, чи це є невагома бактерія, чи багатотонний синій кит. Сполуки азоту відіграють важливу роль у житті живих організмів.

Проблемою зв'язаного азоту є те, що природних запасів сполук азоту майже не має, тому що усі азотнокислотні солі добре розчиняються у воді, легко вимиваються опадами і виносяться в океан. Значні природні запаси натрієвої селітри  $\text{NaNO}_3$  у Чилі і калійної – в Індії дуже інтенсивно розроблялись і повинні були до кінця XIX ст. повністю вичерпатись. Англійські вчені Т. Гекелі у 1887 р. і В. Крукс у 1898 р. прогнозували близьку небезпеку всесвітнього голоду, який повинен розпочатися після 1930 р., коли, за їх підрахунками, вичерпаються запаси селітри в Чилі [1,2]. Учені К.А. Тімірязєв, М.М. Жаворонков [1–3] довели неспроможність прогнозів англійських учених та, відзначаючи велике значення мінеральних добрив та прогрес їх виробництва в промисловості, показали, що при використанні досягнень науки й техніки життєві ресурси людства практично невичерпні.

З життєдіяльністю бактерій, які знаходяться в ґрунті, пов'язана біологічна фіксація атмосферного азоту. Ці організми перетворюють молекулярний азот у хімічні сполуки з високим умістом азоту. Ще в 1865 р., досліджуючи бобові рослини, М.С. Воронін виявив такі мікроорганізми, які за рік можуть збагачувати ґрунт зв'язаним азотом до 150 кг на 1 га. На початку XX ст. М.В. Байєриком знайдено азотобактерії, які можуть дати до 50 кг зв'язаного азоту на 1 га ґрунту за рік. С.І. Виноградський виділив із ґрунту бактерії, які окислюють  $\text{NH}_3$  і його солі в нітрати. Початок науковому розвитку біологічного методу зв'язування азоту покладено вченими К.А. Тімірязєвим, Д.М. Прянишниковим, М.В. Федоровим та іншими дослідниками [1,4,5]. У подальших дослідженнях М.І. Вольським, О.М. Несмеяновим, О.О. Ничипоровичем, С.І. Вольфовичем встановлено властивість вищих рослин засвоювати азот повітря, загальну кількість зв'язаного азоту, одержаного біологічним методом (1–2 млн. т за рік), недоліки цього методу. Основними недоліками біологічного методу фіксації атмосферного азоту є дуже мала швидкість утворення хімічних сполук азоту, мала їх кількість, неможливість виділити сполуки в чистому вигляді із ґрунту та ін.

Технічний метод фіксації атмосферного азоту усуває ці недоліки, характеризується бурхливими темпами розвитку, одержанням мінеральних добрив із високим умістом азоту, має цікаву історію зародження та розвитку. Цей метод має важливе значення для розвитку хімічної промисловості, підвищення обороноздатності країни й задоволення побутових і харчових потреб населення. Основними продуктами азотної промисловості є  $\text{NH}_3$ ,  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}_4$ , мінеральні добрива  $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaNO}_3$ ,  $\text{KNO}_3$ ,  $\text{CaCN}_2$ ,  $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  та ін. Використовують  $\text{HNO}_3$  для одержання вибухових речовин тротил, мелініт, гексоген, ксиліл, тетрил, нітрогліцерин, нітроцелюлозу тощо. Майже всі азотні добрива є похідними  $\text{NH}_3$  або  $\text{HNO}_3$  та оксидів азоту. Слаборозчинне азотне добриво оксамід  $(\text{CONH}_2)_2$  одержують із синильної кислоти  $\text{HCN}$  або ціану  $\text{C}_2\text{N}_2$ . Концентрована азотна кислота і рідкі оксиди азоту використовують у ракетній техніці як окислювач палива. Синильна кислота застосовується для одержання нітроакрилу і його похідних, виробництва штучного волокна типу "Нітрон" [1,2,6].

Швидкий розвиток технічного методу фіксації азоту повітря неможливий без глибоких наукових досліджень фізичних і хімічних властивостей азоту і його сполук. У хімічному відношенні азот при звичайних умовах – інертний двоатомний газ. Для того щоб  $N_2$  вступив у реакцію з іншими речовинами, необхідно прикласти велику кількість енергії (941,4 кДж/моль). Дослідження багатьох учених було спрямовано на руйнування потрібного зв'язку в молекулі азоту з утворенням атомарного азоту N, який легко вступає в реакцію з іншими сполуками.

Історія розвитку азотної промисловості бере свій початок у 1781 р., коли Г. Кавендіш відкрив явище утворення NO, NO<sub>2</sub> при пропусканні електричних розрядів через повітря. Після цього французька дослідниця Лефевр отримала перший патент на одержання оксидів азоту цим способом і виробництво з них нітратів і нітритів. Практичне впровадження для технічної реалізації цього методу з'явилося тільки наприкінці XIX ст. з появою можливості одержання дешевої електричної енергії з використанням гідравлічних станцій. Це були разючі результати наукової творчості вчених, коли з повітря та енергії отримували азотну кислоту, оксиди азоту, мінеральні добрива. За допомогою розробок науковців Бредлея, Ловджоя, К. Біркелянда, С. Ейде, О.І. Горбова, В.Ф. Міткевича та ін. у 1902–1909 рр. було розроблено промисловий дуговий метод фіксації атмосферного азоту. Головною проблемою цієї технології була конструкція печі, де під дією електричної дуги азот і кисень повітря перетворювались в NO при високій температурі близько 2500 К. Ці проблеми частково вирішили О.І. Горбов і В.Ф. Міткевич, які запропонували оригінальну конструкцію апарату з використанням воронкоподібної форми полум'я електричної дуги та швидке охолодження продуктів реакції у холодильнику, що дозволило одержати в газі після синтезу найбільшу концентрацію оксидів азоту – до 2,5 % [1–3, 7]. Теоретично при витраті 1 кВт·г енергії повинно одержуватись 2,5 кг HNO<sub>3</sub>, але фактичний вихід HNO<sub>3</sub> складав лише 55–80 г. Загальні витрати енергії на 1 т зв'язаного азоту за дуговим методом сягають 70 тис. кВт·г (252000 МДж) або при перерахунку на умовне паливо 64 т. Еквівалентні витрати енергії при зв'язуванні атмосферного азоту в NH<sub>3</sub> у 5–10 разів менше. Загальна кількість виробництва азотних добрив, одержаних із використанням електричної дуги у 1925 р., досягла майже 35 тис. т/рік у перерахунку на чистий азот і у зв'язку з появою більш екологічних технологій почала зменшуватись [156]. Дуговий спосіб у промисловому виробництві застосовувався до 1932 р., коли його замінив більш економічний спосіб – фіксація зв'язаного азоту через ціанамід кальцію CaCN<sub>2</sub> [1,7,9].

У 60–80-ті роки XX ст. учені Радянського Союзу провели всебічні, глибокі і цікаві дослідження з одержання оксидів азоту в електричних розрядах та низькотемпературній плазмі прямим окисненням азоту: М.І. Кобозев, Є.М. Єрьомін, С.С. Васильєв, К.М. Мочалов, Т.В. Заболоцький, М.І. Некрасов, Л.С. Полак, В.Д. Пархоменко, В.С. Щипачов, С.Н. Ганз, П.Г. Сорока, П.М. Цибульов та ін. [5,10,11]. Проведені наукові пошуки та екологічний аналіз показує, що при певних умовах економічного розвитку ці технології можуть бути конкурентоспроможними аміачному способу.

Разом із розробкою дугового методу фіксації атмосферного азоту проводились дослідження з фіксації зв'язаного азоту через ціанамід кальцію CaCN<sub>2</sub>, який був відкритий Г. Майєром ще в 1878 р. [1]. У 1895–1988 рр. А. Франк і Н. Каро досліджували нові способи одержання ціанідів для використання їх при вилученні золота й срібла з руди. При цьому вони встановили, що при високій температурі карбід барію поглинає азот з утворенням спочатку ціаніду, а потім ціанаміду барію. При цьому дослідники з'ясували, що технічний карбід кальцію також поглинає азот при 1300–1400 К з утворенням CaCN<sub>2</sub> [1,8]. А. Франк з'ясував, що при взаємодії ціанаміду кальцію з перегрі-

тою парою утворюється аміак, а у 1910 р. запропонував застосовувати  $\text{CaCN}_2$  як азотне добриво (хімічно чистий  $\text{CaCN}_2$  має 34,98, а технічний продукт – 18,6–22,8 % азоту) [1,6,8]. У 1905 р. перша промислова установка була побудована в Італії й метод фіксації атмосферного азоту через  $\text{CaCN}_2$  почав швидко поширюватись у всіх країнах. Уже в 1910 р. ціанамід кальцію за цією технологією був реалізований у промисловості в Німеччині, Італії, Канаді, Франції, Норвегії, Японії і загальна потужність складала 20 тис. т  $\text{CaCN}_2$  у рік, а через три роки виросла до 100 тис. т/рік і збільшилась кількість країн, котрі випускали ціанід кальцію (Швеція, Югославія, Швейцарія) [8,12]. Стрімкий розвиток виробництва  $\text{CaCN}_2$  пояснювався двома причинами: використання продукту для одержання  $\text{NH}_3$  і безпосереднє використання його в якості азотного добрива. Динаміка світового виробництва  $\text{CaCN}_2$  характеризується нерівномірністю його зростання. Так, якщо світове виробництво у 1932 р. становило всього 118 тис. т, то в наступні роки у зв'язку з розширенням його застосування в сільському господарстві виробництво  $\text{CaCN}_2$  знову збільшується й уже в 1938–1939 рр. потужності сягали 443 тис. т/рік (у перерахунку на азот) [12]. Метод фіксації атмосферного азоту через  $\text{CaCN}_2$  виявився в 3–4 рази більш економічним, ніж дуговий метод.

У СРСР виробництво  $\text{CaCN}_2$  почалось у роки першої п'ятирічки. У 1928–1932 рр. на Чернореченському й Караклиському хімічних заводах було побудовано більше 300 ціанамідних печей системи Франко-Каро. Але ці печі мали невелику потужність, працювали періодично, низький коефіцієнт використання початкової сировини та малу концентрацію зв'язаного азоту в кінцевому продукті. Тому в 1950–1952 рр. були створені нові конструкції печей на Кіровокаанському хімічному заводі, які відрізнялись геометричними й технологічними параметрами, мали високу потужність і кращі техніко-економічні показники [8,13]. На заводі було побудовано 110 печей нової конструкції, що дозволило повністю забезпечити потреби в  $\text{CaCN}_2$ .

Незважаючи на те, що класичний спосіб одержання  $\text{CaCN}_2$  на протязі майже століття залишався без змін, цей процес у теперішній час фізично й морально застарів. Створення нових виробництв на базі існуючого методу недоцільно як з економічних, так і технічних міркувань. У зв'язку з цим в останні десятиріччя йдуть пошуки більш економічних шляхів і методів одержання  $\text{CaCN}_2$  і його похідних. Так, цілком перспективним є комбінований метод виробництва аміаку, ціанаміду кальцію і вільного ціанаміду, а також способи з використанням низькотемпературної плазми. Тільки при розробці нової технології одержання  $\text{CaCN}_2$  та значному зменшенню енергетичних витрат, а також більш високим умістом зв'язаного азоту, його виробництво може розвиватися. При цьому  $\text{CaCN}_2$  може використовуватись в якості високоефективного азотного добрива для кислих ґрунтів [1,8].

Одними з найскладніших і найважливіших досліджень з історії розвитку прикладної хімії були дослідження з одержання  $\text{NH}_3$  з елементів  $\text{N}_2$  і  $\text{H}_2$  та його окиснення до оксидів азоту і  $\text{HNO}_3$ . Аміак на початку XIX ст. одержували в обмеженій кількості з різних сполук. З розвитком металургійного виробництва зростала потреба коксу, а при коксуванні вугілля під час обробки його високою температурою (1173–1373 К) у відсутності повітря утворювались кокс, рідкі продукти та коксовий газ, який уміщує до 4,0–4,3 кг  $\text{NH}_3$  на тону коксу [1,3,8]. Вилучення аміаку з коксового газу розпочалось у другій половині XIX ст. Абсолютна кількість  $\text{NH}_3$ , що одержували при коксуванні вугілля, зростала щорічно в залежності від розвитку чорної металургії. Наприклад, виробництво коксу в усьому світі становило біля 310 млн. т, при цьому було отримано 1,33 млн. т коксохімічного аміаку [8]. Але, незважаючи на стрімке зростання коксового виробництва, кількість отриманого  $\text{NH}_3$  разом із чилійською селітрою була дуже незначною для

задоволення потреб промисловості і сільського господарства азотними сполуками. У Росії лише з 1910 р. почали установлювати печі рекуперації продуктів коксування. У 1913 р. працювало 848 таких печей, котрі виробляли 1,273 млн. т коксу та 16,2 тис. т 25 %-ного розчину аміачної води, із якої було одержано 13,5 тис. т  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  і 1267 т  $\text{NH}_4\text{OH}$  [8,14]. Коксохімічний аміак і сьогодні використовують у промисловості, оскільки він має низьку собівартість, але його кількість у загальному об'ємі незначна і залежить від роботи металургійної промисловості.

З кінця XIX ст. розпочинаються пошуки шляхів одержання аміаку безпосередньо з азоту й водню. На протязі XIX ст. було проведено безліч досліджень у цьому напрямку, які виявились невдалими. Так, ще в 1839 р. Ф. Кюльман безуспішно намагався синтезувати  $\text{NH}_3$  з елементів методом пропускання  $\text{N}_2$  і  $\text{H}_2$  через розжарену губчасту платину. Багато вчених спостерігали утворення слідів  $\text{NH}_3$  при пропусканні електричного струму через суміш азоту й водню. Англійські хіміки В. Рамзай і С. Юнг у 1884–1886 рр. дослідили дисоціацію  $\text{NH}_3$  при високих температурах і атмосферному тиску і з'ясували, що при цих умовах і будь-якому часі перебування в реакційній зоні  $\text{NH}_3$  не розкладається повністю на елементи, що показувало на зворотність реакції. Вони зробили висновок, що синтез  $\text{NH}_3$  практично здійснити неможливо, оскільки при температурі нижче 1273 К взаємодії поміж  $\text{N}_2$  і  $\text{H}_2$  не спостерігається, а при більш високих температурах  $\text{NH}_3$  майже повністю дисоціює на елементи [1,8]. Наступні дослідження вчених А. Ле Шательє, Ф. Габера і В. Нернста доказали помилковість і неспроможність доказів попередників.

А. Ле Шательє першим звернув увагу на зворотність реакції синтезу  $\text{NH}_3$  і сприятливий вплив тиску на зміщення рівноваги реакції у бік підвищення концентрації  $\text{NH}_3$ . У 1901 р. він зробив спробу експериментально підтвердити перевірку свого принципу, але досліди було зупинено через вибух установки. Базуючись на проведених дослідах, А. Ле Шательє одержав патент на спосіб одержання  $\text{NH}_3$  методом вибуху суміші  $\text{H}_2$  і  $\text{N}_2$  повітря під тиском 10,1 МПа [8].

У 1903 р. розпочав дослідження реакції синтезу  $\text{NH}_3$  німецький учений Ф. Габер, виконуючи завдання промисловості. У 1904 р. він надрукував перше повідомлення щодо рівноваги синтезу  $\text{NH}_3$  при атмосферному тиску й температурах 973–1293 К [15]. Дещо пізніше В. Нернст розрахував за термодинамічними даними константи рівноваги цієї реакції [16], які суттєво відрізнялись від констант Ф. Габера. Тоді знову були проведені експериментальні дослідження рівноваги реакції В. Нернстом і Г. Іостом при 5,1–7,1 МПа і температурі 958–1313 К [17], а Ф. Габером і Р. Ле-Россіньолом – при 3,0 МПа і 834–1247 К, результати яких було опубліковано в 1908–1910 рр. [17]. Ф. Габер і В. Нернст у ці роки встановили точніші константи рівноваги реакції синтезу  $\text{NH}_3$ .

Ураховуючи принцип Ле Шательє про зміщення рівноваги під дією зовнішнього середовища, правило фаз Гіббса, яке вказує на необхідність врахування трьох ступенів свободи реакції синтезу  $\text{NH}_3$ , учені прийшли до висновку про необхідність проведення синтезу  $\text{NH}_3$  під високим тиском. Застосування високого тиску мало вирішальний вплив на рівновагу реакції й підвищення продуктивності установок. Спираючись на результати дослідження Ф. Габера, К. Боша, А. Мітташа та їх співробітників були з'ясовані оптимальні умови синтезу  $\text{NH}_3$  під тиском 20,2 МПа і температурі біля 823 К, запропонована замкнута циркуляційна система синтезу, відкрито активні каталізатори процесу, розроблено дослідний реактор, на якому в 1910 р. була доказана принципова ймовірність промислового виробництва синтезованого  $\text{NH}_3$ . У 1912 р. у Людвінгсгафені (Німеччина) була побудована і введена в дію дослідна промислова установка потужністю біля 1 т  $\text{NH}_3$  на добу. Перша промислова установка синтезу аміаку за методом Габе-

ра й Боша була запущена в 1913 р. в Оппау потужністю 25 т  $\text{NH}_3$  на добу. У кінці 20-х років виробництво було доведено до 400 т/добу. Другий великий завод синтезу  $\text{NH}_3$  був побудований у Мерзебурзі (1916 р.) потужністю 400 т/добу, а до кінця 20-х років була збільшена до 800–1000 т/добу [8].

До кінця Першої світової війни Німеччина залишалась єдиною країною, яка здійснила промислове виробництво синтезованого  $\text{NH}_3$  з елементів. Але широкі наукові пошуки вирішення цієї проблеми здійснювались у багатьох країнах із залученням відомих учених. Після закінчення війни ще більше розгорнулись дослідження з фіксації атмосферного азоту, у тому числі і в Росії. Але громадянська війна, інтервенція іноземних держав та зруйнована економіка затримали розвиток наукових досліджень і створення промислового виробництва аміаку.

### **Висновок**

Промисловий метод фіксації атмосферного азоту характеризується бурхливими темпами розвитку, одержанням мінеральних добрив із високим умістом азоту. Цей метод має важливе значення для розвитку хімічної промисловості, підвищення обороноздатності країни, задоволення побутових і харчових потреб населення. Промислове виробництво продуктів зв'язаного азоту безпосередньо залежало від участі держав світу у військових діях та війнах, тому що головним використанням сполук азоту було їх застосування для виробництва вибухівки, пороху, боєприпасів. Вирішення проблеми зв'язаного азоту для людства також вирішувало б проблему харчування, оскільки азотні добрива сприяють підвищенню урожайності сільськогосподарських рослин. Аналізуючи велику кількість публікацій та праць учених про розвиток виробництва сполук азоту, необхідно відзначити, що в 20-ті роки ХХ ст. ще не було системної та повної історії створення, становлення та розвитку технології зв'язаного азоту. Робились певні спроби різними авторами в цьому напрямку і тільки в теперішній час науковці мають можливість дати історичний аналіз технології окремих речовин.

Аналіз літературних джерел дозволяє дійти висновку, що не було обґрунтованої періодизації, яка б урахувала всі можливі взаємозв'язки і детальної історії технології зв'язаного азоту.

### **Література**

1. Атрощенко В.І. Проблема зв'язаного азоту. – К.: Знання, 1969.– 47 с.
2. Курс технологии связанного азота / Под ред. В.И. Атрощенко. – Химия. – 1969. – 384 с.
3. Жаворонков Н.М. Азот в природе и технике. Источники технического связанного азота. – М.: Правда, 1951. – 120 с.
4. Прянишников Д.Н. Азот в жизни растений и в земледелии СССР. – М.: Изд-во АН СССР, 1945.
5. Федоров М.В. Биологическая фиксация азота атмосферы. – М.: Сельхозиздат, 1948.
6. Ададуров И.Е. К теории Андруссова о каталитическом получении цианистой кислоты // Укр. хим. журнал.– 1936.– Т. 11, № 3.– С 237 – 249 с.
7. Лукьянов П.М. К истории фиксации атмосферного азота в России // Труды института истории естествознания и техники АН СССР. – 1958. – Т. 18. – С. 385.
8. Развитие химической промышленности в СССР (1917 – 1980). Т.2. Развитие отдельных отраслей химической промышленности. – М.: Наука, 1984. – 400 с.

9. Технология связанного азота / В.И.Атрощенко, А.М.Алексеев, А.П.Засорин, И.П.Кирилов, В.И.Конвисар, А.Р.Ястребенецкий. – Х.: Изд-во ХГУ. – 1962. – 322 с.
10. Краснокутский Ю.И., Ганз С.Н., Пархоменко В.Д. // ЖПХ. 1973. – 46, № 11. – С. 4425–4428.
11. Ганз С.Н., Пархоменко В.Д. Получение связанного азота в плазме. – К.: Вища школа. – 1976. – 192 с.
12. Кредов А.Е. Кальцийцианамид и продукты его переработки. – М.: ОНТИ, 1943. – 80 с.
13. Казарян П.Е. Исследование процесса получения цианамид кальция в печах системы Франка-Каро / Промышленность Армении, 1961, № 8. – С. 43–47.
14. Тер-Газарян Г.Г. Фиксация атмосферного азота. Тифлис: Госплан ЗСФСР, 1926. – 155 с.
15. Haber F. // Ztschr. anorg. Chem., 1904, Bd. 43, S.111; 1905, Bd. 44, S. 341.
16. Nernst W. // Ztschr. Electrochem., 1907, Bd. 13, S. 521.
17. Haber F., Le-Rossignal R. // Ztschr. Electrochem., 1908, Bd. 14, S. 181, 513; Ber., 1910, Bd. 40, S. 2144; Ztschr. Electrochem., 1913, Bd. 19, S. 53.

## Bibliography (transliterated)

1. Atroschenko V.I. Problema zv'yazanogo azotu. – K.: Znannya, 1969.– 47 p.
2. Kurs tehnologii svyazannogo azota / Pod red. V.I. Atroschenko. – Himiya. – 1969. – 384 s.
3. Zhavoronkov N.M. Azot v prirode i tehnike. Istochniki tehniceskogo svyazanogo azota. – M.: Pravda, 1951. – 120 p.
4. Pryanishnikov D.N. Azot v zhizni rasteniy i v zemledelii SSSR. – M.: Izd-vo AN SSSR, 1945.
5. Fedorov M.V. Biologicheskaya fiksatsiya azota atmosferyi. – M.: Selhozizdat, 1948.
6. Adadurov I.E. K teorii Andrussova o kataliticheskom poluchenii tsianistoy kislotyi Ukr. him. zhurnal.– 1936.– T. 11, # 3.– p 237 – 249 p.
7. Lukyanov P.M. K istorii fiksatsii atmosfernogo azota v Rossii Trudyi instituta istorii estestvoznaniya i tehniki AN SSSR. – 1958. – T. 18. – p. 385.
8. Razvitie himicheskoy promyishlennosti v SSSR (1917 – 1980). T.2. Razvitie otdelnyih otrasley himicheskoy promyishlennosti. – M.: Nauka, 1984. – 400 p.
9. Tehnologiya svyazannogo azota V.I.Atroschenko, A.M.Alekseev, A.P.Zasorin, I.P.Kirilov, V.I.Konvisar, A.R.Yastrebenetskiy. – H.: Izd-vo HGU. – 1962. – 322 p.
10. Krasnokutskiy Yu.I., Ganz S.N., Parhomenko V.D. ZhPH. 1973. – 46, # 11. – p. 4425–4428.
11. Ganz S.N., Parhomenko V.D. Poluchenie svyazannogo azota v plazme. – K.: Vischa shkola. – 1976. – 192 p.
12. Kredov A.E. Kaltsiytsianamid i produkty ego pererabotki. – M.: ONTI, 1943. – 80 p.
13. Kazaryan P.E. Issledovanie protsessa polucheniya tsianamida kaltsiya v pechah sistemyi Franka-Karo Promyishlennost Armenii, 1961, # 8. – p. 43–47.
14. Ter-Gazaryan G.G. Fiksatsiya atmosfernogo azota. Tiflis: Gosplan ZSFSR, 1926. – 155 p.
15. Haber F. Ztschr. anorg. Chem., 1904, Bd. 43, S.111; 1905, Bd. 44, S. 341.
16. Nernst W. Ztschr. Electrochem., 1907, Bd. 13, S. 521.

17. Haber F., Le-Rossignal R. Ztschr. Electrochem., 1908, Bd. 14, S. 181, 513; Ber., 1910, Bd. 40, S. 2144; Ztschr. Electrochem., 1913, Bd. 19, S. 53.

УДК 661.665

Гринь С.А., Кузнецов П.В., Казаков В.В.

**РАЗРАБОТКИ УЧЕНЫХ О ФИКСАЦИИ АТМОСФЕРНОГО АЗОТА  
В 20-е ГОДЫ XX ВЕКА**

Сделана оценка поиска ученых первых путей фиксации атмосферного азота. Показано, что экономичность способа синтеза аммиака из элементов позволила в начале 20-ых годов XX века занять основное место в азотной промышленности и получать в необходимом количестве химические азотные вещества.