

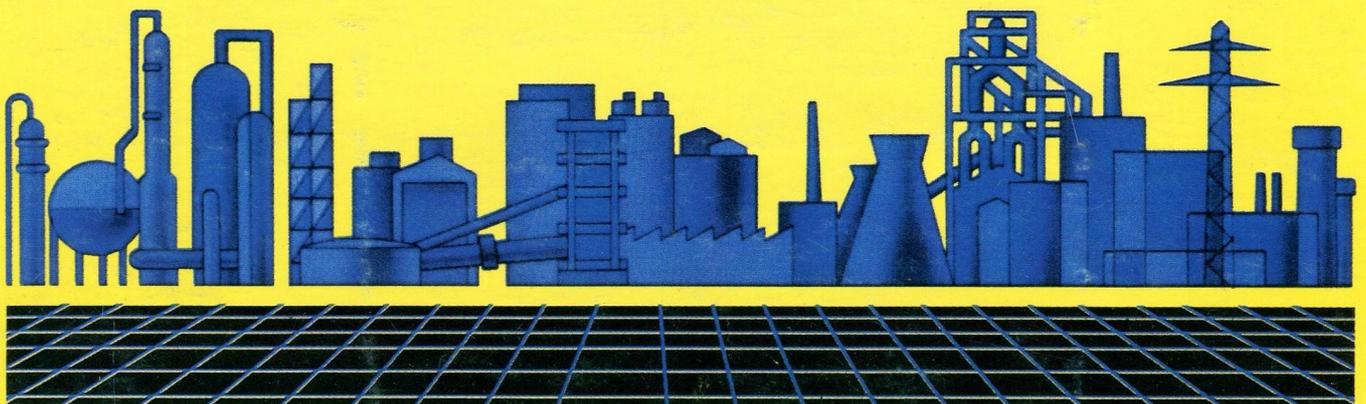
ISSN 2078-5364

# ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ЩОКВАРТАЛЬНИЙ НАУКОВО-ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ



## 4`2015



### **ЕНЕРГЕТИКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

- Канюк Г. И., Андреев А. В., Мезеря А. Ю., Князева В. Н.*  
Анализ резервов энергосбережения при управлении насосными агрегатами нефтеперекачивающих станций Украины. 3
- Селихов Ю. А. Коцаренко В. А. Горбунов К. А. Горбунова О. В.*  
Оптимизация работы солнечной установки для горячего водоснабжения и отопления зданий. 15

### **МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ**

- Александрова Т. Е., Лазаренко А. А.*  
Параметрический синтез цифровой инвариантной системы стабилизации подвижного объекта. 21
- Перевертайленко А. Ю., Товажнянский Л. Л., Болдырев С. А., Крайчич Г., Капустенко П. А., Арсеньева О. П., Арсеньев П. Ю.*  
Сравнение каналов компактных теплообменных аппаратов для утилизации низкопотенциального тепла промышленных предприятий. 27
- Демирский А. В., Илюнин О. О., Перевертайленко А. Ю., Селяков А. М., Шамраев А. А., Чайников С. И., Илюнин А. В.*  
Нечеткая интерполяция концентрации компонентов технологических растворов. 35
- Дорофеев Ю. И.*  
Задачи и методы ограниченного робастного управления запасами в сетях поставок в условиях неопределенности. 42
- Чуняев О. М., Биков А. О.*  
Можливість виникнення стаціонарного фронту карбідотворення на поверхні залізвуглецевих сплавів при дифузійному легуванні. 62
- Бобух А. А., Дзевочко А. М., Подустов М. А., Переверзева А. Н., Романенко Р. С.*  
Выбор и оптимизация критерия управления объектом абсорбции-десорбции производства кальцинированной соды. 72

### **ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**

- Анилко О. Б., Сиренко С. Н., Ковтонюк И. Б.*  
Применение беспилотных летательных аппаратов в боевой информационно-управляющей системе бронетанковой техники. 82
- Шейна З. В., Голубенко В. П., Мусиенко О. В.*  
Расчет показателей разработки месторождения на завершающей стадии эксплуатации. 88

<i>Масалітіна Н. Ю., Савенков А. С.</i> Термічне розкладання прекурсорів в технології складних каталізаторів окиснення амоніаку до N <sub>2</sub> O.	94
<i>Огурцов А. Н., Близнюк О. Н., Клещев Н. Ф.</i> Радиационная технология модификации функциональных покрытий. Масс-спектрометрический анализ процессов фотодиссоциации в молекулярных плёнках NH <sub>3</sub> и H <sub>2</sub> O.	102
<i>Романов М. С., Романова З. М., Березка Т. О., Плахотна Ю. М.</i> Дослідження процесів фільтрування пива.	109
<i>Татарьянц М. С., Завинский С. И., Трошин А. Г., Михайличенко В. П.</i> Теоретическое исследование движения композитного сырья через дроссельно-перемешивающий элемент.	115
<b>СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ</b>	
<i>Решетило Е. И., Зорькин М. Е.</i> Создание перспективной боевой машины класса БТР, БМП.	125
<i>Селихов Ю. А., Коцаренко В. А., Горбунов К. А., Горбунова О. В.</i> Оценочный расчет возможности использования системы солнечных коллекторов как альтернативного источника энергии.	134
<i>Павленко А. М., Усенко Б. О., Кошлак Г. В.</i> Теплофізичні особливості отримання об'ємних аморфних структур.	139
Сторінка редколегії	147

УДК 681.513

Канюк Г.И., Андреев А.В., Мезеря А.Ю., Князева В.Н.

### АНАЛИЗ РЕЗЕРВОВ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРИ УПРАВЛЕНИИ НАСОСНЫМИ АГРЕГАТАМИ НЕФТЕПЕРЕКАЧИВАЮЩИХ СТАНЦИЙ УКРАИНЫ

**Введение.** Доля нефти и газа в энергетическом балансе промышленно развитых стран составляет 75–80 %. Несмотря на большие усилия по использованию нетрадиционных, возобновляемых источников такое положение сохранится в ближайшие десятилетия [1].

Необходимость транспорта огромных количеств нефти и газа привело к бурному развитию трубопроводного транспорта как наиболее экономически эффективного.

Украина является крупным транзитером газа и нефти. Газотранспортная система Украины (вторая по мощности в Европе) имеет протяженность только магистральных трубопроводов более 20 тыс. км. Пропускная способность газотранспортной системы Украины составляет на входе более 280 млрд. м<sup>3</sup>/год, на выходе около 180 млрд. м<sup>3</sup>/год. Общее количество компрессорных станций равно 72 (110 компрессорных цехов). Количество газоперекачивающих агрегатов более 700. Мощность компрессорных станций более 5400 МВт (для сравнения мощность крупнейшей в Европе Запорожской АЭС равна 6000 МВт). Количество подземных хранилищ газа (ПХГ) равно 12, общей активной емкостью 30 млрд. м<sup>3</sup> газа. Количество газораспределительных станций более 1400. Газоперекачивающие агрегаты используют в качестве привода электродвигатели и газотурбинные установки.

Система магистральных нефтепроводов Украины включает 19 нефтепроводов диаметром до 1220 мм общей длиной около 4800 км, 51 нефтеперекачивающую станцию (НПС), работу которых обеспечивают 176 насосных агрегатов, единичной производительностью до 12500 м<sup>3</sup>/час. Суммарная электрическая мощность электроприводов составляет около 360 тыс. кВт. Пропускная способность системы равна 114 млн. т/год (на входе) и более 56 млн. т/год на выходе.

Общая номинальная емкость одиннадцати резервуарных парков системы магистральных нефтепроводов более 1000 тыс. кубометров.

В состав системы входит также морской нефтяной терминал Южный, предназначенный для приема, отгрузки и транспортировки нефти магистральными трубопроводами Украины. Мощность терминала 14,5 млн., с возможностью расширения до 45 млн. Девайт танкеров до 150 тыс. т. Емкость резервуарного парка терминала 200 тыс. кубометров.

Приведенные сведения показывают масштабность и актуальность задачи энергосбережения на объектах магистральной транспортировки нефти и газа в Украине.

Магистральные трубопроводы проектируются таким образом, что заданное проектом значение их производительности обеспечивается насосными (для нефти и нефтепродуктов) или компрессорными (для газа) станциями. При этом предусматривается работа перекачивающих агрегатов станций на номинальных режимах, соответствующих номинальной частоте вращения их роторов и максимальному КПД.

На практике нефте- и газопроводы никогда не работают только на одном режиме с максимальной (определенной проектом) производительностью. Из-за неравномерности поставок нефти и газа добывающими компаниями, изменения грузопотоков, вывода

в ремонт части перекачивающих агрегатов, устранения дефектов на линейной части и т.п. работа трубопроводов происходит на режимах с различной производительностью, часто значительно меньшей проектной. В таких случаях составляются карты технологических режимов (КТР) работы технологического участка трубопровода, состоящего обычно из нескольких перекачивающих станций, каждая из которых имеет несколько последовательно соединённых нагнетателей.

В КТР приводятся все возможные режимы перекачки и их параметры: производительность трубопровода, количество используемых магистральных насосов (МН), давление на входе, выходе и коллекторе (перед регулятором давления), удельное потребление энергии и др.

Кроме КТР на работающих магистральных трубопроводах ведутся карты. Сведения о соблюдении режимов (КСР), в которых регистрируются использованные режимы из КТР, их технические параметры, учитываются время работы на каждом режиме и др. Ниже рассматриваются задачи энергосбережения при работе магистральных нефтепроводов.

КТР и КСР магистральных нефтепроводов содержат сотни режимов. В режимах с меньшей по сравнению с проектной производительностью нефтепровода предусматривают, в частности, уменьшение числа работающих насосов [1, 2]. При этом магистральные насосы (МН) работают не в оптимальном режиме, их КПД снижается по сравнению с номинальным [3]:

$$\eta = \eta_{\text{ном}} - (1 - q)^2 \eta_{\text{ном}} \quad (1)$$

Здесь  $\eta_{\text{ном}}$  – номинальный КПД насоса,  $q = Q/Q_{\text{ном}}$ ,  $Q$  – заданная КТР производительность трубопровода,  $Q_{\text{ном}}$  – номинальная подача насоса.

Если подборкой количества работающих насосов не удается обеспечить заданную производительность нефтепровода, а также для выполнения ограничений по напорам и подпорам, на выходе насосоперекачивающей станции (НПС) устанавливаются регуляторы давления (дрессели). Дресселирование приводит к уменьшению производительности трубопровода  $Q$  и, следовательно, к снижению в соответствии с (1) КПД МН. Кроме того происходят потери мощности на дресселирование [3]:

$$\Delta N_{\text{др}} = \Delta P_{\text{др}} \cdot Q, \quad (2)$$

где  $\Delta P_{\text{др}} = \rho g \Delta h_{\text{др}}$  – потери давления (напора) на дресселе.

Исключить дресселирование, как источник дополнительных энергозатрат, в определенной мере позволяет регулирование работы технологического участка методом циклической перекачки, при котором трубопровод последовательно (циклически) работает с разным количеством насосов [2, 4, 5]. Заданная КТР производительность трубопровода обеспечивается циклической работой на двух дискретных режимах с производительностями  $Q_1$  и  $Q_2$ . К недостаткам такого метода относятся потери электроэнергии на переключения электродвигателей насосов при изменениях режима перекачки, невозможность обеспечить высокий КПД насосов в обоих режимах.

В принципе возможно, но применяется крайне редко, регулирование режимом перекачки перепуском части подачи насоса из напорного трубопровода во всасывающий по обводному трубопроводу (байпас), на котором установлена регулирующая задвижка. Такой способ регулирования подачи насоса малоэффективен, т.к. потери мощности при вводе на регулирование значительны и превосходят потери при дресселировании.

Использование для уменьшения производительности трубопровода сменных роторов насосов с уменьшенным диаметром рабочего колеса чрезвычайно трудоемко и затратно.

Перечисленные способы управления режимами перекачки основаны, таким образом, на изменениях напорно-расходных характеристик трубопровода и совместно работающих насосов при отклонениях от номинальных (проектных) параметров системы в принципе не могут обеспечить оптимальные показатели работы – максимальный КПД и минимум энергозатрат на перекачку.

Известно, что наиболее эффективным с точки зрения энергозатрат способом регулирования подачи насосов является регулирование изменением частоты их вращения. Длительное время применение этого способа регулирования крупных насосов, турбокомпрессоров и вентиляторов затруднялось отсутствием эффективных приводов с регулируемой частотой их вращения. Использование с этой целью между валами двигателя и приводной машины механического вариатора или гидравлической муфты затруднялось их высокой стоимостью и ограниченной глубиной регулирования. Так КПД гидромуфты снижается пропорционально частоте вращения вала насоса.

Положение существенно изменилось с появлением на рынке частотно-регулируемого электропривода (ЧРП). В промышленно развитых странах частотно-регулируемые приводы используются более 30 лет [6].

В настоящее время освоено производство мощных высоковольтных частотно-регулируемых электроприводов (ВЧРП) в достаточно широком диапазоне мощностей, удовлетворяющем параметрам нефтяных магистральных насосов.

Снижение энергозатрат при использовании ЧРП для привода нефтяных насосов может происходить за счет больших значений КПД насосов и электродвигателей [5], а также за счет исключения дросселирования излишков напора в регуляторах давления НПС [3].

На рис. 1 приведены  $\eta$ - $Q$  характеристики магистрального нефтяного насоса НМ 3600-230 при различных частотах вращения. Для построения графиков  $\eta$ - $Q$  характеристики использовалась формула [7]:

$$\eta_{\text{нас.}} = \eta_{\text{нас.м}} - \left( Q - Q_{\text{м}} \frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^2 \frac{\eta_{\text{нас.м}}}{Q_{\text{м}}^2} \left( \frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^2, \quad (3)$$

где  $\eta_{\text{нас.м}}$  – максимальное значение КПД;  $Q_{\text{м}}$  – подача насоса, соответствующая максимальному КПД;  $n$  – частота вращения;  $n_{\text{ном}}$  – номинальная частота вращения.

Как видно из графиков рис. 1 максимальные значения КПД с уменьшением частоты вращения смещаются в область меньших подач, так что в результате снижаются потери мощности и энергозатраты по сравнению с методом подбора количества работающих насосов или методом циклической перекачки. Вместе с тем следует отметить, что формула (3) не отражает того известного факта, что максимальное значение КПД на пониженных подачах насоса несколько ниже номинального КПД [6].

Снижение энергозатрат за счет исключения дросселирования излишков напора в регуляторах давления НПС снижением частоты вращения показано на рис. 2, на котором характеристики  $H$ - $Q$  насоса НМ 3600-230 при частотах вращения его ротора, отличных от номинальной, построены по известным формулам подобия:

$$Q_1/Q_2 = n_1/n_2 \text{ и } H_1/H_2 = (n_1/n_2)^2.$$

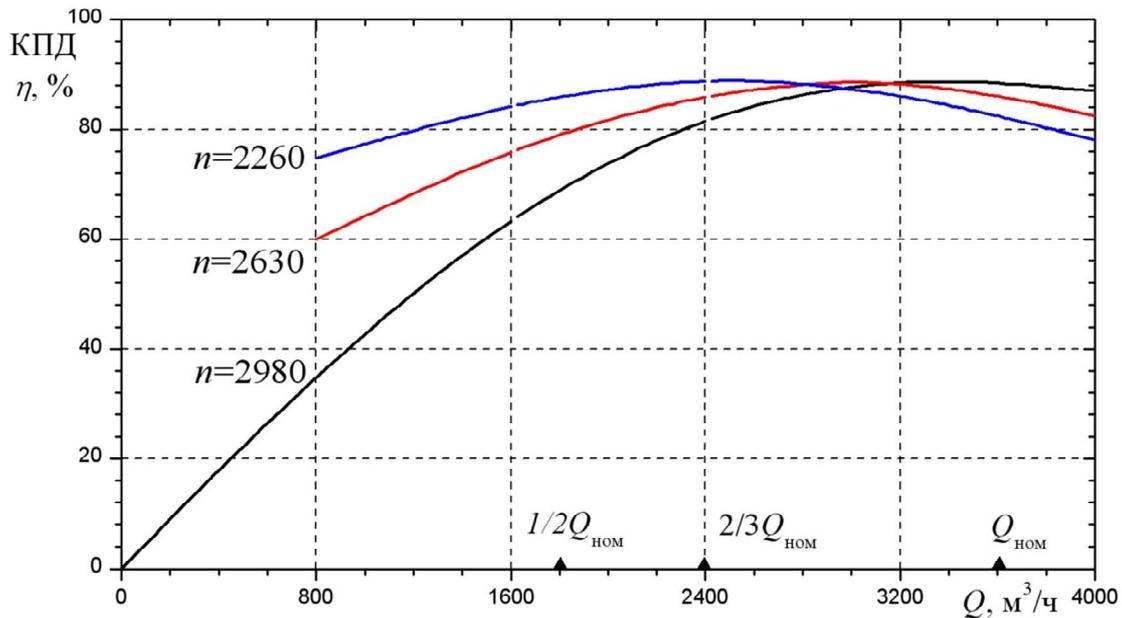


Рисунок 1 – Характеристики  $\eta$ - $Q$  магистрального нефтяного насоса НМ 3600-230 при различных частотах вращения

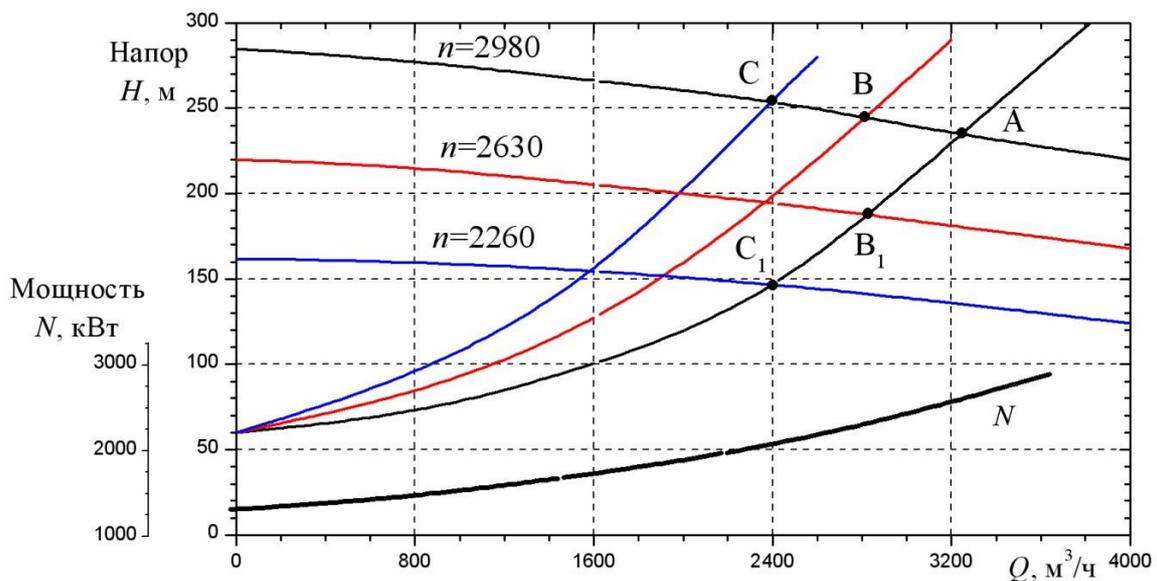


Рисунок 2 – Характеристики  $H$ - $Q$  магистрального нефтяного насоса НМ 3600-230 при различных частотах вращения, характеристика  $N$ - $Q$  при номинальной частоте вращения

На рис. 2 показаны также для примера характеристики сетей  $H_c = H_{ст} + K \cdot Q^2$ , рабочие точки  $A, B$  и  $C$ , соответствующие регулированию подачи насоса дросселированием, рабочие точки  $B_1, C_1$  – при регулировании подачи насоса изменением частоты вращения. Нетрудно видеть, что потери напора на дросселях  $\Delta h_B$  (отрезок  $B-B_1$ ) и  $\Delta h_C$  (отрезок  $C-C_1$ ) устраняются при частотном регулировании и, следовательно, устраняются (см. формулу 2) затраты мощности на их поддержание при дроссельном регулировании. Уменьшается также потребляемая мощность привода за счет уменьшения частоты его вращения и повышения КПД (рис. 1).

Резюмируя изложенное, можно констатировать, что для управления сложной системой транспортировки нефти по магистральным трубопроводам при уменьшении производительности перекачки в арсенале управляющих воздействий на систему имеются в наличии следующие:

- уменьшение числа работающих насосов;
- использование циклической перекачки;
- дросселирование, байпасирование;
- применение ЧРП насосов.

В последние несколько лет появилось большое количество публикаций, посвященных методам оптимизации работы магистральных нефтепроводов с использованием ЧРП магистральных насосов [4, 7, 8–11].

Общепринятым является применение в качестве энергетического критерия оптимизации минимума удельных затрат электроэнергии, т.е. затрат на перекачку 1 т нефти (чаще в стоимостном выражении), за определенный период времени.

Энергетические критерии оптимизации включают в свой состав экстремум целевой функции.

При ЧРП МН алгоритм оптимизации и вид целевой функции усложняются, по сравнению с нерегулируемыми МН, из-за необходимости учета влияния изменения частоты вращения на вид целевой функции, а также на ряд технологических ограничений, таких как: допустимые давления, напоры и подпоры, ограничения по КПД электродвигателей и МН, на допустимые частоты вращения МН и др.

Задача усложняется еще и тем, что переменные зависят друг от друга, так как скорости вращения разных МН одного технологического участка связаны уравнением баланса напоров, отражающим равенство напора, развиваемого всеми работающими насосами участка и напора, потребляемого трубопроводом.

Уравнение баланса напоров для технологического участка:

$$H_n + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{n_{mi}} H_{Mik} = \sum_{i=1}^n (h_{\tau i} + h_{mi} + \Delta h_{др.i} + \Delta z_i) + h_{ост}, \quad (4)$$

где  $H_n$  – напор, развиваемый подпорными насосами;  $n$  – число линейных участков (количество работающих НПС);  $n_{mi}$  – число работающих МН (в том числе с ЧРП), установленных на  $i$ -той НПС;  $H_{Mik}$  – напор, развиваемый  $k$ -тым МН на  $i$ -той НПС;  $h_{\tau i}$  – потери напора на трение на  $i$ -том линейном участке трубопровода;  $h_{mi}$  – потери в местных сопротивлениях  $i$ -того линейного участка;  $\Delta h_{др.i}$  – потери напора на регуляторе давления  $i$ -той НПС;  $\Delta z_i$  – разность геодезических отметок на  $i$ -том линейном участке;  $h_{ост}$  – остаточный напор в конце технологического участка.

В уравнении (4)  $h_{\tau i}$  определяются по формуле Дарси-Вейсбаха (5) или по обобщенной формуле Лейбензона (6):

$$h_{\tau} = \lambda \frac{L}{D} \cdot \frac{w^2}{zg}; \quad (5)$$

$$h_{\tau} = \beta \frac{v^m \cdot Q^{z-m}}{D^{5-m}}, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – коэффициент потерь на трение, зависящий от режима течения и относительной шероховатости внутренней поверхности трубопровода, вычисляется по известным формулам: Стокса  $\lambda=64/Re$  – для ламинарного режима течения; Блазиуса  $\lambda=0,3164/Re^{0,25}$  – для гидравлически гладких труб; Альтшуля  $\lambda=0,11 [(68/Re)+(k_s/D)]^{0,25}$  – универсальная формула турбулентного режима течения.

$L$  и  $D$  – длина и внутренний диаметр трубопровода;  $w$  – средняя скорость течения;  $Q$  – объемная производительность трубопровода;  $Re=wD/\nu$  – число Рейнольдса;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости;  $k_s$  – эквивалентная шероховатость;  $\beta$  и  $m$  – коэффициенты, зависящие от режима течения (численные значения приведены в [2]).

В работе [8] предлагается целевая функция, учитывающая изложенные подходы и ограничения:

$$F(M, H) = \sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_i \cdot \rho g H_i n_{Mi} c \cdot t_i}{\eta_i \cdot \eta_{пч} \cdot \eta_{эдв}} \right) \rightarrow \min, \quad (7)$$

где  $M$  – множество переменных, учитывающее количество работающих МН (в том числе ЧРП);  $H$  – множество переменных, учитывающее напоры, развиваемые МН;  $Q_i$  – заданная производительность перекачки;  $\rho$  – плотность перекачиваемой нефти;  $H_i$  – напор насосного агрегата на  $i$ -той НПС;  $C$  – тариф на электроэнергию;  $t_i$  – время работы нефтепровода в заданном режиме перекачки;  $\eta_i$  – КПД МН, причем  $\eta_i=f(H_i)$  – для МН с ЧРП зависят от частоты вращения;  $\eta_{пч}$  – КПД ЧРП;  $\eta_{эдв}$  – КПД электродвигателя.

Представляется целесообразным до нахождения минимума целевой функции разработать карты технологических режимов (КТР) для заданных производительностей трубопровода, т.е. установить необходимое количество НПС и работающих насосных агрегатов. Методики и программы расчета на ЭВМ рациональных режимов перекачки для формирования КТР разработаны и достаточно широко применяются [2]. Авторы работы [8] для поиска минимума целевой функции в такой постановке задачи предлагают использовать известный симплекс-метод (метод направленного перебора). Рекомендуются и другие методики [4, 7, 9, 10].

Таким образом, оптимизация режима работы магистрального нефтепровода, целью которой является обеспечение заданной производительностью перекачки при соблюдении критерия оптимизации, сводится к разработке алгоритма управления частотами вращения всех МН с ЧРП, иными словами к разработке системы энергосберегающего автоматизированного управления процессом транспортировки в целом.

Авторами разработана автоматизированная система энергосберегающего управления насосными установками электростанций [12].

В качестве регулируемых входных ( $x_{вх}$ ) параметров система включает положение (перемещение), регулирующей задвижки ( $x_{рз}$ ) и частоту вращения  $n$  ротора нагнетателя. Эти параметры могут целенаправленно изменяться исполнительными механизмами АСУ в соответствии с алгоритмами, формируемыми регулятором АСУ.

Вектор выходных параметров ( $x_{вых}$ ) включает значения давления ( $P$ ) и подачи ( $Q$ ), создаваемых нагнетателем, полезную ( $N$ ) и потребляемую ( $N$ ) мощности и КПД ( $\eta$ ) насоса.

Вектор внутренних ( $x_{вн}$ ) параметров включает характеристики агрегата и сопряженной с ними гидравлической сети.

Вектор внешних возмущающих воздействий ( $\xi$ ) учитывает изменения температуры перекачиваемой жидкости и связанное с этими изменение ее физических свойств (главным образом вязкости).

В результате такого подхода авторами работы [12] построены: математическая модель управления насосом  $x_{\text{вых}} = f_{\text{вых}}(x_{\text{рз}}, n; x_{\text{вн}}, \xi)$ ; модель (функция) энергетических потерь  $x_{\text{пот}} = f_{\text{пот}}(x_{\text{рз}}, n; x_{\text{вн}}, \xi)$ ; модель (функция) управляющего воздействия  $x_{\text{вх}} = f_{\text{вх}}(x_{\text{вых}}, x_{\text{вн}}, x_{\text{пот}}, \xi)$  и модель управления:

$$Q_H^z \frac{\rho}{2} \left[ \left( \lambda \frac{L}{D} + \sum \zeta_M \right) / S^z + \xi_{\text{рз}} / S_{\text{рз}}^z \right] = P_H / [\rho g h_T + (P_1 - P_0)] \quad (8)$$

где  $S$  – площадь сечения трубопровода;  $S_{\text{рз}}$  – площадь проходного сечения регулирующей задвижки, зависит от ее перемещения  $x_{\text{рз}}$ ;  $h_T$  – геометрическая высота подъема жидкости;  $P_1$  и  $P_0$  – давления в напорном и всасывающем резервуарах; обозначения других величин, входящих в (7) приведены выше.

Решая уравнение (8) относительно  $P$ , имеем:

$$P = C_1 + Q^2 \left( C_2 + C_3 / \left( S_{\text{рз}} (x_{\text{рз}})^2 \right) \right) \quad (9)$$

где  $C_1 = [\rho g h_T + (P_1 - P_0)]$ ,  $C_2 = \frac{\rho}{z} \left( \lambda \frac{L}{D} + \sum \zeta_M \right) / S^2$ ,  $C_3 = \frac{\rho}{2} \xi_{\text{рз}}$ .

Частоту вращения насоса предлагается определять так:

$$n = C_4 (C_5 \cdot P)^{0,75} \cdot Q^{0,5}, \quad (10)$$

где

$$C_4 = (Hg / \bar{H})^{0,75}, \quad C_5 = (\rho \bar{H})^{-1},$$

$\bar{H}$  – коэффициент напора.

Уравнения (9) и (10) устанавливают зависимости между основными параметрами насосной установки – давлением  $P$ , подачей  $Q$ , параметрами управляющих воздействий – частотой вращения насоса  $n$  и положением регулирующей задвижки  $x_{\text{рз}}$ . Таким образом уравнения (9) и (10) представляют собой модель уравнения.

В работе [12] приводится также функция энергетических потерь (потерь мощности), учитывающая зависимость подачи насоса от двух регулируемых параметров – частоты вращения  $n$  и положения регулирующей задвижки. Учитываются также полный, объемный и механический КПД, которые являются функциями выходных параметров насоса  $Q$  и  $P$  и одного из управляющих воздействий – частоты вращения.

Экспериментальные исследования выполнены на Змиевской ТЭС, объектом исследований являются циркуляционные насосы с установленной мощностью электродвигателей 1700 кВт. Ожидаемый экономический эффект от внедрения автоматизированной системы энергосберегающего управления одним циркуляционным насосом мо-

жет составлять около 200–500 тыс.грн/год и зависит от режима работы циркуляционных насосов и энергоблоков ТЭС

Результаты исследований на Змиевской ТЭС в значительной степени могут быть использованы при разработках аналогичных систем для управления насосами нефтепроводов.

Оптимизация режима работы нефтепровода в значительной степени зависит от учета физических свойств перекачиваемой нефти, в первую очередь ее вязкости.

Характеристики магистральных центробежных насосов, приводимые в их паспортах или каталогах, получены в результате испытаний насосов на воде. При перекачке нефти характеристики насосов могут существенно отличаться от паспортных, поэтому осуществляется их пересчет.

Наиболее чувствительны к изменению вязкости перекачиваемой нефти характеристики  $\eta-Q$ . Изменение состава, а также сезонные и суточные колебания температуры нефти в процессе перекачки существенно изменяют КПД насоса. Условия необходимости пересчета характеристики  $\eta-Q$  с воды на нефть [13]:

$$Re_n < Re_{гр}; \quad (11)$$

$$Re_n = \frac{n \cdot D_2^2}{\nu}, \quad Re_{гр} = 0,316 \cdot 10^5 \cdot n_s^{-0,305}, \quad (12)$$

где  $n$  – частота вращения ротора насоса;  $D_2$  – наружный диаметр рабочего колеса;  $\nu$  – кинематическая вязкость;  $n_s$  – коэффициент быстроходности;  $Re_n$  – число Рейнольдса в насосе;  $Re_{гр}$  – граничное число Рейнольдса.

Коэффициент пересчета  $k_\eta$  [13]:

$$k_\eta = 1 - \alpha_\eta \cdot I_g (Re_{гр} / Re_n); \quad (13)$$

$$\alpha_\eta = 1,33 \cdot n_s^{-0,326}. \quad (14)$$

На рис. 3 приведены характеристики  $\eta-Q$  магистрального нефтяного насоса НМ 3600-230 при различных вязкостях нефти. Пунктирной линией обозначены точки, соответствующие максимальным КПД, величина которого падает с увеличением вязкости с 0,88 (для воды) до 0,72 (для нефти  $\nu=40$ сСт).

На рис. 4 показаны зависимости вязкости от температуры для трех различных марок нефти, построенные по формуле Филонова-Рейнольдса [2]:

$$\nu_T = \nu_1 \cdot \exp[-u \cdot (T - T_1)]; \quad (15)$$

$$u = \frac{1}{T_2 - T_1} \cdot \ln \frac{\nu_1}{\nu_2}, \quad (16)$$

где  $u$  – коэффициент крутизны вискограммы, 1/К.

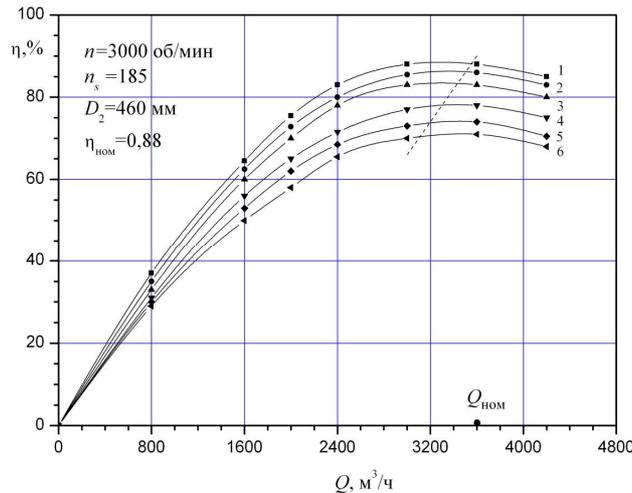


Рисунок 3 – Характеристика  $\eta-Q$  магистрального нефтяного насоса НМ 3600-230 (различные маркеры соответствуют различным значениям вязкости нефти)

- 1 –  $\nu=0,01 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$ ;  $Re_H=1,06 \cdot 10^6$ ; 2 –  $\nu=0,05 \cdot 10^{-4}$ ;  $Re_H=0,32 \cdot 10^6$ ;
- 3 –  $\nu=0,01 \cdot 10^{-4}$ ;  $Re_H=0,16 \cdot 10^6$ ; 4 –  $\nu=0,20 \cdot 10^{-4}$ ;  $Re_H=0,08 \cdot 10^6$ ;
- 5 –  $\nu=0,030 \cdot 10^{-4}$ ;  $Re_H=0,05 \cdot 10^6$ ; 6 –  $\nu=0,40 \cdot 10^{-4}$ ;  $Re_H=0,03 \cdot 10^6$

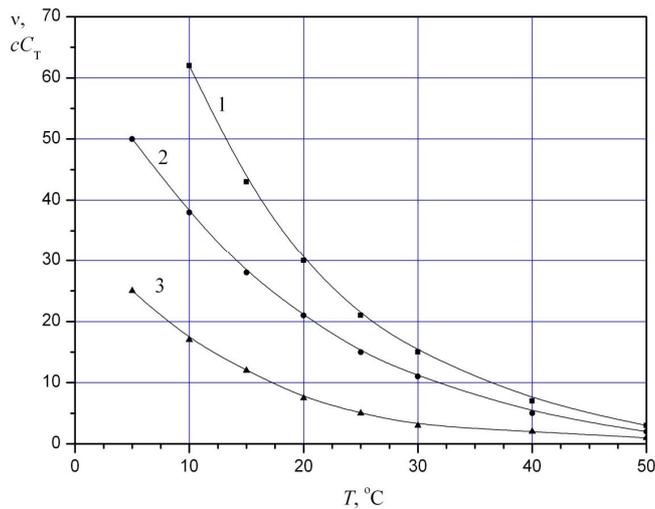


Рисунок 4 – Зависимость кинематической вязкости нефти от температуры (различные маркеры соответствуют различным маркам нефти)

- 1 – нефть  $\nu_{20}=30 \text{ сСт}$ ,  $\nu_{50}=3,5 \text{ сСт}$ ; 2 – нефть  $\nu_{20}=21 \text{ сСт}$ ,  $\nu_{50}=3,6 \text{ сСт}$ ;
- 3 – нефть  $\nu_{20}=7,5 \text{ сСт}$ ,  $\nu_{50}=1,7 \text{ сСт}$

Для нефти – 2 уменьшение температуры с  $20^{\circ}\text{C}$  до  $15^{\circ}\text{C}$  приводит к увеличению вязкости с 21 сСт до 28 сСт, в результате чего максимальный КПД (см. рис.3) понижается с 0,77 до 0,74, т.е. видоизменяется характеристика  $\eta-Q$  насоса. В работе [13] показано также изменение характеристик  $H-Q$  насоса в зависимости от вязкости, даны соответствующие формулы пересчета. Таким образом, становится очевидной необходимость оперативной корректировки характеристик насоса для последующего их использования в системах управления процессом перекачки нефти. Авторами работы [13] создан блок для учета вязкости нефти, корректирующий характеристики насоса и трубопровода. Блок встраивается в напорный трубопровод насоса и работает непрерывно.

**Выводы и задачи для исследований**

1. Учитывая высокую стоимость ЧРП (300 USD/кВт) необходимо разработать методику определения оптимального количества магистральных насосов с ЧРП на технологическом участке нефтепровода.
2. Установлена необходимость оперативной корректировки (пересчета) характеристик МН при изменяющейся вязкости перекачиваемой нефти.
3. Необходимо разработать устройство для оперативного автоматического пересчета характеристик МН при изменении вязкости нефти.
4. Математические модели энергосберегающего управления МН технологического участка требуют дальнейшего совершенствования с точки зрения учета неравномерного старения отдельных агрегатов.
5. В критерии оптимизации работы технологического участка нефтепровода необходимо включить учет снижения затрат на техническое обслуживание и ремонт, связанное с применением ЧРП.
6. Показано возможность использования для управления МН внедренной на Змиевской ТЭС энергосберегающей автоматизированной системы управления циркуляционными насосами блока.
7. Конечной задачей является разработка энергосберегающей АСУ магистральными насосами в рамках технологического участка

**Литература**

1. Тетельмин В.В. Магистральные нефтегазопроводы. Учебное пособие / Тетельмин В.В., Язев В.А. – Долгопрудный. Издательский дом Интеллект.– 2010.– 352 с. ил. (Серия Нефтегазовая инженерия).
2. Нечваль А.М. Основные задачи при проектировании и эксплуатации магистральных нефтепроводов. Учебное пособие / Нечваль А.М.– Уфа: изд-во УГНТУ.– 2005. – 81 с.
3. Шабанов В.А. Анализ КПД магистральных насосов при использовании частотно-регулируемого электропривода в функции регуляторов давления / Шабанов В.А., Хакимов Э.Ф., Шарикова С.Ф. // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело.– 2013.– №1.– <http://www.ogbus.ru>
4. Гафаров Р.Р. Двухуровневая система оптимизации работы нефтеперекачивающих станций на участки магистрального трубопровода / Гафаров Р.Р., Данилин О.Г. // Транспорт и хранение нефти и газа.– 2008.– том 6.– №2.
5. Шабанов В.А. Оценка эффективности частотного регулирования магистральных насосов по эквивалентному коэффициенту полезного действия / Шабанов В.А., Кабаргина О.В., Павлова З.Х. // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело.– 2011.– №6.– <http://www.ogbus.ru>
6. Козлов М. Эффективность внедрения систем с частотно-регулируемыми приводами / Козлов М., Чистяков А. //СТА 1/2001-<http://www.cta.ru>
7. Туманский А.П. // Оптимизация режимов перекачки по магистральным нефтепроводам с нефтеперекачивающими станциями, оборудованными частотно-регулируемыми приводами / Туманский А.П. // Транспорт и хранение нефтепродуктов.– 2005.– №8.
8. Беккер Л.М. Расчет оптимального режима работы нефтепровода, оборудованного частотно-регулируемым приводом / Беккер Л.М., Штукатуров К.Ю. // Наука и технологии трубопроводного транспорта нефти и нефтепродуктов. – 2013.– №3(11).

9. Шабанов В.А. Целевые функции и критерии оптимизации перекачки нефти по нефтепроводам при частотно-регулируемом электроприводе магистральных насосов. / Шабанов В.А., Бондаренко О.В. //Электронный научный журнал Нефтегазовое дело.– 2012.– №4.– <http://www.ogbus.ru>

10. Шабанов В.А. Алгоритмы оптимизации частотно-регулируемых электроприводов магистральных насосов методом покоординатного спуска / Шабанов В.А., Павлова З.Х. // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело.– 2012.– №4.– <http://www.ogbus.ru>

11. Шабанов В.А. Алгоритм оценки эффективности частотно-регулируемого электропривода магистральных насосов эксплуатируемых нефтепроводов по критерию снижения расхода электроэнергии / Шабанов В.А., Хакимов Э.Ф., Шарипова С.Ф. // Электрические и информационные комплексы и системы.– 2013.– №2, т. 9.

12. Канюк Г.И. Модель энергосберегающего управления нагнетательными установками тепловых электростанций [Текст] /Канюк Г.И., Мезеря А.Ю., Лаптинов И.П. // Вісник НТУ ХПІ: Енергетичні та теплотехнічні процеси та устаткування.– №12(1055).– 2014.– с. 90–97.

13. Миронов А.Г. О проблеме учета вязкости в моделях трубопроводов в пакете MATLAB/SIMSCAPE /Миронов А.Г., Агафонов Е.Д. // Проблемы техногенной безопасности устойчивого развития. Выпуск II.– 2011.– с. 76–81.

#### Bibliography (transliterated)

1. Tetelmin V.V. Magistralnyie neftegazoprovodyi. Uchebnoe posobie. Tetelmin V.V., Yazev V.A. – Dolgoprudnyiy. Izdatelskiy dom Intellekt.– 2010.– 352 p. il. (Seriya Neftegazovaya inzheneriya).

2. Nechval A.M. Osnovnyie zadachi pri proektirovanii i ekspluatatsii magistralnyih nefteprovodov. Uchebnoe posobie. Nechval A.M.– Ufa: izd-vo UGNTU.– 2005. – 81 p.

3. Shabanov V.A. Analiz KPD magistralnyih nasosov pri ispolzovanii chastotno-reguliruemogo elektroprivoda v funktsii regulatorov davleniya. Shabanov V.A., Hakimov E.F., Sharikova S.F. Elektronnyiy nauchnyiy zhurnal Neftegazovoe delo.– 2013.– #1.– <http://www.ogbus.ru>

4. Gafarov R.R. Dvuhurovnevaya sistema optimizatsii raboty nefteperekachivayuschih stantsiy na uchastki magistralnogo truboprovoda. Gafarov R.R., Danilin O.G. Transport i hranenie nefti i gaza.– 2008.– tom 6.– #2.

5. Shabanov V.A. Otsenka effektivnosti chastotnogo regulirovaniya magistralnyih nasosov po ekvivalentnomu koeffitsientu poleznogo deystviya. Shabanov V.A., Kabargina O.V., Pavlova Z.H. Elektronnyiy nauchnyiy zhurnal Neftegazovoe delo.– 2011.– #6.– <http://www.ogbus.ru>

6. Kozlov M. Effektivnost vnedreniya sistem s chastotno-reguliruemyimi privodami / Kozlov M., Chistyakov A. STA 1/2001-<http://www.cta.ru>

7. Tumanskiy A.P. Optimizatsiya rezhimov perekachki po magistralnyim nefteprovodam s nefteperekachivayuschimi stantsiyami, oborudovannyimi chastotno-reguliruemyimi privodami. Tumanskiy A.P. Transport i hranenie nefteproduktov.– 2005.– #8.

8. Bekker L.M. Raschet optimalnogo rezhima raboty nefteprovoda, oborudovannogo chastotno-reguliruemyim privodom. Bekker L.M., Shtukurov K.Yu. Nauka i tehnologii truboprovodnogo transporta nefti i nefteproduktov. – 2013.– #3(11).

9. Shabanov V.A. Tselevyie funktsii i kriterii optimizatsii perekachki nefti po nefteprovodam pri chastotno-reguliruemom elektroprivode magistralnyih nasosov. Shabanov V.A.,

Bondarenko O.V. Elektronnyy nauchnyy zhurnal Neftegazovoe delo.– 2012.– #4.– <http://www.ogbus.ru>

10. Shabanov V.A. Algoritmy optimizatsii chastotno-reguliruemiyh elektroprivodov magistralnykh nasosov metodom pookordinatnogo spuska. Shabanov V.A., Pavlova Z.H. Elektronnyy nauchnyy zhurnal Neftegazovoe delo.– 2012.– #4.–<http://www.ogbus.ru>

11. Shabanov V.A. Algoritm otsenki effektivnosti chastotno-reguliruемого elektroprivoda magistralnykh nasosov ekspluatiruemiyh nefteprovodov po kriteriyu snizheniya rashoda elektroenergii. Shabanov V.A., Hakimov E.F., Sharipova S.F. Elektricheskie i informatsionnyye kompleksy i sistemy.– 2013.– #2, t. 9.

12. Kanyuk G.I. Model energosberegayuschego upravleniya nagnetatelnyimi ustanovkami teplovykh elektrostantsiy [Tekst]. Kanyuk G.I., Mezerya A.Yu., Laptinov I.P. Visnik NTU HPI: Energetichni ta teplotehnichni protsesi ta ustatkuvannya.– #12(1055).– 2014.– p. 90–97.

13. Mironov A.G. O probleme ucheta vyzkosti v modelyakh truboprovodov v pakete MATLAB/SIMSCAPE. Mironov A.G., Agafonov E.D. Problemy tehnogennoy bezopasnosti ustoychivogo razvitiya. Vyipusk II.– 2011.– p. 76–81.

УДК 681.513

Канюк Г.І., Андреев О.В., Мезеря А.Ю., Князева В.М.

#### **АНАЛІЗ РЕЗЕРВІВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ КЕРУВАННІ НАСОСНИМИ АГРЕГАТАМИ НАФТОПЕРЕКАЧУВАЮЧИХ СТАНЦІЙ УКРАЇНИ**

Система магістральних нафтопроводів (МН) України включає 19 нафтопроводів, більше 150 нафтоперегінних станцій (НПС), роботу яких забезпечує близько 180 насосних агрегатів з електроприводом потужністю близько 360 тис. кВт. Наведені відомості показують масштабність і актуальність завдання енергозбереження на об'єктах транспортування нафти. Аналіз роботи нагнітачів на НПС показує, що їх ККД у середньому нижче оптимальних значень на 3–7 %, що обумовлено низькою ефективністю застосовуваних способів регулювання подачі (таких як дроселювання, зміна числа працюючих насосів і ін.).

Kanyuk G.I., Andreev O.V., Mezerya A.J., Knyazeva V.N.

#### **ANALYSIS OF ENERGY RESERVES IN THE MANAGEMENT OF THE PUMP UNIT THE PUMPING STATION UKRAINE**

The system of main oil pipelines (MH) of Ukraine includes 19 pipelines, 150 pumping stations (NPS), which is supported by some 180 pumping units with electric capacity of about 360 thousand. KW. The statements show the scale and urgency of the problem of energy conservation in the transportation of oil facilities. Analysis of the blowers in the NPC shows that their efficiency on average below the optimal values by 3–7 % due to the low efficiency of used methods of controlling the supply (such as throttling, changing the number of pumps in operation and others.).

УДК 662.997

Селихов Ю.А. Коцаренко В.А. Горбунов К.А. Горбунова О.В.

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ СОЛНЕЧНОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ И ОТОПЛЕНИЯ ЗДАНИЙ

Исследованы различные типы солнечных установок и материалы, применяемые в них. Выбраны: вариант солнечной установки в качестве прототипа для оптимизации, интеграции и автоматизации; материалы, применяемые в новейших разработках солнечных установок и оборудование. Разработана новая технологическая схема в качестве проекта солнечной установки. По проекту построена установка в южных регионах Украины. Были выполнены: теплотехнический расчет установки и расчет эксергетической эффективности применения новых материалов и оборудования. Это позволяет увеличить: температуру теплоносителя до 85–90 °С; КПД солнечной установки до 92 % по сравнению с прототипом – 67 %, при этом срок окупаемости установки соизмерим со сроком монтажа всей установки – около четырех месяцев. Были выбраны технические средства автоматизации и разработана схема автоматизации солнечной установки с компьютерным управлением ее работы.

**Постановка проблемы.** Солнечное излучение является основным источником возобновляемых ресурсов энергии на Земле. При общем мировом потреблении энергии ~ 10 млрд. т. условного топлива в год (с ростом в перспективе на 2020 год до 25–30 млрд. т. у. т/год) за счет лучистой энергии солнца можно получать до 10 % необходимой теплоты. Поэтому считается, что солнечной энергией может покрываться не более 3–5 % всей потребляемой энергии на Земле. Однако и такое использование солнечного излучения позволяет экономить многие сотни миллионов тонн органического топлива [1].

**Анализ последних исследований и публикаций.** Полученные научные результаты и интенсивное развитие технологий солнечной энергетики, позволяющие рассматривать Солнце в качестве энергетической альтернативы при производстве тепла и холода, дали возможность появлению на свет множества конструктивных решений и вариантов солнечных установок, которые классифицируются по различным критериям. Солнечные установки, предлагаемые в Украине, отечественных и иностранных производителей дороги как при покупке, так и при эксплуатации. Актуальной, на наш взгляд, является концепция создания новых конструкций солнечных установок, наиболее привлекательных для потенциального потребителя. Реализация данной концепции возможна при таком варианте исполнения солнечных установок, когда затраты на выработку тепловой энергии с помощью этих установок будут ниже уровня суммарных затрат на получение тепловой энергии традиционными способами (в частности, в котельных установках). Одновременно с этим срок окупаемости солнечных установок должен быть соизмерим с гарантийным сроком их эксплуатации. Для выполнения поставленных условий представляется целесообразной разработка таких конструкций солнечных установок, которые позволяли бы минимизировать затраты на их изготовление, монтаж, обслуживание и ремонт. Это может достигаться за счет использования дешевых отечественных материалов, выпуск которых гарантирован в достаточных объемах на протяжении длительного срока. Выше указанные задачи являются актуальными.

**Цель статьи.** В данной работе предлагается двухконтурная солнечная установка для горячего водоснабжения в летнее и осенне-весеннее периоды, а также для отопления зданий в холодное время года с круглосуточным компьютерным управлением. Для решения поставленных задач нами выполнен анализ технических возможностей различных типов уже работающих солнечных установок, изучены материалы, применяемые в этих установках. Выбран вариант солнечной установки в качестве прототипа для оптимизации, интеграции и автоматизации. Прототипом [2] для дальнейшей оптимизации, интеграции и автоматизации работы выбираем двухконтурную солнечную установку, показанную на рис. 1.

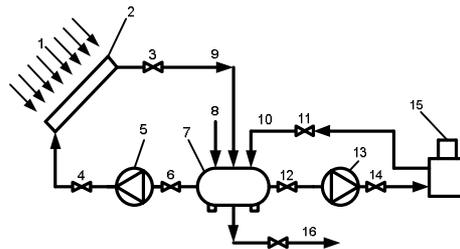


Рисунок 1 – Принципиальная схема солнечной установки для отопления зданий  
 1 – солнечное излучение; 2 – солнечный коллектор; 3, 4, 6, 11, 12, 14, 16 – регулировочные вентили; 5, 13 – циркуляционный насос; 7 – накопительный бак; 8 – подача холодного теплоносителя; 9, 10 – подача горячего теплоносителя; 15 – тепловой дублер; 16 – подача горячего теплоносителя к потребителю

Принцип работы солнечной установки для отопления зданий следующий.

Подача холодного теплоносителя осуществляется по сетевому трубопроводу 8 в накопительный бак 7. Первый вариант работы установки: холодный теплоноситель из накопительного бака 7 через регулировочные вентили 6 и 4 циркуляционным насосом 5 подается снизу под давлением в 32 плоских металлических коллектора 2, в котором размер одного коллектора 1200 x 800 x 0,020 мм, где нагревается солнечным излучением до необходимой температуры. По мере подъема теплоносителя снизу вверх по коллектору, он нагревается до максимальной температуры 63 °С в июле месяце при наивысшей солнечной инсоляции. Далее через регулировочный вентиль 3 по линии горячего теплоносителя 9 подается в накопительный бак 7. Теплоноситель нагревается до температуры 50–63 °С весь световой день. Нагретый теплоноситель по трубопроводу 16 подается потребителю. В случае недостаточной инсоляции теплоноситель из накопительного бака 7 циркуляционным насосом 13 через регулировочные вентили 12 и 14 подается в тепловой дублер 15, где нагревается до необходимой температуры и через вентиль 11 обратно поступает в накопительный бак 7. По трубопроводу 16 нагретый теплоноситель поступает в систему отопления зданий. Очевидными недостатками приведенной технологической схемы являются:

1. В первом варианте работы система находится под давлением насоса, что в случае разгерметизации системы приведет к потере теплоносителя.
2. Отсутствует оборудование для химической подготовки теплоносителя перед подачей в солнечный коллектор.
3. Накопительный бак работает как накопительная емкость для холодного и горячего теплоносителей.
4. Работа установки осуществляется только в ручном режиме и зависит от обслуживающего персонала.

5. Отсутствует система автоматизации установки и связь ее с регулирующим органом.
6. Теплоноситель нагревается в солнечном коллекторе до температуры 63 °С.
7. Большая металлоемкость установки.
8. Очень плохое качество теплоносителя, используемого в установке.
9. Выпадение солей из теплоносителя при температурах выше 50 °С забивает проходные сечения в солнечных коллекторах, что снижает эффективность работы установки и ее долговечность.

Для улучшения эффективности работы и удешевления стоимости установки необходимо: улучшить конструкцию двухконтурной солнечной установки, применив новое оборудование, материалы и систему автоматизации всех узлов установки; повысить коэффициент полезного действия (КПД) солнечной установки за счет применения новых материалов, теплоносителей и другого вспомогательного оборудования; усовершенствовать работу установки с помощью ЭВМ; уменьшить стоимость установки за счет снижения металлоемкости установки, применения новых материалов и оборудования; сделать подачу теплоносителя круглосуточной. Для решения этих задач был проведен литературный обзор и выбран плоскокапиллярный тонкопленочный солнечный коллектор [3] безнапорного типа специальной конструкции из полимерной пленки, в котором теплоноситель движется сверху вниз под действием силы тяжести по наклонной поверхности в виде пленки жидкости. Мы также пришли к выводу, чтобы эффективность работы коллектора не снижалась, необходимо провести замену старого оборудования новым [4]. На рис. 2 представлена технологическая схема солнечной установки после ее оптимизации.

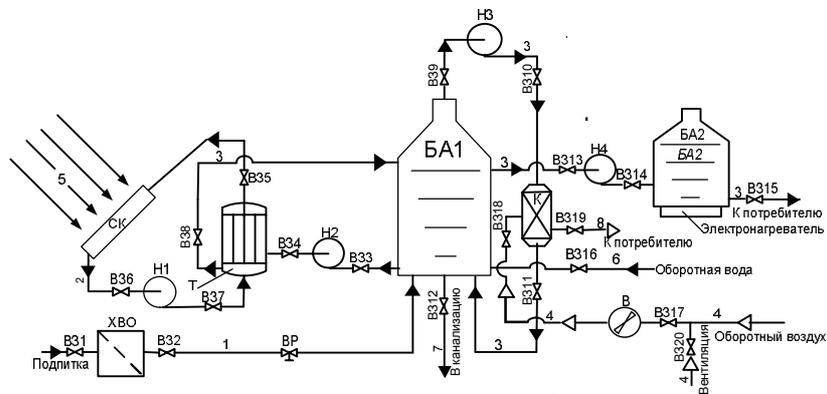


Рисунок 2 – Принципиальная технологическая схема двухконтурной солнечной установки для отопления помещений СК – солнечный коллектор; БА1, БА2 – баки-аккумуляторы; Н1, Н2, Н3, Н4 – циркуляционные насосы; ВР – вентиль регулировочный; V31÷V334 – вентили запорные; К – калорифер; В – вентилятор; Т – теплообменник; ХВО – аппарат химводоочистки; 1, 3, 6, 7 – холодный теплоноситель; 2 – антифриз; 4,8 – воздух; 5 – солнечное излучение

По разработанной схеме двухконтурная солнечная установка была изготовлена и смонтирована на крыше одного из пансионатов АР Крым.

Сделаем описание вариантов работы новой схемы, которая представлена на рис. 2. Солнечная установка может работать как сезонно, так и круглогодично. Сезонная работа. По первому варианту антифриз из первого контура теплообменника Т через вентили запорные V37, V36 и V35 циркуляционным насосом Н1 подается в солнечный коллектор СК, где он нагревается до необходимой температуры и обратно поступает в

первый контур теплообменника Т. Нагретый антифриз отдает свое тепло во втором контуре теплообменника Т теплоносителю (воде), подающемуся циркуляционным насосом Н2 через вентили запорные В33, В34 и В38 из бака-аккумулятора БА1 в теплообменник Т и далее поступает обратно в теплообменник Т.

В третьем варианте холодный теплоноситель из сетевого трубопровода через вентиль запорный В31 подается в аппарат химводоочистки ХВО, где теплоноситель очищается от многих солей и далее через вентиль запорный В32 и вентиль регулировочный ВР поступает и наполняет бак-аккумулятор БА1. В выбранном нами баке-аккумуляторе происходит накопление и прямое аккумулирование тепла, поскольку аккумулирующей и теплообменной является одна и та же среда [5]. В случае аварийной ситуации есть возможность выпустить теплоноситель в канализацию через вентиль запорный В312.

В четвертом варианте теплоноситель (горячая вода) из бака-аккумулятора БА1 через вентили запорные В39 и В310 циркуляционным насосом Н3 подается в калорифер К и далее через вентиль запорный В311 обратно в бак-аккумулятор БА1.

В пятом варианте холодный воздух из приточной вентиляции через вентили запорные В320 и В317 вентилятором В через вентиль запорный В318 подается в калорифер К, где нагревается горячей водой и через вентиль запорный В319 подается для нагрева помещения. Когда необходимо нагреть теплоноситель до более высокой температуры в работу включается шестой вариант. Теплоноситель через вентили запорные В313 и В314 циркуляционным насосом Н4 направляется в бак-аккумулятор БА2, где нагревается электронагревателями [6] до необходимой температуры и далее через вентиль запорный В315 подается к потребителю (на отопление помещений, на кухню). Обратная вода через вентиль запорный В316 возвращается обратно в бак-аккумулятор БА1. После всех замен получилась технологическая схема, для которой необходимо сделать расчет по оптимизации, интеграции и автоматизации.

Составив уравнения энергетического баланса (1) и сделав теплотехнические расчеты [3] прототипа и новой схемы солнечной установки получим температуры нагрева теплоносителя, удельные тепловые потоки и КПД как прототипа, так и новой солнечной установки. Эти данные представлены в таблице 1.

$$A_C \cdot \left\{ \left[ H \cdot R \cdot (\tau \cdot a) \right]_b + \left[ H \cdot R \cdot (\tau \cdot a) \right]_d \right\} = Q_U + Q_L + Q_S, \quad (1)$$

где  $A_C$  – площадь поверхности;  $H$  – плотность потока солнечного излучения (прямого или рассеянного), падающего на единицу площади поверхности с произвольной ориентацией;  $R$  – коэффициент перехода от плотности потока прямого или рассеянного излучения к плотности потока плоскости в плоскости ориентации коллектора;  $(\tau \cdot a)$  – приведенная поглощательная способность системы покрытий относительно прямого и рассеянного излучения; величина  $(\tau \cdot a)$  для прямого излучения определяется по действительному углу падения, а для рассеянного может быть принята равной соответствующей величине для прямого излучения при угле падения  $60^\circ$ ;  $Q_U$  – тепловой поток, переданный рабочей жидкости в солнечном коллекторе (полезное тепло);  $Q_L$  – тепловые потери коллектора в окружающую среду путем излучения и конвекции, а также путем теплопроводности по опорам поглощающей пластины и т.д.;  $Q_S$  – поток тепла, аккумулируемого коллектором.

Таблица 1

τ, час. – время суток	Прототип		Новая солн. установка	
	t, °C	q, Вт·ч/м <sup>2</sup>	t, °C	q, Вт·ч/м <sup>2</sup>
6 <sup>00</sup>	13	32	17	55
8 <sup>00</sup>	24	127	29	235
10 <sup>00</sup>	35	326	58	515
12 <sup>00</sup>	47	612	69	745
14 <sup>00</sup>	56	616	88	756
16 <sup>00</sup>	43	590	75	600
18 <sup>00</sup>	32	295	43	360
20 <sup>00</sup>	23	110	28	180

Анализ экспериментальных данных, представленный в табл. 1, показал, что замена прототипа новой солнечной установкой оказалась эффективной.

Далее нами был произведен расчет КПД прототипа и новой солнечной установки при различных удельных тепловых потоках по результатам эксперимента. Эти результаты получены по зависимости (2) [2] и представлены в табл. 2.

$$\eta = \int \frac{Q_U}{A_C} \cdot dt / \int H \cdot R \cdot dt. \quad (2)$$

Таблица 2

q, Вт·ч/м <sup>2</sup>	Прототип η	Новая солн. установка η
125	0,5	0,8
250	0,69	0,89
500	0,67	0,92
750	0,65	0,85

Срок окупаемости новой солнечной установки составил четыре месяца.

**Выводы.** Выполнен анализ технических возможностей различных типов солнечных установок, изучены материалы, применяемые в установках. Выбран вариант солнечной установки в качестве прототипа для оптимизации, интеграции и автоматизации. На основе литературного обзора материалов, применяемых в новейших разработках солнечных установок, выбраны новые материалы и оборудование. Составлена новая технологическая схема в качестве проекта солнечной установки. Показана эффективность применения новых материалов. Был выполнен расчет экономической эффективности применения новых материалов и оборудования. Установлено, что применение новых материалов и оборудования позволяет увеличить: температуру теплоносителя до 85–90 °C; КПД солнечной установки до 92 % по сравнению с прототипом – 67 %, при этом срок окупаемости установки соизмерим со сроком монтажа всей установки – около четырех месяцев.

#### Литература

1. Мешалкин В.П., Товажнянский Л.Л., Капустенко П.А. Основы теории ресурсосберегающих химико-технологических систем. Учебное пособие.– Харьков: НТУ «ХПИ», 2006. – 412 с.

2. Даффи Дж., Бекман У.А. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии.–М: Мир, 1977.– 420 с.

3. Селихов Ю.А., Селихова Л.Ю., Бухкало С.И. Полімерна композиція, Патент України, № 72078 А, Бюл. № 10, 2004.

4. Селихов Ю.А., Селихова Л.Ю., Селихова Н.В., Бухкало С.И. Двоконтурна геліоводонагрівна установка, Патент України, № 64198 А, Бюл. № 2, 2004.

**Bibliography (transliterated)**

1. Meshalkin V.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.A. Osnovyi teorii resursosberegayuschih himiko-tehnologicheskikh sistem. Uchebnoe posobie.– Harkov: NTU «HPI», 2006. – 412 p.

2. Daffi Dzh., Bekman U.A. Teplovyie protsessyyi s ispolzovaniem solnechnoy energii.–М: Mir, 1977.– 420 p.

3. Selihov Yu.A., Selihova L.Yu., Buhkalo S.I. Polimerna kompozitsiya, Patent Ukrayini, # 72078 A, Byul. # 10, 2004.

4. Selihov Yu.A., Selihova L.Yu., Selihova N.V., Buhkalo S.I. Dvokonturna gelio-vodonagrivna ustanovka, Patent Ukrayini, # 64198 A, Byul. # 2, 2004.

УДК 662.997

Селихов Ю.А., Коцаренко В.О., Горбунов К.О., Горбунова О.В.

**ОПТИМІЗАЦІЯ РОБОТИ СОНЯЧНОЇ УСТАНОВКИ  
ДЛЯ ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ І ОПАЛЮВАННЯ БУДІВЕЛЬ**

Досліджені різні типи сонячних установок і матеріали, з яких вони виготовлені. Вибрані: варіант сонячної установки як прототип для оптимізації, інтеграції і автоматизації; матеріали, вживані в новітніх розробках сонячних установок і устаткування. Розроблена нова технологічна схема як проект сонячної установки. За проектом побудована установка в південних регіонах України. Були виконані: теплотехнічний розрахунок установки і розрахунок економічної ефективності застосування нових матеріалів і устаткування. Це дозволило збільшити: температуру теплоносія до 85–90 °С; ККД сонячної установки до 92 % в порівнянні з прототипом – 67 %, при цьому термін окупності установки порівняно з терміном монтажу всієї установки – близько чотирьох місяців.

Selikhov Yu.A., Kocarenko V.A., Gorbunov K.A., Gorbunova O.V.

**OPTIMIZATION OF WORK OF SUN SETTING FOR HOT WATER-SUPPLY  
AND HEATING OF BUILDINGS**

The different classes of sun options and goods, applied in them are investigational. Chosen: variant of sun installation as a prototype for optimization, integration and automation; goods, applied in the newest developments of sun options and installation. A new flow-sheet is designed as a device of sun installation. On a project, setting in the south regions of Ukraine is built. Were executed: heating engineering calculation of installation and calculation of efficiency of application of new goods and installation. It allows to increase: temperature of fluids to 85–90 °С; Output-input ratio sun installation to 92 % as compared to a prototype – 67 %, thus equal the date of recouperment of installation with the date of assembly of all of installation – about four months.

Александрова Т.Е., Лазаренко А.А.

## ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЦИФРОВОЙ ИНВАРИАНТНОЙ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОДВИЖНОГО ОБЪЕКТА

**Постановка задачи.** Известно [1], что системы автоматического управления, объединяющие два принципа управления – по отклонению и по возмущению, приобретают свойства инвариантности к действию внешних возмущений и называются инвариантными. Инвариантная система наведения и стабилизации танковой пушки предложена в [2] и содержит помимо гироскопических датчиков угла и угловой скорости также датчики давления рабочей жидкости в полостях исполнительного гидроцилиндра канала вертикального наведения. Сигнал, формируемый стабилизатором, учитывает выходную информацию гироскопических датчиков угла и угловой скорости, а также информацию о разности давлений рабочей жидкости в полостях исполнительного гидроцилиндра. В работах [3,4] сделан вывод о том, что повышение астатизма системы, приводящее к повышению точности стабилизации, одновременно приводит к уменьшению запаса устойчивости замкнутой системы стабилизации вплоть до потери устойчивости замкнутой системой. В работе [5] показано, что сохранение замкнутой системой необходимого запаса устойчивости может быть достигнуто в  $k_{\phi}$  том случае, если управляющий сигнал, формируемый электронным блоком, содержит информацию об угловом ускорении танковой пушки относительно оси цапф. Таким образом, управляющий сигнал, формируемый цифровым электронным блоком, имеет следующую структуру

$$U[nT] = k_{\phi}U_{\phi}[nT] + k_{\dot{\phi}}U_{\dot{\phi}}[nT] + k_p U_p[nT] + k_{\ddot{\phi}}U_{\ddot{\phi}}[nT], \quad (1)$$

где решетчатые функции  $U_{\phi}[nT]$ ,  $U_{\dot{\phi}}[nT]$ ,  $U_p[nT]$  и  $U_{\ddot{\phi}}[nT]$  получены в результате обработки выходных сигналов датчиков цифровым электронным блоком стабилизатора, а коэффициенты  $k_{\phi}$ ,  $k_{\dot{\phi}}$ ,  $k_p$  и  $k_{\ddot{\phi}}$  являются варьируемыми параметрами цифрового блока стабилизатора.

Целью настоящей статьи является выбор значений варьируемых параметров алгоритма стабилизации (1), обеспечивающих высокую степень точности стабилизации оси канала ствола танковой пушки относительно линии прицеливания.

**Основная часть.** На рис. 1 представлена логическая схема алгоритма стабилизации, реализуемого цифровым электронным блоком системы наведения и стабилизации танковой пушки. На рисунке приняты следующие обозначения: ГДУ – гироскопический датчик угла; ГДУС – гироскопический датчик угловой скорости; ДД – датчик давления; ЦЭБ – цифровой электронный блок; В – выпрямитель; ПАК – преобразователь «аналог-код»; ФБ – фильтр Баттеруорта; ФЛ – фильтр Ланцоша; У – усилитель цифрового сигнала; ПКА – преобразователь «код-аналог».

Выходные сигналы гироскопических датчиков и датчиков давления являются высокочастотными сигналами переменного тока частотой 400–500 Гц, амплитуды которых пропорциональны углам поворота рамок гироскопических датчиков и давлению рабочей жидкости в полостях исполнительного гидроцилиндра. Поступая на вход ЦЭБ,

эти сигналы выпрямляются выпрямителями В1-В4 и в виде сигналов постоянного тока  $\phi(t)$ ,  $\omega_\phi(t)$ ,  $p_1(t)$  и  $p_2(t)$  поступают на входы ПАК. На выходе ПАК имеют место решетчатые функции  $\phi[nT]$ ,  $\omega_\phi[nT]$ ,  $p_1[nT]$  и  $p_2[nT]$ , представляющие собой последовательности мгновенных импульсов, равноотстоящих друг от друга на величину периода квантования  $T$ .

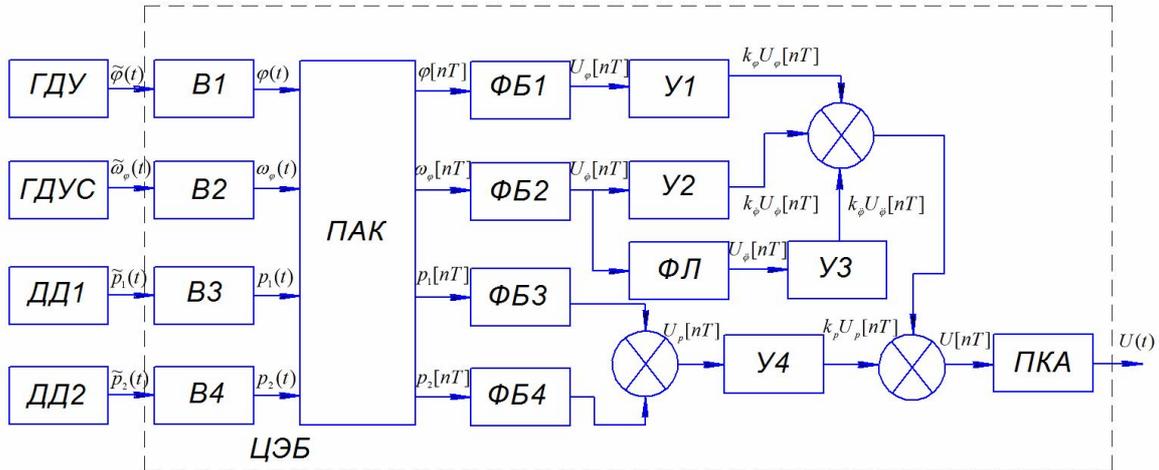


Рисунок 1 – Логическая схема алгоритма стабилизации

В работе [6] показано, что рамки гироскопических датчиков совершают высокочастотные колебания, являющиеся помехами полезных сигналов  $\phi[nT]$  и  $\omega_\phi[nT]$ . Давление рабочей жидкости в полостях исполнительного гидроцилиндра также измеряется с погрешностью, обусловленной автоколебаниями рабочей жидкости в гидросистеме стабилизатора [7]. Для фильтрации высокочастотных помех в ЦЭБ используются цифровые низкочастотные фильтры Баттеруорта второго порядка, реализуемые с помощью соотношений [8]:

$$U_\phi[nT] = a_1 \{ \phi[nT] + 2\phi[(n-1)T] + \phi[(n-2)T] \} - d_1 U_\phi[(n-1)T] - d_2 U_\phi[(n-2)T]; \quad (2)$$

$$U_{\dot{\phi}}[nT] = a_1 \{ \omega_\phi[nT] + 2\omega_\phi[(n-1)T] + \omega_\phi[(n-2)T] \} - d_1 U_{\dot{\phi}}[(n-1)T] - d_2 U_{\dot{\phi}}[(n-2)T]; \quad (3)$$

$$U_{p_1}[nT] = a_1 \{ p_1[nT] + 2p_1[(n-1)T] + p_1[(n-2)T] \} - d_1 U_{p_1}[(n-1)T] - d_2 U_{p_1}[(n-2)T]; \quad (4)$$

$$U_{p_2}[nT] = a_1 \{ p_2[nT] + 2p_2[(n-1)T] + p_2[(n-2)T] \} - d_1 U_{p_2}[(n-1)T] - d_2 U_{p_2}[(n-2)T]; \quad (5)$$

$$U_p[nT] = U_{p_1}[nT] - U_{p_2}[nT]. \quad (6)$$

Для отыскания решетчатой функции  $U_{\phi}[nT]$  используем фильтр Ланцоша 2-го порядка, реализуемый с помощью соотношения [9]

$$U_{\phi}[nT] = c_0 U_{\phi}[nT] + c_1 U_{\phi}[(n-1)T] - c_1 U_{\phi}[(n-3)T] - c_0 U_{\phi}[(n-4)T]. \quad (7)$$

Подставляя в правую часть соотношения (1) алгоритмы (2)–(7), получаем алгоритм формирования решетчатой функции управления  $U[nT]$  инвариантного стабилизатора танковой пушки в канале вертикального наведения.

Подадим решетчатую функцию (1) на вход ПАК. На выходе получаем кусочно-постоянную функцию управления

$$U(t) = \begin{cases} U[nT], nT \leq t < (n+1)T \\ U[(n+1)T], (n+1)T \leq t < (n+2)T. \end{cases} \quad (8)$$

Для отыскания варьируемых констант стабилизатора  $k_{\phi}$ ,  $k_{\dot{\phi}}$ ,  $k_p$  и  $k_{\ddot{\phi}}$  воспользуемся методикой, изложенной в статье [10]. Пусть объект стабилизации описывается системой линейных дифференциальных уравнений

$$I_n \frac{d^2 \phi(t)}{dt^2} = k_m \Delta p(t) + M_f(t); \quad (9)$$

$$I_k \frac{d^2 \beta(t)}{dt^2} + f_k \frac{d\beta(t)}{dt} + c_k \beta(t) = \frac{k_e}{r_0} U(t); \quad (10)$$

$$T_z \frac{d\Delta p(t)}{dt} + \Delta p(t) = k_d \beta(t), \quad (11)$$

где  $\phi(t)$  – угловое рассогласование оси канала ствола танковой пушки от линии прицеливания;  $\beta(t)$  – угловое отклонение коромысла электрогидравлического усилителя от нейтрального положения;  $\Delta p(t)$  – разность давлений рабочей жидкости в полостях исполнительного гидроцилиндра;  $M_f(t)$  – внешнее возмущение, действующее на танковую пушку;  $U(t)$  – управляющий сигнал, формируемый ЦЭБ;  $I_n$  – момент инерции танковой пушки относительно оси цапф;  $I_k$  – момент инерции коромысла относительно оси поворота;  $f_k$  – коэффициент жидкостного трения в оси поворота коромысла;  $c_k$  – коэффициент жесткости фиксирующей пружины;  $r_0$  – сопротивление обмотки возбуждения электромагнита;  $T_z$  – постоянная времени гидравлической части электрогидравлического усилителя;  $k_m$ ,  $k_e$ ,  $k_d$  – коэффициенты пропорциональности.

Точность стабилизатора будем оценивать значением интегрального квадратного функционала

$$I = \int_0^{\tau} [\beta_1^2 \phi^2(t) + \beta_2^2 \dot{\phi}^2(t)] dt, \quad (12)$$

вычисленного на решениях замкнутой системы (1)–(11) при заданном изменении внешнего возмущающего момента.

Методика отыскания значений варьируемых констант стабилизатора  $k_\phi$ ,  $k_{\dot{\phi}}$ ,  $k_p$  и  $k_{\ddot{\phi}}$  включает целенаправленный выбор весовых коэффициентов  $\beta_1$  и  $\beta_2$  аддитивного функционала (12).

Внешнее возмущение  $M_f(t)$  выберем в соответствии с методикой, предложенной в статье [4]. Участок возрастания функции  $M_f(t)$  соответствует входу танка в поворот. Участок постоянства функции  $M_f(t)$  соответствует равномерному повороту, а участок убываний функции  $M_f(t)$  соответствует выходу танка из поворота.

Задачу параметрического синтеза цифрового инвариантного стабилизатора танковой пушки сформируем следующим образом. Требуется отыскать значения варьируемых констант алгоритма (1), которые на решениях замкнутой системы (1)–(11) при заданном изменении функции  $M_f(t)$  доставляют минимум интегральному квадратичному функционалу (12).

Пусть значения параметров объекта стабилизации составляют:  $I_n = 736.9 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ ;  $k_m = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{Па}^{-1}$ ;  $I_k = 0.98 \cdot 10^{-2} \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}^2$ ;  $f_k = 0.55 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{с}$ ;  $c_k = 1,01 \cdot 10^2 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;  $k_e = 10^3 \text{ Н} \cdot \text{м} \cdot \text{А}^{-1}$ ;  $r_0 = 30 \text{ Ом}$ ;  $T_z = 0,12 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ ;  $k_d = 1,238 \cdot 10^7 \text{ Па}^{-1}$ .

Значения параметров цифровых низкочастотных фильтров примем равными  $a_1 = 0.1219$ ;  $d_1 = -1.2401$ ;  $d_2 = 0.4572$ ;  $c_0 = 5$ ;  $c_1 = 2.5$ , а функцию внешнего возмущения  $M_f(t)$  запишем в виде соотношения [4]

$$M_f(t) = \begin{cases} 200t, & 0 \leq t < 1; \\ 200, & 1 \leq t < 3; \\ 200(4-t), & 3 \leq t < 4; \\ 0, & t \geq 4. \end{cases}$$

Используя рассмотренный в [10] алгоритм параметрического синтеза системы наведения и стабилизации танковой пушки, получаем следующие значения варьируемых параметров инвариантного алгоритма стабилизации (1) – (7)  $k_\phi^* = 85.6$ ;  $k_{\dot{\phi}}^* = 42.8$ ;  $k_p^* = 0.736$ ;  $k_{\ddot{\phi}}^* = 5.26$ .

### **Выводы**

Для придания замкнутой системе стабилизации подвижного объекта свойства инвариантности к действию внешнего возмущения при сохранении требуемого запаса устойчивости необходимо, помимо реализации комбинированного принципа построения системы стабилизации, ввести в алгоритм стабилизации контур управления по угловому ускорению объекта. С целью обеспечения необходимого уровня помехозащищенности цифрового стабилизатора, для оценки углового ускорения объекта целесообразно использование цифрового низкочастотного фильтра Ланцоша.

Литература

1. Бесекерский В.А. Теория систем автоматического управления / В.А. Бесекерский, Е.П. Попов. – Санкт-Петербург: Професия, 2003. – 752 с.
2. Пат. UA 83903 від 10.10.2013, Україна, МПК F41G 5/00 Стабілізатор танкової гармати. / Александрова Т.Є., Лазаренко А.О. НТУ "ХПІ". Заявка № 201300690 / від 21.01.2013. Опубл. 10.10.2013. Бюл. №19.
3. Александрова Т.Е. Об особенностях построения инвариантной системы наведения и стабилизации танковой пушки / Т.Е. Александрова, А.А. Лазаренко, А.В. Зейн // Системи озброєння та військова техніка. – 2013. – №4. – С. 3–6.
4. Александрова Т.Е. К задаче построения инвариантного стабилизатора канала вертикального наведения основного вооружения танка / Т.Е. Александрова, Е.Е. Александров, М.Д. Борисюк // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2014. – №4. – С. 67–73.
5. Александрова Т.Е. Устойчивость и инвариантность линейных систем стабилизации объектов военного назначения / Т.Е. Александрова, А.А. Лазаренко // Системи озброєння та військова техніка. – 2015. – № 4(44) . – С. 37–41.
6. Александрова Т.Е. Оценка точности стабилизации поля зрения прицела танковой пушки / Е.Е. Александров, Т.Е. Александрова, А.А. Лазаренко // Артиллерийское и стрелковое вооружение. – 2011. – №3. – С. 40–44.
7. Александрова Т.Е. Расчет параметров автоколебаний давления рабочей жидкости в гидросистеме стабилизатора канала вертикального наведения танковой пушки / Т.Е. Александрова, А.А. Лазаренко // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2011. – №3. – С. 24–30.
8. Александрова Т.Е. Рекурсивные цифровые фильтры Баттеруорта для стабилизаторов подвижных объектов / Т.Е. Александрова, А.А. Лазаренко, А.В. Зейн // Технічна електродинаміка. – 2012. – 4.1. – С. 86–89.
9. Александрова Т.Е. Сравнительный анализ цифровых ПД-стабилизаторов подвижных объектов с низкочастотными фильтрами Баттеруорта и Ланцоша / Т.Е. Александрова, В.А. Кононенко, А.А. Лазаренко, А.В. Зейн // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. –2011. –№2. – С. 148–152.
10. Александрова Т.Е. Структурно-параметрический синтез стабилизатора упругой танковой пушки. Часть I. Математические и имитационные модели. Часть II. Параметрический синтез и сравнительный анализ стабилизаторов различной структуры. / М.Д. Борисюк, А.С. Куценко, Т.Е. Александрова, А.С. Мазманишвили // Озброєння та військова техніка. – 2014. – №4. – С. 20–34.

Bibliography (transliterated)

1. Besekerskiy V.A. Teoriya sistem avtomaticheskogo upravleniya. V.A. Besekerskiy, E.P. Popov. – Sankt-Peterburg: Profesija, 2003. – 752 p.
2. Pat. UA 83903 від 10.10.2013, Ukraina, MPK F41G 5/00 Stabilizator tankovoi garmati. Aleksandrova T.E., Lazarenko A.O NTU "XPI". Zajavka № 201300690 / vid 21.01.2013. Opubl. 10.10.2013. Bjul. №19.
3. Aleksandrova T.E. Ob osobennostjach postroenija invariantnoj sistemy navedenija i stabilizacii tankovoj pushki. T.E. Aleksandrova, A.A. Lazarenko, A.V. Zejn. Sistemi ozbroennja ta vijskova tehnika. – 2013. – №4. – P. 3–6.

4. Aleksandrova T.E. K zadache postroenija invariantnogo stabilizatora kanala vertikalnogo navedenija osnovnogo voorugenija tanka. T.E. Aleksandrova, E.E. Aleksandrov, M.D. Borisjuk. Integrovani tehnologii ta energozberegennja. – 2014. – №4. – P. 67–73.
5. Aleksandrova T.E. Ustojchivost i invariantnosti linejnyx sistem stabilizacii objektov voennogo naznacenija. T.E. Aleksandrova, A.A. Lazarenko. Sistemi ozbroennja ta vijskova tehnika. – 2015. – № 4(44). – P. 37–41.
6. Aleksandrova T.E. Ocenka tochnosti stabilizacii polja zrenija pricela tankovoj pushki. E.E. Aleksandrov, T.E. Aleksandrova, A.A. Lazarenko. Artillerijskoe i strelkovoe voorugenie. – 2011. – №3. – P. 40–44.
7. Aleksandrova T.E. Raschet parametrov avtokolebanij davlenija rabocej gidkosti v gidrosisteme stabilizatora kanala vertikalnogo navedenija tankovoj pushki. T.E. Aleksandrova, A.A. Lazarenko. Integrovani tehnologii ta energozberegennja.– 2011.– №3.– P. 24–30.
8. Aleksandrova T.E. Rekursivnye cifrovye filtry Batteruorta dlja stabilizatorov podvignyx objektov. T.E. Aleksandrova, A.A. Lazarenko, A.V. Zejn. Texnicna elektrodinamika. – 2012. – 4.1. – P. 86–89.
9. Aleksandrova T.E. Sravnitelnyj analiz cifrovyx PD-stabilizatorov podvignyx objektov s nizkochastotnymi filtrami Batteruorta i Lancosha. T.E. Aleksandrova, V.A. Kononenko, A.A. Lazarenko, A.V. Zejn. Radioelektronika. Informatika. Upravlinnja.– 2011.– №2.– P. 148–152.
10. Aleksandrova T.E. Strukturno-parametricheskij sintez stabilizatora uprugoj tankovoj pushki. Chast I. Matematicheskie i imitacionnye modeli. Chast II. Parametricheskij sintez i sravnitelnyj analiz stabilizatorov razlicnoj strukturi. M.D. Borisjuk, A.S. Kucenko, T.E. Aleksandrova, A.S. Mazmanishvili. Ozbroyennja ta vijskova tehnika. – 2014. – №4. – P. 20–34.

УДК 623.412

Александрова Т.Є., Лазаренко А.О.

### **ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ ЦИФРОВОЇ ІНВАРІАНТНОЇ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ РУХОМОГО ОБ'ЄКТУ**

В роботі розглядується логічна схема алгоритму стабілізації рухомого об'єкту, яка забезпечує інваріантність об'єкту до дії зовнішніх збурень при забезпеченні необхідного ступеня стійкості замкненої системи. Доведено, що алгоритм забезпечує якісний процес стабілізації при застосуванні цифрових низькочастотних фільтрів Баттеруорта і Ланцоша другого порядку.

Alexandrova T.E., Lazarenko A.A.

### **PARAMETRIC SYNTHESIS INVARIANT DIGITAL SYSTEM STABILIZATION MOVING OBJECTS**

We consider the logic circuit stabilization algorithm moving object that provides object invariance to external disturbances while ensuring corre--A necessary degree of stability of the closed system. It is proved that the algorithm provides high-quality stabilization process in the application of digital low-pass filter, and Lanczos Batteruorta second order.

УДК 66.045.01

Перевертайленко А.Ю.,<sup>1</sup> ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л.,<sup>1</sup> Болдырев С.А.,<sup>2</sup> Крайчич Г.,<sup>2</sup>  
Капустенко П.А.,<sup>3</sup> Арсеньева О.П.,<sup>1</sup> Арсеньев П.Ю.<sup>3</sup>

## СРАВНЕНИЕ КАНАЛОВ КОМПАКТНЫХ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ УТИЛИЗАЦИИ НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

<sup>1</sup> *Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт"*

<sup>2</sup> *Университет Загреб, Загреб, Хорватия*

<sup>3</sup> *АО "Содружество-Г", Харьков, Украина*

Компактные теплообменные аппараты находят все большее применение в промышленности благодаря низкой материалоемкости и стоимости, высокой надежности теплообменного оборудования и интенсификации процессов теплообмена в каналах. При повышении компактности оборудования необходимо учитывать влияние размеров каналов на тепло-гидравлические характеристики аппаратов. В данной статье проведен анализ изменения коэффициента гидравлического сопротивления и теплоотдачи от числа Рейнольдса для каналов пластинчатых теплообменных аппаратов, гладких труб и труб с искусственной шероховатостью. Приведено исследование влияния гидравлического диаметра для каналов различных типов на компактность теплообменного аппарата, при этом рассматривалась площадь теплообменной поверхности и длина канала для движения теплоносителей. Результаты данной работы могут быть использованы при разработке конструкций компактных теплообменных аппаратов с интенсификацией теплообмена для процессов утилизации низкопотенциального тепла.

**Введение.** Физические свойства промышленного сбросного тепла и его температура различаются в зависимости от вида промышленности. В нефтехимической промышленности это тепло выбрасывается в форме пара с температурой 150 °С, или же охлаждающей воды 30–55 °С, для пищевой промышленности средняя температура сбросного тепла составляет 80 °С. Металлургические, цементные и нефтехимические предприятия имеют наибольший потенциал для энергосбережения. Согласно [1], сбросное тепло можно разделить на три группы: высокотемпературное, при температурах выше 650 °С; средних температур, когда температура изменяется в пределах от 230 до 650 °С; и тепло низких температур, ниже 230 °С. При этом 60 % от всего возможного низкопотенциального тепла находится в диапазоне низких температур. Если рассматривать температуры до 260 °С, получим наиболее широкую область имеющегося сбросного тепла, которое можно отнести к низкотемпературному диапазону [2].

Так как большая часть имеющихся низкопотенциальных источников тепла характеризуется относительно низкими температурами и температурными напорами при утилизации, то для их дальнейшего использования необходимо применять методы интенсификации процессов. Согласно определению Резя [3], интенсификация процессов применительно к процессам теплообмена заключается в таком усовершенствовании процессов, которое позволяет использовать меньшие размеры оборудования, что приводит к более высокому показателю использования энергии, уменьшению капитальных затрат и материалоемкости, и повышению надежности теплообменного оборудования. Данные требования предполагают использование компактных теплообменных аппара-

тов, которые при одинаковых условиях применения обладают меньшими размерами, и для процесса передачи тепла им необходима меньшая площадь поверхности теплопередачи.

Существует два основных подхода для увеличения компактности теплообменного оборудования: первый состоит в уменьшении гидравлического диаметра каналов для течения теплоносителей, и второй – в увеличении коэффициента теплопередачи для аппарата при том же эквивалентном диаметре [1]. Оба подхода могут использовать активный и пассивный методы. Активный метод заключается в использовании дополнительного оборудования вне конструкции аппарата для увеличения теплопередачи, что, как правило, требует дополнительного оборудования и энергетических затрат. Пассивный метод в настоящее время является самым распространенным, и предполагает модификацию геометрических параметров теплообменных каналов в аппарате, или же изменение поверхности для изменения характеристик потоков. Такой метод предусматривает перераспределение энергии потока в канале, за счет чего и происходит интенсификация теплообмена и увеличение значения коэффициента теплоотдачи. Это достигается путем добавления дополнительных компонентов в каналы, таких как спиральные элементы для закручивания потока, провололочные вставки, использованием шероховатых поверхностей или же специальных элементов для турбулизации потока.

Требования к рекуперативным теплообменным аппаратам формируются в зависимости от назначения аппарата, особенностей их размещения в теплообменной сети предприятия. При выборе теплообменного оборудования, целевые значения температур, количество передаваемой теплоты, температуры теплоносителей, их физические и термодинамические параметры и свойства (плотность, вязкость, теплоемкость, агрегатное состояние; химические свойства сред и агрессивность), допустимые уровни загрязнения теплоносителя и отложений на теплообменной поверхности строго определяются технологическим процессом.

**Компактные теплообменные аппараты.** Согласно литературным источникам, компактность теплообменных аппаратов определяется концентрацией площади поверхности в единице объема. В книге [4] введено два параметра, характеризующих компактность. Первый представляет собой отношение площади теплопередающей поверхности по одной стороне, занятой теплоносителем, к объему по этой же стороне:

$$\sigma_i = \frac{F_i}{V_i}, \text{ м}^2/\text{м}^3 \quad (1)$$

где  $i = 1$  для горячего теплоносителя,  $i = 2$  для холодного теплоносителя.

Второй параметр является отношением площади теплопередающей поверхности по одной из сторон к общему объему теплоносителей в аппарате ( $\psi_i = \frac{F_i}{V}$ ,  $\text{м}^2/\text{м}^3$ ).

Определение компактности согласно выражению (1) строго связано с гидравлическим диаметром канала по рассматриваемой стороне, который можно выразить следующим соотношением:

$$D_h = \frac{4 \cdot f_{ch}}{\Pi_{ch}} = \frac{4 \cdot V_{ch}}{F_{ch}} = \frac{4}{\sigma_i}, \quad (2)$$

где  $f_{ch}$  – площадь поперечного сечения канала,  $m^2$ ;  $P_{ch}$  – периметр, омываемый жидкостью, м;  $V_{ch}$  – объем жидкости внутри канала  $m^3$ ;  $F_{ch}$  – площадь поверхности, омываемой теплоносителем,  $m^2$ .

При определении компактности обычно пользуются величиной концентрации площади поверхности, которая должна быть более некоторого значения. В работе [5] для случая теплопередачи между газом и жидкостью компактными считаются теплообменные аппараты, концентрация площади поверхности которых больше  $700 m^2/m^3$  по стороне газа, что соответствует гидравлическому диаметру менее 6 мм. При работе с жидкими средами, или при наличии фазового перехода, этот параметр должен быть более  $400 m^2/m^3$  по стороне горячего теплоносителя, и соответствующий максимальный гидравлический диаметр равен 10 мм.

Так как размер теплообменного аппарата зависит не только от площади теплообменной поверхности, но и от тепловых и гидравлических параметров при движении теплоносителей в каналах для обоих теплоносителей, необходим сравнительный анализ наиболее распространенных типов компактных теплообменных аппаратов.

**Сравнение различных типов теплообменных поверхностей.** При интенсификации теплообмена в компактных теплообменных аппаратах, больше применяется пассивный метод. В пластинчатых теплообменных аппаратах (ПТА) для интенсификации теплопередачи чаще всего изменяют форму гофрировки теплопередающих пластин, образующих каналы. Изображение каналов ПТА представлено на рис. 1а. В кожухотрубчатых теплообменных аппаратах интенсификация в трубах возможна путем использования поверхностей с искусственной шероховатостью, повышающих турбулентность потока и увеличивающих теплоотдачу [6], рис. 1б.

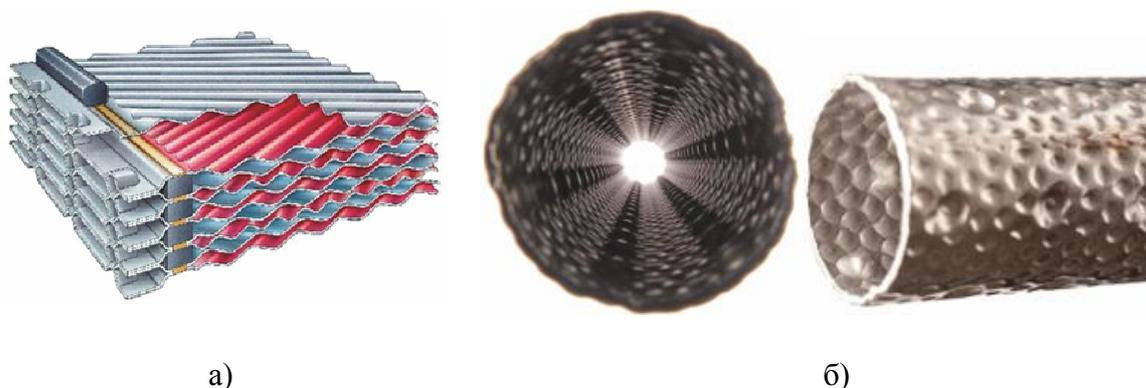


Рисунок 1 – Каналы компактных теплообменных аппаратов:  
а – каналы ПТА; б – труба с интенсификацией теплообмена

Для исследования тепло-гидравлических характеристик различных типов поверхностей рассматривался случай установки теплообменных аппаратов для утилизации теплоты низкопотенциального пара. Условия работы теплообменника представлены в таблице 1. Сравнения разных видов поверхностей проводились по стороне воды, физические свойства брали для среднего значения температуры  $30\text{ }^{\circ}C$ . Греющим теплоносителем является пар холодильного агента теплового насоса при постоянной температуре  $60\text{ }^{\circ}C$ .

Таблица 1 – Рабочие параметры теплообменного аппарата

Тепловая нагрузка	Q = 600 кВт	
Поток	Холодный	Горячий
Среда	Пар	Вода
Рабочее давление, бар	P <sub>1</sub> = 5	P <sub>2</sub> = 5
Входная температура, °C	T <sub>1</sub> = 60	T <sub>3</sub> = 5
Выходная температура, °C	T <sub>2</sub> = 60	T <sub>4</sub> = 55
Допустимое падение давления, кПа	ΔP <sub>1</sub> ≤ 20	ΔP <sub>2</sub> ≤ 20
Необходимое число единиц теплопереноса	NTU = 2.40	

На практике удобно использовать соотношения для всего диапазона чисел Рейнольдса. Для труб с высокой достоверностью можно использовать соотношение Черчилля, применимое для всей области значений числа Рейнольдса [7]:

$$f = 2 \cdot \left[ \left( \frac{8}{Re} \right)^{12} + \frac{1}{(A+B)^3} \right]^{\frac{1}{12}} ; A = \left[ 2.457 \cdot \ln \left( \frac{1}{\left( \frac{7}{Re} \right)^{0.9} + 0.27 \cdot \frac{\varepsilon}{D_h}} \right) \right]^{16} ; B = \left( \frac{37,530}{Re} \right)^{16}, (3)$$

где  $\varepsilon$  – шероховатость поверхности трубы, Re – число Рейнольдса,  $Re = \frac{W \cdot D_h}{\nu}$ , W – скорость, м/с;  $\nu$  – кинематическая вязкость, м<sup>2</sup>/с.

Для расчета гидравлического сопротивления в каналах ПТА было выбрано соотношение, зависящее от геометрической формы гофрировки пластины образующей каналы для течения теплоносителей [8], и применимое для всего диапазона изменения чисел Рейнольдса. Определяющими параметрами в этом соотношении являются: угол наклона гофр  $\beta$ , высота гофры ( $b$ ) и шаг гофры ( $S$ ). Зависимость гидравлического сопротивления от числа Рейнольдса для различных типов каналов представлена на рис. 2а.

Для сравнения числа Нуссельта для каналов ПТА использовали соотношения, представленные в работе [9]. Для труб расчеты проводились согласно зависимостям Гнилинского [10], вид которых определяется режимом течения теплоносителя в канале и приведенным в соотношениях (4). Полученные значения числа Нуссельта в зависимости от изменения числа Рейнольдса представлены на рис. 2б.

$$Re > 4000 \quad Nu_T = \frac{f \cdot Pr \cdot (Re - 1000)}{2 \cdot \left[ 1 + 12.7 \cdot \sqrt{f/2} \cdot \left( Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right) \right]};$$

$$Re \leq 2300 \quad Nu_L = \left[ 3.66^3 + 0.7^3 + \left( 1.615 \sqrt{Re \cdot Pr \cdot \frac{D}{L}} - 0.7 \right)^3 + \left( \frac{2}{1 + 22 \cdot Pr} \right)^{\frac{1}{6}} \cdot \left( Re \cdot Pr \cdot \frac{D}{L} \right)^{0.5} \right]; (4)$$

$$4000 \geq Re > 2300 \quad Nu_{TL} = Nu_{L,2300} + \frac{(Nu_{T,4000} - Nu_{L,2300}) \cdot (Re - 2,300)}{4,000 - 2,300}.$$

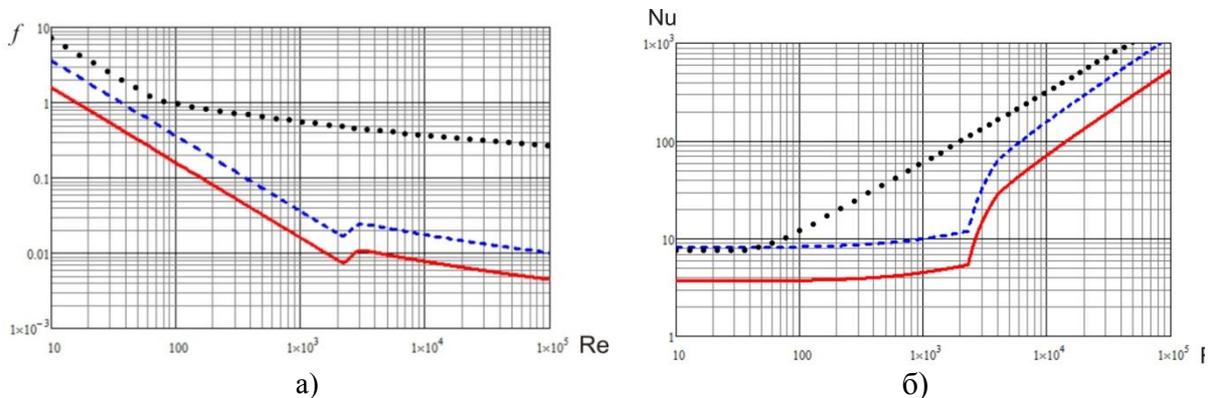


Рисунок 2 – Зависимость гидравлического сопротивления (а) и теплоотдачи (б) для каналов различных типов: сплошная линия – гладкая труба; пунктирная линия – труба с интенсификацией теплообмена; точечная линия – каналы ПТА

На рис. 2а можно увидеть, что значения коэффициента гидравлического сопротивления  $f$  гораздо больше для каналов ПТА, чем для гладких труб и труб с искусственной шероховатостью, что может быть вызвано более высокими значениями теплоотдачи (рис. 2б). При числах Рейнольдса меньше 50, значения числа Нуссельта примерно одинаково для каналов ПТА и труб с шероховатостью ( $Nu = 7.54$ ), после чего возрастает. В самом широком месте число Нуссельта в 20 раз больше для каналов ПТА, чем для гладкой трубы, после чего расстояние между кривыми сокращается, и при  $Re = 10000$  значения для каналов ПТА больше только в 4 раза.

Для определения зависимости требуемой площади теплопередающей поверхности и необходимой длины канала от гидравлического диаметра по стороне холодного теплоносителя (рис. 3), пользовались соотношением «уравнения скорости теплоносителя» [4] в теплообменной поверхности для скорости течения в канале (5), необходимой площади поверхности теплообмена (6) и отношением длины канала к гидравлическому диаметру (7).

$$W_2 = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot \Delta P_2 \cdot \alpha_2(W_2)}{c_{p2} \cdot \rho_2^2 \cdot NTU \cdot f_2(W_2)}} \quad (5)$$

$$F = \frac{Q}{\Delta T_{ln} \alpha_2} \quad (6)$$

$$\frac{L}{D_h} = \frac{\Delta P_2}{2 \cdot W_2^2 \cdot \rho_2 \cdot f_2} \quad (7)$$

где индекс  $i = 2$  (холодный теплоноситель);  $\alpha_2(W_2)$  и  $f_2(W_2)$  – функциональные зависимости для коэффициента теплоотдачи,  $[Вт/(м^2 \cdot ^\circ C)]$ , и гидравлического сопротивления от скорости теплоносителя  $W_2$ , м/с;  $c_p$  – удельная теплоемкость,  $[Дж/(кг \cdot ^\circ C)]$ ;  $\rho$  –

плотность теплоносителя,  $\text{кг/м}^3$ ;  $\Delta T_{\text{ln}}$  – средний температурный напор,  $[\text{°C}]$ ,  
 $\Delta T_{\text{ln}} = (\Delta T_{\text{b}} - \Delta T_{\text{m}}) / \ln(\Delta T_{\text{b}} - \Delta T_{\text{m}})$ ;  $\Delta T_{\text{b}} = T_1 - T_4$ ;  $\Delta T_{\text{m}} = T_2 - T_3$ .

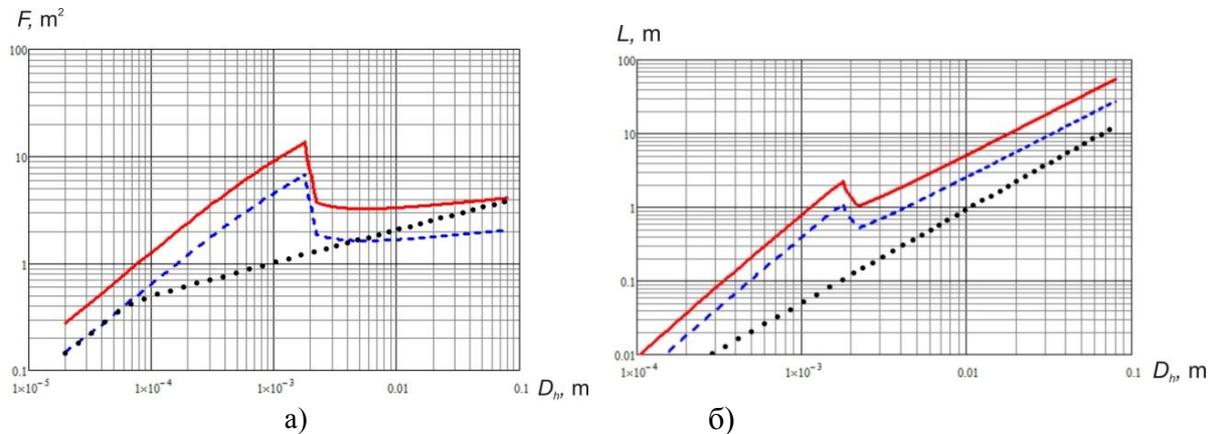


Рисунок 3 – Зависимость площади поверхности теплопередачи (а) и длины канала (б) от гидравлического диаметра для каналов различных типов: сплошная линия – гладкая труба; пунктирная линия – труба с интенсификацией теплообмена; точечная линия – каналы ПТА

Разный характер зависимости площади поверхности теплопередачи от гидравлического диаметра (рис. 3а) обусловлен сменой режимов течения в каналах. Для гладких труб при  $D_h$  более 2.5 мм, площадь поверхности теплопередачи  $F$  изменяется на 20 %, принимая значения от 3.3 до 4  $\text{м}^2$ . Это соответствует значениям  $Re > 4000$ , или же верхней части переходного и развитому турбулентному режиму в гладких трубах. Подобная зависимость наблюдается и для труб с искусственной шероховатостью, но необходимая поверхность теплопередачи примерно в два раза меньше от 1.6 до 2  $\text{м}^2$ . Для каналов ПТА характер зависимости отличается, и при  $D_h = 80$  мм их применение по сравнению с трубами нецелесообразно. Необходимая площадь поверхности теплопередачи уменьшается с уменьшением гидравлического диаметра канала. При  $D_h = 8$  мм площадь поверхности теплопередачи ПТА становится такой же, как и для труб с интенсификацией теплообмена, а для меньших значений гидравлического диаметра даже меньше. Так, для  $D_h = 1.9$  мм, необходимая площадь поверхности для каналов ПТА в 10 раз меньше, чем для гладких труб, и в 2 раза меньше, чем для труб с интенсификацией теплопередачи. С уменьшением гидравлического диаметра, длина поверхности теплопередачи также уменьшается (рис. 3б). Для каналов ПТА необходимая длина канала обычно меньше, чем для труб, и поэтому в пластинчатых теплообменных аппаратах можно использовать пластины с малой длиной.

Представленные результаты демонстрируют зависимости для одного случая. При изменении параметров процесса, абсолютные значения тепло-гидравлических характеристик и геометрических размеров каналов тоже меняются, однако характер зависимости остается неизменным. Поэтому можно сделать выводы об эффективных способах повышения компактности теплообменного оборудования с каналами различной формы, что, в свою очередь зависит от конструкции аппарата и возможности организовать движение теплоносителей в каналах малой длины и с малым гидравлическим диаметром.

**Выводы.** При выборе типа теплообменной поверхности в аппарате необходимо начинать с тепло-гидравлического расчета теплообменного аппарата. При этом применение теплообменных поверхностей с интенсификацией теплообмена может значительно уменьшить необходимую площадь поверхности теплообмена для тех же рабочих условий. При разных значениях гидравлического диаметра при прочих равных условиях тепло-гидравлические характеристики для каналов ПТА, гладких труб и труб с искусственной шероховатостью существенно отличаются. Как правило, при уменьшении гидравлического диаметра, уменьшаются не только геометрические размеры аппарата, но также и необходимая поверхность теплопередачи. При этом уменьшается и число Рейнольдса для тех же рабочих условий процесса, а также необходимая длина канала. Для поверхностей с интенсификацией теплообмена (каналы ПТА и трубы с интенсификацией теплообмена) необходима меньшая длина канала при больших значениях коэффициента гидравлического сопротивления, что дает возможность применять более компактные конструкции аппаратов. Выбор вида теплообменной поверхности и гидравлического диаметра зависит от возможности организации движения теплоносителей в теплопередающих каналах необходимой длины, что обусловлено конструктивными особенностями теплообменных аппаратов.

Авторы благодарят Европейское сообщество за финансовую поддержку в рамках проекта EC DISKNET (Grant Agreement No: PIRSES-GA-2011-294933).

#### Литература

1. Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation. / Klemes J.J., Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyansky L.: CRC Press, 2015. – 354 p.
2. Law R., Harvey A., Reay D. Opportunities for low-grade heat recovery in the UK food processing industry // Applied Thermal Engineering.– 2013. – Т. 53, № 2. – P. 188–196.
3. Chapter 2 – Process intensification – an overview // Process Intensification / Reay D. и др. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2008. – P. 21–45.
4. Kays W. M., London A.L. Compact heat exchangers // Book Compact heat exchangers / Editor. – New York: McGraw-Hill Book Co, 1964. – P. 272.
5. Fundamentals of Heat Exchanger Design. / Shah R. K., Seculic D. P. – New York: Wiley and sons Ltd, 2003.
6. Kapustenko P.O., Kukulka D.J., Arsenyeva O.P. Intensification of Heat Transfer Processes // Chemical Engineering Transactions. – 2015. – Т. 45. – P. 1729–1734.
7. Churchill S.W. Friction factor equation spans all fluid flow regimes // Chemical Engineering. – 1977. – Т. 84, № 24. – P. 91–92.
8. Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyansky L., Khavin G. The influence of plate corrugations geometry on plate heat exchanger performance in specified process conditions // Energy. – 2013. – Т. 57. – С. 201-207.
9. Arsenyeva O.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Demirskiy O.V. Generalised semi-empirical correlation for heat transfer in channels of plate heat exchanger // Applied Thermal Engineering. – 2014. – Т. 70, № 2. – P. 1208–1215.
10. Gnielinski V. Heat transfer coefficients for turbulent flow in concentric annular ducts // Heat Transfer Engineering. – 2009. – Т. 30, № 6. – P. 431–436.

УДК 66.045.01

Перевертайленко О.Ю., Товажнянський Л.Л., Болдирев С.О., Краячич Г.,  
Капустенко П.О., Арсеньева О.П., Арсеньев П.Ю.

**ПОРІВНЯННЯ КАНАЛІВ КОМПАКТНИХ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ ДЛЯ  
УТИЛІЗАЦІЇ НИЗКОПОТЕНЦІЙНОГО ТЕПЛА  
ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ**

Компактні теплообмінні апарати дедалі більше застосовуються в промисловості внаслідок низької матеріалоемності та вартості, високої надійності теплообмінного обладнання та інтенсифікації процесів теплообміну в каналах. Підвищення компактності обладнання треба враховувати вплив розмірів каналів на тепло-гідравлічні характеристики апаратів. У статті представлений аналіз зміни коефіцієнту гідравлічного пору та тепловіддачі від числа Рейнольдса для каналів пластинчастих теплообмінних апаратів, гладких труб та труб з штучною нерівністю поверхні. Наведено дослідження впливу гідравлічного діаметру для різних типів каналів на компактність теплообмінного апарату, при цьому аналіз проводився для площі теплообмінної поверхні та довжини каналу для руху теплоносія. Результати роботи можуть бути використані при розробці конструкцій компактних теплообмінних апаратів з інтенсифікацією теплообміну для процесів утилізації низкопотенційного тепла.

Perevertaylenko O., Tovazhnyansky L., Boldyryev S., Krajacic G., Kapustenko P.,  
Arsenyeva O., Arsenyev P.

**COMPARISON OF CHANNELS OF COMPACT HEAT EXCHANGERS  
FOR LOW-GRADE HEAT UTILIZATION IN INDUSTRY**

Compact heat exchangers are widely used in industry due to the low material consumption and its cost, high reliability of the heat transfer equipment and intensified heat transfer processes in the channels. When increasing the equipment compactness it is needed to take into consideration the influence of the changed channel geometry on heat and hydraulic performance of the unit. The paper provides the analysis of dependences for friction factor and heat transfer coefficient on Reynolds number for different types of channels – channels in plate heat exchangers, smooth tubes and enhanced tubes with artificial roughness. The paper provides the study of the influence of hydraulic diameter for the channels of different types on the heat exchanger compactness regarding the heat transfer surface area and the length of the channel for heat carrier movement. The results of the work can be implemented for compact heat exchangers design with the intensified heat transfer used for low-grade heat utilization of industrial enterprises.

УДК 681.518.3

Демирский А.В., Илюнин О.О., Перевертайленко А.Ю., Селяков А.М., Шамраев А.А.,  
Чайников С.И., Илюнин А.В.

## НЕЧЕТКАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ КОМПОНЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ

**Введение.** Критериями эффективности функционирования непрерывных технологических процессов (ТП) являются производительность, удельная энергоемкость и ресурсоемкость. Устойчивость тепловых и химических систем, таких как непрерывные травильные агрегаты (НТА), коммунальные систем теплоснабжения (СТС), ограничивается предельно допустимыми концентрациями (ПДК) определенных компонентов, которые присутствуют и/или образуются в ходе ТП. Превышение ПДК провоцирует отложение солевых соединений в пластинчатых теплообменных аппаратах (ПТА), ухудшает теплопередачу, увеличивает расходы на перекачивание рабочих сред через ПТА. Это требует дополнительных затрат на очистку теплообменников, трубопроводов и травильных ванн, что снижает эффективность ТП. Как правило, процесс изменения  $C_i$  – массовой концентрации  $i$ -го соединения в рабочем растворе и превышения ПДК негативно влияет на ТП в целом. В частности, в отечественной металлургии традиционно применяют сернокислотные травильные растворы  $H_2SO_4$ , нагреваемые в ПТА. Со временем в растворе образуется моногидрат сульфата железа  $FeSO_4 \cdot H_2O$ , который в случае превышения ПДК при определенных концентрации травильного раствора  $C$  и температуре  $t$ , выделяется на стенках травильных ванн и поверхностях теплообмена замедляя ТП вплоть до остановки. Отложение кальциевых соединений сульфата натрия на поверхностях ПТА в СТС также существенно снижает эффективность теплоснабжения, приводя к сверхнормативным затратам энергии. Заключительной стадией многих ТП, таких как производство сахара, является кристаллизация/осаждение конечного продукта при достижении им определенной концентрации  $C$  в растворе. Задача разработки недорогих средств оперативного контроля ПДК компонентов в технологических растворах является актуальной и имеет практическую ценность для повышения эффективности ТП, оперативности контроля и общего государственного курса на энергосбережение.

**Анализ состояния проблемы.** Классические модели рассматривают появление и рост депозита солевой кристаллизации как функцию концентрации солей, умноженную на функцию Аррениуса температурной зависимости. Многочисленные математические модели кристаллизации солей в растворах зачастую не позволяют с достаточной точностью предсказать развитие процесса. Основным недостатком этих моделей является отсутствие в каждом конкретном случае какой-либо информации о входящих в соотношения значениях постоянных величин.

В настоящее время большинство практических реализаций измерения ПДК солей в технологических растворах используют либо химическое титрование прямой пробы, либо методы неразрушающего контроля (НК), но они имеют существенный недостаток, а именно – избирательность к конкретной компоненте. Электрический метод НК, обладающий высокой чувствительностью, крайне малой инерционностью и относительной простотой приборной реализации, является одним из наиболее информативных. Широкие возможности для оперативного контроля концентрации электролитов в

растворах (например, сульфата железа в растворе серной кислоты) открывает использование метода прямой кондуктометрии. Но использование ионселективных электродов, кондуктометров дают возможность измерить общий рН в температурном диапазоне раствора 5–80 °С, и не позволяет определить концентрацию отдельных компонентов в агрессивной сернокислой среде. Кроме этого, случайное попадание в растворы несистемных компонентов снижают достоверность и точность измерений. Поляриметры измеряют угол поворота поляризации эталонного излучения после прохождения через оптическую кювету с анализируемым раствором. При наличии оптически активного компонента в исследуемом растворе, поляризация прошедшего через кювету излучения повернута на некоторый угол, величина которого определяет концентрацию  $C$  исследуемого компонента. Но эти приборы также имеют относительно низкую чувствительность, которая существенно зависит от амплитуды светового сигнала (интенсивности источника излучения или прозрачности исследуемого раствора) [1]. Высокопроизводительные ультразвуковые измерительные системы, предназначенные для измерения концентрации и плотности многокомпонентных неорганических растворов, провоцируют непрогнозируемую кристаллизацию компонентов, излишнее присутствие которых в растворах ускоряет процесс старения раствора, снижает его качество, и, тем самым уменьшает эффективность ТП, нарушает его регламент и режим, например, на Мариупольском металлургическом комбинате им. Ильича, концентрация  $FeSO_4 \cdot H_2O$  ограничена  $sup(c(t))= 2\div 4\%$  в зависимости от режимного регламента  $C$  и  $t$  и режима ТП.

**Постановка задачи и цель работы.** Задачей, следующей из описанной проблемы, является повышение точности оперативных измерений концентраций компонентов в растворах и чувствительности регистрирующей системы на основе автоматизации процесса измерения. Целью настоящей работы является разработка методики оценивания концентрации системы компонент в технологических растворах с широким полем применения на примере ТП сернокислотного травления углеродистой стали, реализуемой практически в виде несложной измерительной микроконтроллерной системы, что позволит повысить эффективность ТП.

В работе предложен альтернативный классическим аналитическим методам подход, основанный на математическом аппарате булевой и нечеткой логики.

**Особенности ТП непрерывного травления стали.** Дополнительную сложность создает то, что вещество, соответствующее формуле  $FeSO_4$  и образующееся как побочный продукт ТП, в травильном растворе присутствует в виде трех компонент-соединений [2], в зависимости от температуры образования –  $t_f$  (таблица 1).

Таблица 1 – Характеристики  $n$ -гидратов сульфата железа

Формула соединения	Цвет кристалла	$t_f, ^\circ C$	LR-интервал RGB-кода цвета соединения		
			$R_{L-R}$	$G_{L-R}$	$B_{L-R}$
$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	Голубовато-зеленый	-1,82÷56,8	81÷145	147÷183	81÷111
$FeSO_4 \cdot 4H_2O$	Зеленый	56,8÷64	0÷2	125÷128	64÷82
$FeSO_4 \cdot H_2O$	Прозрачный	$\geq 64$	245÷255	245÷255	245÷255
$Fe_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$	Желтоватый	$\geq 20$	252÷252	235÷243	84÷163

Кристаллогидраты сульфатов железа (III)  $Fe_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$ , где  $n = 12, 10, 9, 7, 6, 3$  образуют светло-желтый фон травильного раствора. Из таблицы 1 видно, что цвета компонентов детерминированы и не пересекаются в RGB-пространстве.

На эффективность работы НТА, при прочих постоянных значениях  $t^\circ C$  и скорости прокачиваемых сред  $q$  влияет изменение концентрации  $FeSO_4$  в растворе  $\Delta C$ . Аналогичная ситуация имеет место с образованиями в рабочих растворах теплоносителей СТС соединений вида  $Ca \cdot Na \cdot SO_4$  в желто-коричневой гамме, однако их характеристики в источниках противоречивы. Изменения концентрации компонентов в растворах  $\Delta C$ , оцениваемые с помощью нечетких интервалов, являются влиятельным возмущающим фактором неопределенности для ТП.

Динамический процесс травления стали можно охарактеризовать временной монотонной функцией  $C_{FeSO_4}(t)$ , неубывающей на отрезке  $(0; t_0)$  и ограниченной сверху величиной  $sup(c(t))=c_s$ . При достижении соединением в растворе ПДК  $C_{FeSO_4}(t_0) = c_s$  система перестает функционировать или становится неэффективной [3]. Управляющее воздействие при таких входных параметрах – освежение раствора (рис.1) – часть его подается из травильных ванн на регенерацию с замещением свежим раствором до достижения регламентированной величины  $C_{FeSO_4}(t_0) = c_0$ .

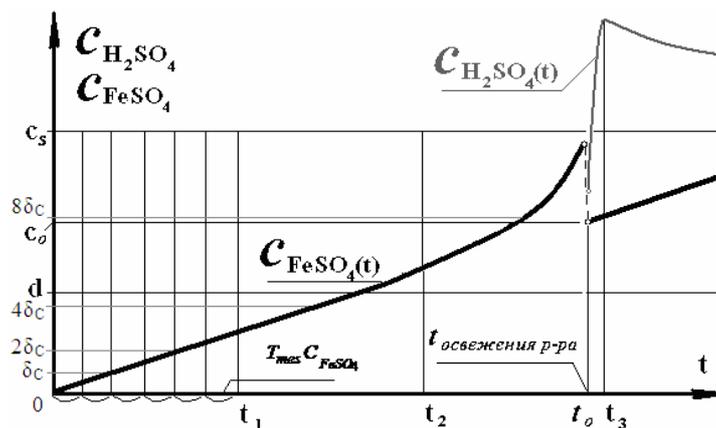


Рисунок 1 – Освежение травильного раствора

Суть предлагаемой методики состоит в следующем. В «узкий» участок ТП имплементируются: источник излучения определенного спектра, зависящего от оптических свойств компонентов раствора, размещаемый под кюветой; оптическая кювета для раствора, промываемая пред каждым измерением с периодом  $T_{mes}$ ; дозатор; цифровой фоторегистратор-анализатор с каналом передачи данных (USB, RS-232), формирующий графические файлы .JPG и .BMP. Переданные файлы обрабатываются в системе компьютерного распознавания изображений. Изначально система, разработанная специалистами ХНУРЭ предназначалась для идентификации состава клинкер-цемента.

Система распознавания изображений по RGB-коду цвета предназначена (см. рис. 2) для автоматического анализа изображений, классификации каждого пикселя изображения на 4 объекта ( $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ ,  $FeSO_4 \cdot 4H_2O$ ,  $FeSO_4 \cdot H_2O$ , раствор-фон) и автоматического расчета по занимаемой площади: объемной доли объектов анализа в %, массовой доли объектов анализа в %, поверхности на единицу объема,  $cm^2/cm^3$ .



Рисунок 2 – Форма представления результатов анализа системой

Каждому снимку, что эквивалентно состоянию НТА с наличием определенных количеств  $n$ -гидратов сульфата железа соответствует определенная количественная оценка  $\Delta V_k$  наличия  $k$ -того гидрата, площадь которого, занимаемая на изображении, подсчитывается по количеству пикселей с учетом RGB-кода цвета:

$$\Delta V_k = S_k \times V_k(RGB), \quad (1)$$

где  $V_k(RGB)$  – индикативная булева переменная со значениями 0 или 1, описывающая принадлежность пикселя  $k$ -му кластеру цвета в соответствии с LR-интервалом RGB-кода цвета (см. табл.1),  $S_k$  – число пикселей, попадающих в  $k$ -й кластер цвета, определяемое результатами анализа системой файла изображения.

Система может последовательно анализировать до 256 изображений с разрешением 1024 dpi, запоминать их в отдельной таблице и представлять накопленные данные (если их более 5) в форме графиков дисперсии, является обучающейся системой настраиваемыми эталонами цветов и дополняемой базой правил логического вывода, определяющей построение нечеткой модели:

$$V_k \rightarrow C_k. \quad (2)$$

**Формирование базы эталонов изображений** компонент раствора ( $n$ -гидратов сульфата железа) в определенной концентрации может происходить двумя способами. Первый способ, приведенный в [3], – извлечение данных непосредственно в ходе ТП с одновременными тестовыми сериями измерений концентрации компонентов раствора эталонными приборами и методами: титрование, взвешивание сухого остатка и т.д., – с последующей обработкой набранных статистик. Второй, предлагаемый авторами, – анализ серии лабораторных имитационных экспериментов с точностью  $\delta_{lab}$  и учетом аддитивной природы и монотонности функции  $C_{FeSO_4}(t)$  и требуемой точности ее измерения  $\delta_C \gg \delta_{lab}$ .

В ходе набора экспериментальных данных осуществляется формирование двоичных эталонов изображений технологического раствора в точках модели  $(V_i, C_i)$  с концентрациями интересующей компоненты  $C_1 = \delta_C, C_2 = 2\delta_C, C_3 = 4\delta_C, C_4 = 8\delta_C$ , и т.д. до значения  $sup(c(t)) = c_0$ , определяя границы классов (см. рис. 1):

$$C_0 \leq 2^{n-1} \cdot \delta_C. \quad (3)$$

Двоичная (бинарная) организация базы эталонов обеспечивает минимизацию количества эталонов-классов, с помощью которых можно оперативно оценивать концентрацию компонент растворов с требуемой точностью  $\delta_C$ , используя отображение (2). Также аддитивно-разностная комбинация эталонов позволяет сформировать любое значение на отрезке  $(0; C_0)$  с точностью  $\delta_C$  [4]. Метод прямого дихотомического поиска (ДП) на упорядоченном массиве данных является простейшим однопараметрическим методом безусловной оптимизации. Он широко известен и применяется для решения измерительных задач в ТП. Например, при калибровке сопротивления монокристаллов в полупроводниковой промышленности и проводимости сверхпроводников в цветной металлургии с заданной точностью [5]. С учетом точности подсчета пикселей 0,005% в файле изображения раствора и того, что  $\delta_C \gg \delta_{lab}$ , модель (2) относится к однопараметрическим однозначным моделям Мамдани. ДП текущего значения  $C$  с требуемой точностью  $\delta_C$  на монотонной функции  $C(t)$  представляет собой процесс отнесения текущего значения  $V(t)$  к  $i$ -му классу, формируемому подбором комбинации из имеющихся двоичных эталонов, такому что

$$V_{i-1} \leq V(t) \leq V_i, \quad (4)$$

причем,

$$C_i - C_{i-1} = \delta_C. \quad (5)$$

В общем случае, оперативность идентификации текущего значения  $V(t)$  при организации классов общим количеством  $M$  (с областями значений  $C_n = ((n-1)\delta_C; n\delta_C)$ , где  $n=1, 2, \dots, M$ ), оценивается числом операций сравнения  $M = C_0 / \delta_C$ , тогда как для ДП этот показатель будет  $\log_2 M$ .

**Интерполяция внутри класса**, для повышения точности оценки параметра  $C(V(t))$ , осуществляется с помощью Гауссовой функции принадлежности FCM-методом (Fuzzy Classifier Means) [6]. При этом  $V_i$  и  $V_{i-1}$  принимаются как центры соседних кластеров. Текущее значение  $V(t) = x$  относят к  $i$ -му классу по критерию минимума Евклидова расстояния от оцениваемого объекта до центра  $i$ -го кластера  $V_i$ :

$$d_{ij} = \|x_j - V_i\| = \sqrt{\sum_{l=1}^n (V_{l,i} - x_{l,j})^2}, \quad (5)$$

где  $V_i$  – координата центра кластера относительно оси  $OX_i$  в пространстве  $X_n$ ;  $x_j$  – координата классифицируемого объекта относительно оси  $OX_i$ .

Представление  $C_i^*$  в окрестности точки  $v_i = v_i \pm \delta$  с использованием Гауссовой функции принадлежности имеет вид:

$$C_i^*(v_i) = \frac{\sum_{j=1}^n C_j \cdot \exp\left[\frac{-(v_i - v_j)^2}{2\delta^2}\right]}{\sum_{j=1}^n \exp\left[\frac{-(v_i - v_j)^2}{2\delta^2}\right]}, \quad (6)$$

где  $(v_j, c_j)$  – точки реально проведенных и лабораторных измерений,  $\delta$  – настраиваемая величина отклонения функции принадлежности к кластеру, которой обычно присваивают значение в интервале  $\frac{1}{5} \div \frac{1}{3}$  минимального расстояния до центра ближайшего кластера [6].

**Особенности процесса проведения идентификации** могут вносить оптические свойства компонентов растворов. Так, подсчет пикселей  $FeSO_4 \cdot H_2O$ , который является прозрачно-белым по цвету, можно осуществлять на не белом фоне по яркостной компоненте, формула перехода к которой представлена в [7]

$$Y = R * 0.299 + G * 0.587 + B * 0.114, \quad (7)$$

где  $Y$  – яркость в оттенках серого цвета; RGB – цветовые составляющие в диапазоне 0÷255.

Для работы с растворенными в прозрачных растворах сахарами используют индикативные подсветки фоновых растворов или поляризметрические лазерные устройства с особыми частотами для различимости кристаллов в фоновом растворе.

**Выводы.** Представленный подход является универсальным и достаточно простым в реализации для отдельных ТП, позволяет нечетко определять концентрацию компонент технологического раствора с заданной точностью. Зависимости, полученные при наработке экспериментальной базы лабораторных измерений, можно использовать для разработки программного обеспечения конвертера измеряемых физических свойств компонент раствора (цвет, площадь) в данные о концентрации этих компонент и реализовать в виде микроконтроллерной измерительной системы с целью повышения степени автоматизации измерений ТП

### Литература

1. Отто, М. Современные методы аналитической химии / М. Отто. – Москва: Техносфера, 2006. –544 с.
2. Сайт о химии. <www/ URL: [http:// www.xumuk.ru/encyklopedia/1519.html](http://www.xumuk.ru/encyklopedia/1519.html)>
3. О. Pyunin\*, О. Rudenko, О. Selyakov, О. Sotnikov, О. Arsenyeva, О. Perevertaylenko, А. Shamraev, М. Trubitsyn, Increasing the Life Cycle of Process Liquid Solutions for Resource Efficiency and Harmful Waste Reduction, Proceedings of the 10th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, SDEWES2015.1096, 1–139 (2015).
4. Аоки, М. Введение в методы оптимизации. /М. Аоки.– Москва: Наука, 1977.– 344 с.
5. Близнюк В.Г., Горелов С.П., Илюнин О.О., Петренко В.Р., Руднева Л.В., Сергейчук В.В. Авторское свидетельство СССР на изобретение № 1568051, кл. G 06 F 15/20, 1988 «Устройство для обработки результатов измерений линейных неоднородных материалов», опублик. 30.05.1990, бюл. №20 – 5 с.
6. Piegat, A., Fuzzy Modeling and Control, Physica-Verlag, A Springer-Verlag Company, Heidelberg, 798 p., 2011.
7. David Salomon, Data compression – The Complete Reference, 4th Edition. Springer 2007, ISBN 978-1-84628-602-5, pp. I–XXV, 1–1092.

Bibliography (transliterated)

1. Otto, M. *Sovremennyye metody analytycheskoy khimiyi*. M. Otto. –Moskva: Technosphaera, 2006. –544 с.
2. Site o khimyyie. <www/ URL: [http:// www.xumuk.ru/encyklopedia/1519.html](http://www.xumuk.ru/encyklopedia/1519.html)>
3. O. Ilyunin\*, O. Rudenko, O. Selyakov, O. Sotnikov, O. Arsenyeva, O. Perevertaylenko, A. Shamraev, M. Trubitsyn, Increasing the Life Cycle of Process Liquid Solutions for Resource Efficiency and Harmful Waste Reduction, Proceedings of the 10th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, SDEWES2015.1096, 1–139 (2015).
4. Aoki, M. *Vvedeniye v metody optimizatsiyie*. M. Aoki.– Moskva: Nauka, 1977.– 344 p.
5. Bliznyuk V.G., Gorelov S.P., Iyunin O.O., Petrenko V.R., Rudneva L.V., Sergeychuk V.V. *Avtorskoye svidetelstvo USSR na isobreteniyie # 1568051, cl. G 06 F 15/20, 1988 «Ustroystvo dlya obrabotki rezultatov ismereniy lineynyih neodnorodnyih materilov», opublik. 30.05.1990, byul.#20 – 5 p.*
6. Piegat, A., *Fuzzy Modeling and Control*, Physica-Verlag, A Springer-Verlag Company, Heidelberg, 798 p, 2011.
7. David Salomon, *Data compression – The Complete Reference, 4th Edition*. Springer 2007, ISBN 978-1-84628-602-5, pp. I–XXV, 1–1092.

УДК 681.518.3

Демірський О.В., Ілюнін О.О., Перевертайленко О.Ю., Селяков О.М., Шамраєв А.А.,  
Чайніков С.І., Ілюнін А.В.

**НЕЧІТКА ІНТЕРПОЛЯЦІЯ КОНЦЕНТРАЦІЇ КОМПОНЕНТІВ  
ТЕХНОЛОГІЧНИХ РОЗЧИНІВ**

Запропоновано процедуру бінарної кластеризації вхідного параметру – площини поверхні розчину, яку займає компонент, та наступного нечіткого визначення вихідного значення концентрації компонентів технологічних розчинів за допомогою Гаусівських функцій належності.

Demirskyy A.V., Ilyunin O.O., Perevertaylenko O.Yu., Selyakov O.M., Shamraev A.A.,  
Chaynikov S.I., Ilyunin O.V.

**FUZZY INTERPOLATION OF THE CONCENTRATION  
OF PROCESS SOLUTIONS COMPONENTS**

A binary clustering procedure of input parameter – the solution surface, which component covers, and a subsequent fuzzy determination of the output concentration value of the technological solutions components by help of Gauss membership functions is proposed.

Дорофеев Ю.И.

## **ЗАДАЧИ И МЕТОДЫ ОГРАНИЧЕННОГО РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАПАСАМИ В СЕТЯХ ПОСТАВОК В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ**

**Введение.** Управление запасами материальных ресурсов является необходимой основой производственной и коммерческой деятельности предприятий независимо от их формы собственности, поскольку запасы представляют собой один из важнейших факторов обеспечения непрерывности процессов материального воспроизводства в условиях нестабильной внешней среды. Нехватка производственных запасов влечет нарушение ритмичности производства, снижение производительности труда, перерасход материально-технических ресурсов из-за вынужденных нерациональных замен и, как следствие, повышение себестоимости выпускаемой продукции, а наличие неиспользуемых запасов увеличивает затраты на их содержание. Таким образом, определение оптимального уровня запасов и разработка оптимальной стратегии их пополнения является весьма актуальной задачей.

В настоящее время на практике получили распространение многоуровневые системы размещения запасов, характерные для дилерских сетей, сетевых ритейлеров, транснациональных компаний и технологически сложных производств. Существуют различные типы топологии подобных систем, которые определяются взаимным размещением производственных звеньев, промежуточных складов и потребителей. Если некоторые виды сырья или полуфабрикатов используются в нескольких процессах, проходящих одновременно, система приобретает эшелонированную структуру, вследствие чего рассматриваемые системы называют сетями поставок.

В таких системах каждый узел сети в реальном времени принимает заказы от узлов, являющихся потребителями его продукции, а также от внешних потребителей, и формирует заказы узлам, которые являются для него поставщиками ресурсов. Управление запасами заключается в определении размеров заказов на их восполнение и моментов времени формирования заказов.

Анализ различных подходов к управлению запасами можно найти в работе [1] и обширной библиографии к ней. Среди многообразия моделей управления запасами выделяют два основных типа: модель критических уровней и модель периодической проверки. В первом случае предполагается непрерывный контроль за состоянием запасов и размещение заказов фиксированного размера при снижении текущих запасов до некоторых критических уровней. Второй тип модели предполагает проверку уровня запасов через равные промежутки времени и размещение заказа, размер которого определяется в соответствии с выбранной стратегией. В данной работе рассматривается модель периодической проверки, которая наиболее часто реализуется в сетях поставок, где предусмотрен периодический контроль состояния ресурсов.

С точки зрения теории управления объемы спроса, поступающие на узлы сети из внешней среды, целесообразно рассматривать в качестве внешних возмущающих воздействий. Выбор стратегии управления запасами определяется характером внешнего спроса. На практике зачастую нет оснований для того, чтобы рассматривать спрос в качестве случайных, либо гармонических, либо убывающих с течением времени внешних возмущений – какая-либо дополнительная информация, кроме той, что внешний спрос является ограниченным, отсутствует. Поэтому в условиях неопределенности спроса

часто используется концепция «неизвестных, но ограниченных» воздействий [2], при этом соответствующая модель спроса характеризуется интервальной неопределенностью. Тогда задача управления запасами может быть сформулирована как задача подавления влияния неслучайных ограниченных внешних возмущений, методы решения которой рассмотрены в работе [3]. Одним из подходов к данной проблематике в теории робастного управления является концепция инвариантных множеств [4], среди которых особо выделяются эллипсоиды вследствие их простой структуры и прямой связи с квадратичными функциями Ляпунова.

Другим источником неопределенности в задачах управления запасами является наличие транспортных запаздываний, обусловленных задержками в пополнении запасов относительно моментов формирования заказов. Предполагается, что номинальные значения длительности транспортировки и переработки ресурсов в узлах сети известны. Однако, в процессе функционирования сети поставок эти параметры могут отличаться от своих номинальных значений. В результате возникает необходимость обеспечения робастности системы управления запасами относительно вариаций указанных параметров.

Особенностью рассматриваемой задачи является необходимость учета ограничений на объемы хранилищ и размеры заказов. В теории управления традиционно рассматривают ограничения на векторы переменных задачи, заданные в какой-либо норме. Однако, для задач управления запасами характерно требование неотрицательности значений переменных, что приводит к необходимости учета несимметричных ограничений на значения управляющих воздействий и состояний.

Одним из наиболее распространенных подходов к синтезу ограниченного стабилизирующего управления является построение квадратичной функции Ляпунова и использование техники линейных матричных неравенств (ЛМН). Основным недостатком такого подхода является консерватизм полученных результатов [5], который проявляется в том, что с практической точки зрения получаемые границы робастности оказываются неоправданно заниженными. Причиной является использование единой функции Ляпунова для всех возможных вариантов реализации неопределенности модели системы и внешних воздействий.

Для преодоления указанного недостатка используют параметризованную функцию Ляпунова [6]. Однако, при этом полученные ЛМН содержат произведение нестационарной матрицы динамики системы на матрицу, которая участвует в построении функции Ляпунова. Использование дескрипторного подхода [7] позволяет добиться разделения матрицы динамики системы и матрицы Ляпунова, что ведет к существенному уменьшению степени консерватизма результатов синтеза управления.

Большинство процедур, разработанных для анализа и синтеза систем управления запасами в последние десятилетия, используют централизованный подход, когда вся информация о текущем состоянии системы передается на единый регулятор, формирующий управляющие воздействия для всех узлов. Для решения задач управления запасами в сетях поставок перспективным представляется децентрализованный подход, при котором исходная оптимизационная задача заменяется набором локальных задач меньшей размерности, решаемых параллельно и независимо друг от друга. Однако, при этом возникает необходимость обеспечения робастной устойчивости системы в целом с учетом наличия взаимосвязей.

Целью работы является синтез робастной стратегии управления запасами гарантированной стоимости, которая может использоваться для определения в каждый момент времени размеров заказа ресурсов с учетом несимметричных ограничений на их

значения в виде функции от уровней запаса ресурсов в узлах системы и позволяет удерживать состояния в ограниченном компактном множестве при любых допустимых значениях внешнего спроса в условиях неопределенности значений транспортных запаздываний.

**Постановка задачи.** Для математического описания управляемой сети поставок используется дискретная модель в пространстве состояний, уравнения которой описывают изменение уровня запасов каждого вида ресурсов с течением времени. В качестве переменных состояний рассматриваются наличные уровни запаса ресурсов. Управляющими воздействиями являются размеры заказов на поставку ресурсов, формируемые узлами в текущем периоде. Размеры спроса на ресурсы, поступающие из внешней среды, выступают в качестве внешних возмущений [8].

Для описания запаздываний используется модель дискретной задержки, поскольку предполагается, что номинальные значения длительности транспортировки и переработки ресурсов известны и кратны некоторому периоду дискретизации. Также предполагается, что структура сети известна, а состояния доступны непосредственному измерению. Тогда математическая модель сети поставок задается разностным уравнением с запаздыванием

$$x(k+1) = x(k) + \sum_{t=0}^{\Lambda} B_t u(k-t) + Ed(k), \quad (1)$$

где  $k = 0, 1, \dots$  – номер дискретного интервала;  $x(k) \in \mathbb{R}^n$  – вектор состояний;  $u(k) \in \mathbb{R}^m$  – вектор управляющих воздействий;  $d(k) \in \mathbb{R}^q$  – вектор внешних возмущений;  $\Lambda$  – максимальное значение запаздывания управляемых потоков в сети;  $B_t \in \mathbb{R}^{n \times m}$ ,  $t = \overline{0, \Lambda}$ ,  $E \in \mathbb{R}^{n \times q}$  – матрицы влияния управлений и возмущений, соответственно, методика построения которых изложена в работе [9].

Предполагается, что для каждого узла сети заданы максимально допустимые уровни запаса ресурсов и максимальные размеры заказов. Тогда в процессе функционирования системы должны выполняться ограничения

$$x(k) \in X = \{x \in \mathbb{R}^n : 0 \leq x \leq x^{\max}\}, \quad u(k) \in U = \{u \in \mathbb{R}^m : 0 \leq u \leq u^{\max}\}. \quad (2)$$

Будем предполагать, что внешние возмущения удовлетворяют ограничениям  $d(k) \in D = \{d \in \mathbb{R}^q : 0 \leq d^{\min} \leq d \leq d^{\max}\}$ , где векторы  $d^{\min}$  и  $d^{\max}$  определяют граничные значения спроса и предполагаются известными.

Выполним преобразование модели (1) к стандартному виду без запаздывания на основе расширения вектора состояний [10] путем включения в него векторов, определяющих размеры ранее заказанных ресурсов, находящихся в процессе транспортировки и переработки:  $\xi(k) = [x^T(k), u^T(k-1), u^T(k-2), \dots, u^T(k-\Lambda)]^T$ . Тогда уравнения расширенной модели примут вид

$$\xi(k+1) = A\xi(k) + Bu(k) + Gd(k), \quad x(k) = C\xi(k), \quad (3)$$

где матрицы  $A \in \mathbb{R}^{N \times N}$ ,  $B \in \mathbb{R}^{N \times m}$ ,  $G \in \mathbb{R}^{N \times q}$ ,  $C \in \mathbb{R}^{n \times N}$ ,  $N = n + m\Lambda$  имеют соответствующую блочную структуру [9].

Рассмотрим построение матрицы динамики  $A$  расширенной модели в том случае, когда величины запаздывания управляемых потоков  $\Lambda_i, i = \overline{1, n}$  отличаются от своих номинальных значений. В этом случае матрица становится нестационарной и в каждый момент времени  $k \geq 0$  может принимать какое-либо значение из множества

$$A(\theta) = \left\{ A \in \mathbb{R}^{N \times N} : A = A_0 + \sum_{i=1}^L \theta_i(k) A^{(i)}, \theta(k) \in \Theta \right\}, \quad (4)$$

где  $L = 2^r$ ;  $r$  – количество узлов сети, интервалы запаздывания которых могут варьироваться в процессе работы;  $\theta_i(k), i = \overline{1, L}$  – набор параметров, которые описывают структурную неопределенность модели и удовлетворяют требованиям

$$\Theta = \left\{ \theta \in \mathbb{R}^L : \theta_i(k) \geq 0, \sum_{i=1}^L \theta_i(k) = 1 \right\}. \quad (5)$$

Таким образом, модель сети в условиях неопределенности значений транспортных запаздываний может рассматриваться как выпуклый многогранник, который задается списком вершин  $\left\{ (A^{(1)}, B, G, C), (A^{(2)}, B, G, C), \dots, (A^{(L)}, B, G, C) \right\}$ , и может быть представлена в виде модели с параметрической структурной неопределенностью вида

$$\begin{aligned} \xi(k+1) &= A(\theta)\xi(k) + Bu(k) + Gd(k), \\ x(k) &= C\xi(k), \quad A(\theta) \in \Omega = \text{Co}\{A^{(1)}, \dots, A^{(L)}\}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\text{Co}\{\cdot\}$  – выпуклая оболочка;  $A^{(i)}, i = \overline{1, L}$  –  $i$ -я вершина выпуклого множества  $\Omega$ .

Для синтеза оптимального управления необходимо задать критерий качества системы. Запишем критерий в случае бесконечного временного горизонта в виде

$$J_\infty(k) = \sum_{k=0}^{\infty} \left( (\xi(k) - \xi^*)^T W_\xi (\xi(k) - \xi^*) + u^T(k) W_u u(k) \right), \quad (7)$$

где  $W_\xi \in \mathbb{R}^{N \times N}$ ,  $W_u \in \mathbb{R}^{m \times m}$  – положительно определенные диагональные весовые матрицы;  $\xi^* = \underbrace{[x^{*T}, \dots, x^{*T}]^T}_{\Lambda+1}$  – составной вектор, в котором компоненты вектора  $x^*$  определяют

размеры страховых запасов ресурсов в узлах сети и вычисляются на основании верхних граничных значений внешнего спроса с учетом запаздываний и продуктивной модели Леонтьева в виде

$$x^* = (I_n - \Pi)^{-1} \hat{d}, \quad \hat{d}_i = \begin{cases} \Lambda_i d_i^{\max}, & i = \overline{1, q}, \\ 0, & i = \overline{q+1, n}, \end{cases} \quad (8)$$

где  $\Pi \in \mathbb{R}^{n \times n}$  – продуктивная матрица, значение элемента  $(i, j)$  которой равно количеству единиц ресурса  $i$ , необходимому для производства единицы ресурса  $j$ .

Первое слагаемое в выражении (7) определяет размеры штрафов за отклонение текущих уровней запаса ресурсов от страховых, второе – стоимость производства и транспортировки ресурсов.

Для системы (6) с параметрической неопределенностью (4), (5) рассматривается задача синтеза робастной стратегии управления запасами, которая для любого допустимого спроса  $d(k) \in D \quad \forall k \geq 0$  и  $\forall A(\theta)$  обеспечивает:

- 1) полное и своевременное удовлетворение спроса, то есть выполнение первого из ограничений (2) на значения состояний;
- 2) робастную устойчивость замкнутой системы при ограничениях (2) на значения управлений;
- 3) гарантированную стоимость управления, которая означает, что значение критерия качества (7) не превысит некоторого граничного значения.

В качестве дополнительного условия выдвигается требование снижения степени влияния изменений неопределенного вектора параметров  $\theta(k)$  на результат синтеза управления.

**Синтез робастной стратегии управления запасами на основе техники ЛМН.** Первым этапом решения задачи синтеза управления является аппроксимация множества  $D$  значений внешнего спроса эллипсоидом наименьшего объема, который задается уравнением

$$E(d^*, Q_d) = \left\{ d \in \mathbb{R}^q : (d(k) - d^*)^T Q_d^{-1} (d(k) - d^*) \leq 1 \right\}. \quad (9)$$

Матрица  $Q_d \in \mathbb{R}^{q \times q}$  и вектор  $d^* \in \mathbb{R}^q$  координат центра эллипсоида (9) определяются в результате решения задачи полуопределенного программирования аналогично тому, как это сделано в работе [11].

Затем выполняется аппроксимация множества допустимых значений  $X$  эллипсоидом наименьшего объема  $E(x^*, Q_x) = \left\{ x \in \mathbb{R}^n : (x(k) - x^*)^T Q_x^{-1} (x(k) - x^*) \leq 1 \right\}$ , у которого вектор координат центра совпадает с вектором страховых запасов  $x^*$ , а матрица  $Q_x \in \mathbb{R}^{n \times n}$  вычисляется в результате решения оптимизационной задачи, следуя [11].

Закон управления строится в виде линейной динамической обратной связи по сигналу рассогласования между наличными и страховыми уровнями запаса ресурсов

$$u(k) = K(k)(\xi(k) - \xi^*), \quad (10)$$

где  $K(k) \in \mathbb{R}^{m \times n}$  – нестационарная матрица коэффициентов обратной связи.

Тогда модель системы (6), замкнутой управлением (10), примет вид

$$\begin{aligned} \xi(k+1) &= A_f(k, \theta)(\xi(k) - \xi^*) + A(\theta)\xi^* + Gd(k), \\ x(k) &= C\xi(k), \quad A_f(k, \theta) = A(\theta) + BK(k), \quad A(\theta) \in \Omega. \end{aligned} \quad (11)$$

Задача синтеза управления эквивалентна решению минимаксной задачи

$$u(k) = \arg \min_{u(k) \in U} \left( \max_{d(k) \in E(d^*, Q_d), A(\theta) \in \Omega} J_\infty(k) \right). \quad (12)$$

Определим модифицированную параметризованную функцию Ляпунова (ФЛ), построенную на решениях системы (11), в виде

$$V(\xi(k) - \xi^*) = (\xi(k) - \xi^*)^T P(k, \theta)(\xi(k) - \xi^*), \quad (13)$$

где  $0 \prec P(k, \theta) = P^T(k, \theta) \in \mathbb{R}^{N \times N}$  – положительно определенная матрица Ляпунова, аффинно зависящая от вектора параметров  $\theta(k)$ .

Замкнутая система (11) с параметрической неопределенностью (4), (5) является робастно устойчивой, если  $V(\xi(k) - \xi^*) > 0$  и  $\Delta V(\xi(k) - \xi^*) = V(\xi(k+1) - \xi^*) - V(\xi(k) - \xi^*) < 0 \quad \forall \theta \in \Theta$  при  $(\xi(k) - \xi^*) \neq 0$ .

Согласно [13] не существует общего и систематического способа формально определить  $P(k, \theta)$  как функцию от  $\theta(k)$ . Самым простым способом выбора матрицы Ляпунова является поиск единственной матрицы, которая не зависит от варианта реализации неопределенности:

$$P(k, \theta) = P(k). \quad (14)$$

Вычислим первую разность по  $k$  ФЛ (13) при условии (14) и потребуем, чтобы ее значение с течением времени убывало с некоторой гарантированной скоростью, определяемой текущим значением критерия качества (7):

$$V(\xi(k+1) - \xi^*) - V(\xi(k) - \xi^*) \leq -\left( (\xi(k) - \xi^*)^T W_\xi (\xi(k) - \xi^*) + u(k)^T W_u u(k) \right). \quad (15)$$

Если неравенство (15) выполняется, то можно показать, что ФЛ (13)  $\forall k \geq 0$  определяет верхнее граничное значение критерия (7). Тогда управляющие воздействия  $u(k)$  будем искать из условия минимизации функции Ляпунова (13) на каждом шаге, что позволяет упростить решение задачи (12):

$$u(k) = \arg \min_{u(k) \in U} V(\xi(k) - \xi^*). \quad (16)$$

Для решения задачи (16) применяется метод инвариантных эллипсоидов [3], основная идея которого состоит в следующем. Эллипсоид, описываемый уравнением

$$E(\xi^*, Q(k)) = \left\{ \xi \in \mathbb{R}^N : (\xi(k) - \xi^*)^T Q^{-1}(k)(\xi(k) - \xi^*) \leq 1 \right\}, \quad (17)$$

называется инвариантным по состоянию для системы (11), если любая траектория системы, начавшись в эллипсоиде, остается в нем для любого момента времени  $k \geq 0$ .

Эллипсоид (17) выступает в качестве аппроксимации множества достижимости замкнутой системы (11), то есть позволяет характеризовать влияние внешних возмущений и неопределенности значений параметров на траекторию замкнутой системы. Тогда минимизация по некоторому критерию эллипсоида (17) соответствует робастному управлению системой (11).

Сравнение выражений (13) и (17) позволяет утверждать, что если выполняется тождество  $P(k) = Q^{-1}(k)$ , то эллипсоид (17) представляет собой множество, находящееся внутри поверхности уровня ФЛ (13). Тогда задача робастной стабилизации заключается в вычислении в каждый момент  $k \geq 0$  матрицы  $K(k)$  такой, чтобы регулятор (10) обеспечивал минимизацию по некоторому критерию эллипсоида (17) при ограничениях

(2). Выберем в качестве критерия сумму квадратов полуосей эллипсоида, то есть след матрицы  $Q(k)$ . Результат решения задачи синтеза ограниченного робастного гарантирующего управления запасами может быть представлен в виде теоремы.

Теорема 1 [12]. Рассмотрим систему (11) с параметрической неопределенностью (4), (5) и ограничениями (2), и пусть матрицы  $\hat{Q}(k)$ ,  $\hat{Y}(k)$  получены в результате решения оптимизационной задачи

$$\text{trace}(Q(k)) \rightarrow \min \quad (18)$$

при ограничениях на матричные переменные  $Q(k) = Q^T(k) \in \mathbb{R}^{N \times N}$ ,  $Y(k) \in \mathbb{R}^{m \times N}$  и скалярный параметр  $\alpha(k)$

$$\begin{bmatrix} Q(k) & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & (A^{(j)}Q(k) + BY(k))^T & 0_{N \times q} & Q(k)W_\xi & Y^T(k)W_u \\ 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & (A^{(j)} - I_N)^T & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times m} \\ 0_{q \times N} & 0_{q \times N} & 0_{q \times q} & G^T & 0_{q \times q} & 0_{q \times N} & 0_{q \times m} \\ A^{(j)}Q(k) + BY(k) & A^{(j)} - I_N & G & Q(k) & GQ_d^{1/2} & 0_{N \times N} & 0_{N \times m} \\ 0_{q \times N} & 0_{q \times N} & 0_{q \times q} & Q_d^{1/2}G^T & \alpha(k)I_q & 0_{q \times N} & 0_{q \times m} \\ W_\xi Q(k) & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & W_\xi & 0_{N \times m} \\ W_u Y(k) & 0_{m \times N} & 0_{m \times q} & 0_{m \times N} & 0_{m \times q} & 0_{m \times N} & W_u \end{bmatrix} \succeq 0, \quad j = \overline{1, L}, \quad (19)$$

$$\alpha(k) > 0, \quad Q(k) \succ 0, \quad \begin{bmatrix} Q_x & CQ(k) \\ Q(k)C^T & Q(k) \end{bmatrix} \succeq 0; \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon e_m (\xi(k) - \xi^*)^+ Y^T(k) & Y(k) \\ Y^T(k) & Q(k) \end{bmatrix} \succeq 0, \quad \begin{bmatrix} u^{\max} (\xi(k) - \xi^*)^+ Y^T(k) & Y(k) \\ Y^T(k) & Q(k) \end{bmatrix} \succeq 0, \quad (21)$$

где  $0_{m \times m}$  – нулевая матрица соответствующей размерности;  $e_m = [1, 1, \dots, 1]^T \in \mathbb{R}^{m \times 1}$  – вектор-столбец из единиц;  $\varepsilon > 0$  – малая положительная константа; «+» – псевдообращение Мура-Пенроуза [14].

Если задача минимизации линейной функции (18) при ограничениях (19)–(21), которая является задачей полуопределенного программирования, имеет решение, то:

- для любого начального состояния  $x(0) \geq x^*$ ,  $u(k) = 0_{m \times 1} \quad \forall k \leq 0$  и любого значения матрицы динамики  $A(\theta) \in \Omega$ , а также внешнего возмущения  $d(k) \in E(d^*, Q_d)$  система (11) является робастно устойчивой при ограничениях (2);
- среди всех линейных управлений вида (10) регулятор с матрицей

$$K(k) = \hat{Y}(k)\hat{Q}^{-1}(k) \quad (22)$$

доставляет минимум по критерию следа матрицы инвариантному эллипсоиду (17) для замкнутой системы (11) в момент времени  $k$ .

Из-за ограниченности размера статьи доказательства Теоремы 1 и последующих теорем приведены в работах, на которые указывают соответствующие ссылки.

Совокупность ЛМН (19) гарантирует стабилизацию замкнутой системы (11) при действии возмущений  $d(k) \in E(d^*, Q_d)$  и любом возможном значении нестационарной

матрицы динамики  $A(\theta) \in \Omega$ . ЛМН (20) обеспечивает выполнение первого из ограничений (2) на значения состояний, а совокупность ЛМН (21) – второго из ограничений (2) на значения управляющих воздействий. Отметим, что именно наличие ЛМН (21) приводит к закону управления в виде динамической обратной связи, поскольку матрицы неравенств зависят от текущего значения вектора состояний  $\xi(k)$ .

Поскольку рассмотренный подход к синтезу управления основан на достаточном условии устойчивости, полученным результатам присущ определенный уровень консерватизма [5]. Для уменьшения степени консерватизма предлагается использовать параметризованную ФЛ. Если изменяющийся с течением времени вектор параметров  $\theta(k)$  может быть измерен или оценен в реальном времени, то, следуя [6], матрица Ляпунова может быть определена следующим образом:

$$P(k, \theta) = \sum_{i=1}^L \theta_i(k) P_i(k), \quad P_i(k) \succ 0. \quad (23)$$

Тогда результат решения задачи синтеза может быть представлен в виде следующей теоремы.

Теорема 2 [15]. Рассмотрим систему (11) с параметрической неопределенностью (4), (5) и ограничениями (2), и пусть матрицы  $\hat{Q}_i(k)$ ,  $i = \overline{1, L}$ ,  $\hat{Y}(k)$  получены в результате решения задачи

$$\sum_{i=1}^L \text{trace}(Q_i(k)) \rightarrow \min \quad (24)$$

при ограничениях на матричные переменные  $Q_i(k) = Q_i^T(k) \in \mathbb{R}^{N \times N}$ ,  $i = \overline{1, L}$ ,  $Y(k) \in \mathbb{R}^{m \times N}$ ,  $Z^{(iii)} \in \mathbb{R}^{\tilde{N} \times \tilde{N}}$ ,  $\tilde{N} = 4N + 2q + m$ ;  $Z^{(ijj)} = Z^{(jii)^T}$ ,  $Z^{(jji)}$ ,  $i = \overline{1, L}$ ,  $j \neq i$ ,  $j = \overline{1, L}$ ;  $Z^{(ijv)} = Z^{(vji)^T}$ ,  $Z^{(ivj)} = Z^{(jvi)^T}$ ,  $Z^{(jiv)} = Z^{(vij)^T}$ ,  $i = \overline{1, L-2}$ ,  $j = \overline{1, L-1}$ ,  $v = \overline{1, L}$  и скаляр  $\alpha(k)$

$$\begin{bmatrix} Z^{(1i1)} & Z^{(1i2)} & \dots & Z^{(1iL)} \\ Z^{(2i1)} & Z^{(2i2)} & \dots & Z^{(2iL)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z^{(Li1)} & Z^{(Li2)} & \dots & Z^{(LiL)} \end{bmatrix} \succeq 0, \quad Q_i(k) \succ 0, \quad i = \overline{1, L}, \quad \alpha(k) > 0, \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} Q_x & CQ_i(k) \\ Q_i(k)C^T & Q_i(k) \end{bmatrix} \succeq 0, \quad \begin{bmatrix} \varepsilon e_m (\xi(k) - \xi^*)^+ Y^T(k) & Y(k) \\ Y^T(k) & Q_i(k) \end{bmatrix} \preceq 0, \quad \begin{bmatrix} u^{\max} (\xi(k) - \xi^*)^+ Y^T(k) & Y(k) \\ Y^T(k) & Q_i(k) \end{bmatrix} \succeq 0, \quad i = \overline{1, L}, \quad (26)$$

$$\text{где } Z^{(ijv)} = \begin{bmatrix} Q_i(k) & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & (A^{(i)} Q_i(k) + BY(k))^T & 0_{N \times q} & Q_i(k) W_\xi & Y^T(k) W_u \\ 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & (A^{(i)} - I_N)^T & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times m} \\ 0_{q \times N} & 0_{q \times N} & 0_{q \times q} & G^T & 0_{q \times q} & 0_{q \times N} & 0_{q \times m} \\ A^{(v)} Q_i(k) + BY(k) & A^{(v)} - I_N & G & Q_j(k) & G Q_d^{1/2} & 0_{N \times N} & 0_{N \times m} \\ 0_{q \times N} & 0_{q \times N} & 0_{q \times q} & Q_d^{1/2} G^T & \alpha(k) I_q & 0_{q \times N} & 0_{q \times m} \\ W_\xi Q_i(k) & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & W_\xi & 0_{N \times m} \\ W_u Y(k) & 0_{m \times N} & 0_{m \times q} & 0_{m \times N} & 0_{m \times q} & 0_{m \times N} & W_u \end{bmatrix}.$$

Если задача (24) при ограничениях (25), (26) имеет решение, то:

- для любого начального состояния  $x(0) \geq x^{\max}$ ,  $u(k) = 0_{m \times 1} \forall k \leq 0$  и любого значения матрицы динамики  $A(\theta) \in \Omega$ , а также внешнего возмущения  $d(k) \in E(d^*, Q_d)$  система (11) является робастно устойчивой при ограничениях (2);
- среди всех линейных управлений вида (10) регулятор с матрицей

$$K(k) = \sum_{i=1}^L \theta_i(k) K_i(k), \quad K_i(k) = \hat{Y}(k) \hat{Q}_i^{-1}(k), \quad i = \overline{1, L}. \quad (27)$$

доставляет минимум по критерию следа матрицы инвариантному эллипсоиду (17) для замкнутой системы (11) в момент времени  $k$ .

Отметим, что в выражении (25) все матрицы вида  $Z^{(ijv)}$  содержат произведение матрицы  $A(\theta)$  динамики системы на матрицу  $Q(k, \theta)$ , обратную к матрице Ляпунова  $P(k, \theta)$ . Для снижения степени влияния вектора неопределенных параметров  $\theta(k)$  на результат синтеза управления необходимо, чтобы ЛМН не содержали указанного произведения.

Выполним преобразование системы (11) путем перехода к дескрипторной системе вида

$$\begin{bmatrix} I_N & O_{N \times N} \\ O_{N \times N} & O_{N \times N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi(k+1) \\ y(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O_{N \times N} & I_N \\ A(\theta) & -I_N \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \xi(k) \\ y(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} O_{N \times N} \\ B \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} O_{N \times N} \\ G \end{bmatrix} d(k), \quad (28)$$

где  $\xi(k+1) = y(k)$ .

Введем обозначения

$$E = \begin{bmatrix} I_N & O_{N \times N} \\ O_{N \times N} & O_{N \times N} \end{bmatrix}, \quad \bar{A}(\theta) = \begin{bmatrix} O_{N \times N} & I_N \\ A(\theta) & -I_N \end{bmatrix}, \quad \bar{B} = \begin{bmatrix} O_{N \times N} \\ B \end{bmatrix}, \quad \bar{G} = \begin{bmatrix} O_{N \times N} \\ G \end{bmatrix}, \quad \bar{\xi}(k) = \begin{bmatrix} \xi(k) \\ y(k) \end{bmatrix}.$$

Пусть

$$P(k, \theta) = \begin{bmatrix} P_1(k, \theta) & O_{N \times N} \\ P_2(k, \theta) & P_3(k, \theta) \end{bmatrix},$$

где  $P_i(k, \theta) \in \mathbb{R}^{N \times N}$ ,  $i = 1, 2, 3$ ,  $P_1(k, \theta) = P_1^T(k, \theta) = \sum_{i=1}^L \theta_i(k) P_{1i}(k)$ ,  $P_{1i}(k) \succ 0$ ,  $i = \overline{1, L}$ ,  $P_2(k, \theta) = P_2(k)$ ,  $P_3(k, \theta) = P_3(k) = P_3^T(k)$ .

Определим модифицированную параметризованную ФЛ, которая построена на решениях системы (11), в виде

$$V(\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*, \theta) = (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*)^T P_1(k, \theta) (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*). \quad (29)$$

Вычислим первую разность по  $k$  ФЛ (29) в силу системы (11) с учетом преобразования (28)

$$\begin{aligned} \Delta V(\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*, \theta) = & \frac{1}{2} \left[ (\bar{A}(\theta)(\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) + \bar{B}u(k) + \bar{G}d(k) + \tilde{A}(\theta)\xi^*)^T (P(k, \theta) + P^T(k, \theta)) \times \right. \\ & \times (\bar{A}(\theta)(\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) + \bar{B}u(k) + \bar{G}d(k) + \tilde{A}(\theta)\xi^*) - \\ & \left. - (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*)^T EP(k, \theta)(\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) - (\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*)^T P^T(k, \theta)E^T(\bar{\xi}(k) - \bar{\xi}^*) \right] \end{aligned}$$

где  $\bar{\xi}^* = [\xi^{*\Gamma}, \xi^{*T}]^T$ ,  $\tilde{A}(\theta) = \begin{bmatrix} 0_{N \times N} \\ A(\theta) - I_N \end{bmatrix}$ .

Потребуем, чтобы значение ФЛ (29) с течением времени убывало с некоторой гарантированной скоростью, которая определяется значением показателя качества (7).

В рассматриваемом случае инвариантный по состоянию эллипсоид для системы (11) с параметрической неопределенностью (4), (5) будет иметь вид

$$E(\xi^*, P_1^{-1}(k, \theta)) = \left\{ \xi \in \mathbb{R}^N : (\xi(k) - \xi^*)^T P_1(k, \theta) (\xi(k) - \xi^*) \leq 1 \right\}. \quad (30)$$

Для подавления влияния внешних возмущений на выходы системы (11) управляющие воздействия должны обеспечивать минимизацию эллипсоида (30) по критерию следа матрицы, т.е. целевая функция оптимизационной задачи будет нелинейной:

$$\sum_{i=1}^L \text{trace}(P_{li}^{-1}(k)) \rightarrow \min. \quad (31)$$

Задача (31) эквивалентна задаче  $\sum_{i=1}^L \text{trace}(H_i(k)) \rightarrow \min$  при ограничениях  $\begin{bmatrix} H_i(k) & I_N \\ I_N & P_{li}(k) \end{bmatrix} \succeq 0$ ,  $H_i(k) \succ 0$ ,  $H_i(k) \in \mathbb{R}^{N \times N}$ ,  $i = \overline{1, L}$ . Указанная эквивалентность доказывается с помощью неравенств  $H_i(k) \succeq P_{li}(k)$ ,  $i = \overline{1, L}$  и леммы Шура [3].

Тогда результат решения задачи синтеза ограниченного робастного гарантирующего управления запасами в сетях поставок на основе параметризованной функции Ляпунова с помощью дескрипторного подхода может быть представлен следующим образом.

Теорема 3 [16]. Рассмотрим систему (11) с параметрической неопределенностью (4), (5) и ограничениями (2), и пусть матрицы  $\hat{S}(k)$  и  $\hat{Y}(k)$  получены в результате решения оптимизационной задачи

$$\sum_{i=1}^L \text{trace}(H_i(k)) \rightarrow \min \quad (32)$$

при ограничениях на матричные переменные  $P_{li}(k) = P_{li}^T(k) \in \mathbb{R}^{N \times N}$ ,  $i = \overline{1, L}$ ,  $H_i(k) \in \mathbb{R}^{N \times N}$ ,  $i = \overline{1, L}$ ,  $P_2(k) \in \mathbb{R}^{N \times N}$ ,  $S(k) \in \mathbb{R}^{m \times m}$ ;  $Y(k) \in \mathbb{R}^{m \times N}$ ;  $Z^{(ii)} \in \mathbb{R}^{(7N+3q+m) \times (7N+3q+m)}$ ,  $i = \overline{1, L}$ ;  $Z^{(ij)} = Z^{(ji)T}$ ,  $i = \overline{1, L-1}$ ,  $j = \overline{i+1, L}$  и скаляр  $\alpha(k)$

$$\begin{bmatrix} Z^{(11)} & Z^{(12)} & \dots & Z^{(1L)} \\ Z^{(21)} & Z^{(22)} & \dots & Z^{(2L)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z^{(L1)} & Z^{(L2)} & \dots & Z^{(LL)} \end{bmatrix} \preceq 0, \quad \begin{bmatrix} P_2(k)BB^T & BS(k) \\ S^T(k)B^T & S(k) \end{bmatrix} \succeq 0, \quad \alpha(k) > 0, \quad (33)$$

$$P_{li}(k) \succ 0, \quad H_i(k) \succ 0, \quad \begin{bmatrix} H_i(k) & I_N \\ I_N & P_{li}(k) \end{bmatrix} \succeq 0, \quad \begin{bmatrix} Q_x & C \\ C^T & P_{li}(k) \end{bmatrix} \succeq 0, \quad i = \overline{1, L}, \quad (34)$$

$$\begin{bmatrix} Y^T(k)\varepsilon e_m(\xi(k)-\xi^*)^+ & Y^T(k) \\ Y(k) & S(k) \end{bmatrix} \preceq 0, \quad \begin{bmatrix} Y^T(k)u^{\max}(\xi(k)-\xi^*)^+ & Y^T(k) \\ Y(k) & S(k) \end{bmatrix} \succeq 0, \quad (35)$$

где

$$Z^{(ij)} = \begin{bmatrix} -P_{ij}(k) & \Psi^{(i)T}(k) & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times q} & \Psi^{(i)T}(k) & 0_{N \times q} & W_\xi & Y^T(k)W_u \\ \Psi^{(j)}(k) & P_{ij}(k) - P_2(k) + P_2^T(k) & P_2^T(k)(A^{(j)} - I_N) & P_2^T(k)G & P_2^T(k)G & -2P_2(k) & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} \\ 0_{N \times N} & (A^{(i)} - I_N)^T P_2(k) & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times q} & (A^{(i)} - I_N)^T P_2(k) & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} \\ 0_{q \times N} & G^T P_2(k) & 0_{q \times N} & 0_{q \times q} & 0_{q \times q} & G^T P_2(k) & 0_{q \times q} & 0_{q \times N} & 0_{q \times N} \\ 0_{q \times N} & G^T P_2(k) & 0_{q \times N} & 0_{q \times q} & 0_{q \times q} & G^T P_2(k) & 0_{q \times q} & 0_{q \times N} & 0_{q \times N} \\ \Psi^{(j)}(k) & -2P_2^T(k) & P_2^T(k)(A^{(j)} - I_N) & P_2^T(k)G & P_2^T(k)G & P_2^T(k) & P_2^T(k)G Q_d^{\frac{1}{2}} & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} \\ 0_{q \times N} & 0_{q \times N} & 0_{q \times N} & 0_{q \times q} & 0_{q \times q} & Q_d^{\frac{1}{2}} G^T P_2(k) & \alpha(k)I_q & 0_{q \times q} & 0_{q \times N} \\ W_\xi & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & -W_\xi & 0_{N \times N} \\ W_u Y(k) & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & -W_u \end{bmatrix}$$

$$P_{lij}(k) = P_{li}(k) + P_{lj}(k), \quad \Psi^{(i)}(k) = P_2^T(k)A^{(i)} + BY(k).$$

Если задача (32) при ограничениях (33)–(35) имеет решение, то:

– для любого начального состояния  $x(0) \geq x^{\max}$ ,  $u(k) = 0_{m \times 1} \forall k \leq 0$  и любого значения матрицы динамики  $A(\theta) \in \Omega$ , а также внешнего возмущения  $d(k) \in E(d^*, Q_d)$  система (11) является робастно устойчивой при ограничениях (2);

– среди всех линейных управлений вида (10) регулятор с матрицей  $K(k) = \hat{S}^{-1}(k)\hat{Y}(k)$  доставляет минимум по критерию следа матрицы инвариантного эллипсоиду (30) для замкнутой системы (11) в момент времени  $k$ .

Таким образом, с помощью перехода к дескрипторному описанию системы удалось добиться уменьшения консерватизма результатов управления, поскольку матрицы неравенств не содержат произведения нестационарной матрицы динамики системы и матрицы Ляпунова, а при вычислении матрицы коэффициентов обратной связи используются матрицы, не зависящие от вектора неопределенных параметров модели.

**Синтез децентрализованного робастного управления запасами.** Рассмотрим сеть поставок  $S$ , состоящую из  $N$  взаимосвязанных узлов  $S_i, i = \overline{1, N}$ , каждый из которых описывается разностным уравнением с запаздыванием, аналогичным уравнению (1). Внешние воздействия каждого узла сети включают в себя функции внешнего спроса, формируемого вне сети, и внутреннего спроса, формируемого узлами сети, для которых узел  $S_i$  является поставщиком ресурсов:

$$w_i(k) = \sum_{j=1, j \neq i}^N \Pi_{ij} u_j(k) + \Pi_i d(k),$$

где  $\Pi_{ij} \in \mathbb{R}^{n_i \times m_j}$ ,  $i, j = \overline{1, N}$  – продуктивные матрицы, которые формируются на основании описания технологического процесса, реализуемого сетью поставок.

В процессе функционирования сети поставок должны выполняться локальные ограничения, аналогичные (2). Преобразование модели узла к стандартному виду без запаздывания, а также построение нестационарной матрицы динамики узла выполняется аналогично тому, как это сделано при централизованном подходе. В результате рас-

ширенная модель узла  $S_i$  сети поставок в условиях неопределенности значений транспортных запаздываний может быть представлена в виде модели с параметрической структурной неопределенностью, которая аналогична (6).

Для аппроксимации множеств значений внешних воздействий локальных узлов сети эллипсоидами минимального объема необходимо вычислить граничные значения внешних воздействий для каждого из узлов на основании граничных значений внешнего спроса. Для решения задачи используется алгоритм, предложенный в работе [17].

Локальный закон управления строится в виде линейной динамической обратной связи по сигналу рассогласования между наличными и страховыми уровнями запаса ресурсов локального узла

$$u_i(k) = K_i(k)(\xi_i(k) - \xi_i^*), \quad (36)$$

где  $\xi_i^*$  – вектор, определяющий размер страховых запасов узла  $S_i$ , состоящий из  $(\Lambda_i + 1)$  векторов  $x_i^*$ , которые вычисляются с учетом запаздываний на основании верхних граничных значений внешних воздействий  $x_i^* = \Lambda_i w_i^{\max}$ .

Локальный квадратичный критерий качества записывается аналогично (7). Тогда на основании метода инвариантных эллипсоидов по аналогии с централизованным подходом матрицы локальных регуляторов могут вычисляться:

– с использованием единой функции Ляпунова в результате решения последовательности задач полуопределенного программирования, аналогичных задаче (18) при ограничениях (19)–(21);

– с использованием параметризованной функции Ляпунова в результате решения последовательности задач, аналогичных задаче (24) при ограничениях (25), (26);

– на основании дескрипторного описания системы с использованием параметризованной функции Ляпунова в результате решения последовательности задач, аналогичных задаче (32) при ограничениях (33)–(35).

Для анализа устойчивости управляемой сети поставок  $S$  с децентрализованными регуляторами применим метод сравнения и математический аппарат векторных функций Ляпунова [18]. Сформируем векторную функцию Ляпунова

$$V(\xi(k) - \xi^*) = [v_1(\xi_1(k) - \xi_1^*), \dots, v_N(\xi_N(k) - \xi_N^*)]^T, \quad (37)$$

где  $\xi(k) = [\xi_1^T(k), \dots, \xi_N^T(k)]^T$ ;  $\xi^* = [\xi_1^{*T}, \dots, \xi_N^{*T}]^T$ .

Компонентами функции (37) являются ФЛ локальных подсистем в форме Шилака [19]:  $v_i(\xi_i(k) - \xi_i^*) = ((\xi_i(k) - \xi_i^*)^T P_i(k) (\xi_i(k) - \xi_i^*))^{1/2}$ ,  $i = \overline{1, N}$ .

На основе векторной ФЛ (37) сформируем для системы  $S$  общую ФЛ

$$V_0(\xi(k) - \xi^*) = P_0 V(\xi(k) - \xi^*), \quad (38)$$

где  $P_0 = [p_{01}, \dots, p_{0N}]$ ,  $p_{0i} > 0$ ,  $i = \overline{1, N}$ .

Сопоставим набору подсистем  $S_i$ ,  $i = \overline{1, N}$  линейную систему сравнения, определяемую разностными уравнениями

$$\begin{aligned} v(k+1) &= \Lambda(k)v(k), \quad v(0) = V(\xi(0) - \xi^*), \\ \eta(k) &= P_0 v(k), \end{aligned} \quad (39)$$

где  $v(k) \in \mathbb{R}^N$  – вектор состояний системы сравнения;  $\eta(k)$  – скалярная функция, являющаяся выходом системы сравнения;  $\Lambda(k) \in \mathbb{R}^{N \times N}$  – нестационарная матрица с неотрицательными элементами.

Вычисление элементов матрицы  $\Lambda(k)$  производится с использованием характеристического уравнения пучка квадратичных форм

$$\begin{aligned} \det((A_i(\theta) + B_i K_i(k))^T P_i(k) (A_i(\theta) + B_i K_i(k)) - \mu_{ii}(k) P_i(k)) &= 0, \quad i = \overline{1, N}, \\ \det(F_{ij}^T(k) P_i(k) F_{ij}(k) - \mu_{ij}(k) P_j(k)) &= 0, \quad i, j = \overline{1, N}, j \neq i, \end{aligned}$$

где  $\lambda_{ij}(k) = [\mu_{ij}^{\max}(k)]^{1/2}$ ;  $\mu_{ij}^{\max}(k)$  – максимальное значение корня соответствующего характеристического уравнения;  $F_{ij}^T(k) = [E_i \Pi_{ij} K_j(k) \quad 0_{m_i \times N_j} \quad \dots \quad 0_{m_i \times N_j}]$ .

Система сравнения (39) покомпонентно мажорирует векторную (37) и общую (38) функции Ляпунова [17]. В результате анализ устойчивости сети поставок  $S$  с децентрализованными регуляторами сводится к анализу системы сравнения (39).

При построении модели сети поставок узлы нумеруются и группируются в соответствии со стадиями переработки сырья и полуфабрикатов, начиная с тех, на которые поступает внешний спрос. В результате, если граф, представляющий модель сети, не имеет циклов, то матрица динамики  $\Lambda(k)$  системы сравнения является нижнетреугольной. Поскольку локальные подсистемы после замыкания являются стабилизированными, то значения диагональных элементов матрицы  $\Lambda(k)$  являются положительными и меньше единицы:  $0 < \lambda_{ii}(k) < 1$ . В результате  $\Lambda(k) \forall k$  является нильпотентной и, таким образом, система сравнения (39) является устойчивой. Следовательно, управляемая сеть поставок  $S$ , состоящая из взаимосвязанных подсистем  $S_i, i = \overline{1, N}$ , замкнутых локальными обратными связями с децентрализованными регуляторами (36), является устойчивой по Ляпунову.

**Синтез ограниченного стабилизирующего управления запасами в сетях поставок с нелинейными взаимосвязями.** Одной из разновидностей сетей поставок являются системы подачи и распределения воды (СПРВ) в населенных пунктах. Характерной особенностью СПРВ является необходимость обеспечения определенного давления воды, значение которого нелинейно зависит от объема перекачиваемой насосами воды, что приводит к необходимости использования нелинейных моделей. В работе [20] предлагается использовать технику ЛМН для синтеза управления линейной динамической системой при наличии нелинейных взаимосвязей, величины которых удовлетворяют квадратичным неравенствам специального вида. Поскольку резервуары и исполнительные элементы систем водоснабжения имеют эксплуатационные ограничения, указанный подход может быть применен для решения задачи управления режимами работы насосных станций в СПРВ.

Рассмотрим методику построения математической модели СПРВ. В качестве переменных состояний модели рассматриваются объемы воды в резервуарах, измеряемые

в м<sup>3</sup>, и величины давления (напора) воды в исходящих из резервуаров потоках, измеряемые в м. Управляющими воздействиями являются объемы воды, перекачиваемые через управляемые гидравлические элементы (насосы и вентили) в текущем периоде, измеряемые в м<sup>3</sup>. В качестве внешних возмущений выступают объемы потребляемой воды и объемы утечек за период, также измеряемые в м<sup>3</sup>.

Предполагается, что структура СПРВ известна, а объемы воды в резервуарах могут быть непосредственно измерены. Для каждого узла сети можно записать уравнение баланса массы в виде разностного уравнения, учитывающего все входящие и исходящие потоки. Связь между объемом перекачиваемой воды и напором воды в потоке определяется уравнением Бернулли, которое выражает закон сохранения механической энергии в жидкости и может быть записано для любых двух узлов сети по ходу потока [21]. Следуя [20], представим нелинейные слагаемые в виде кусочно-непрерывных нелинейных функций: первая зависит от дискретного времени и вектора управлений  $h_u(k, u) : \mathbb{R}^{m+1} \rightarrow \mathbb{R}^n$ , вторая – от дискретного времени и вектора возмущений  $h_d(k, d) : \mathbb{R}^{q+1} \rightarrow \mathbb{R}^n$ , где  $m$  – количество управляемых гидравлических элементов в сети,  $q$  – количество секторов потребления. Тогда математическая модель СПРВ может быть представлена в виде нелинейной дискретной модели с запаздыванием в пространстве состояний. После приведения к стандартному виду без запаздывания уравнения расширенной модели примут вид

$$\begin{aligned} \xi(k+1) &= A\xi(k) + Bu(k) + Gd(k) + h_u(k, u) + h_d(k, d), \\ x(k) &= C\xi(k), \end{aligned} \quad (40)$$

где  $\xi(k) = [v(k)^T, h(k)^T, u(k-1)^T, u(k-2)^T, \dots, u(k-\Lambda)^T]^T$  – вектор состояний системы;  $v(k) \in \mathbb{R}^n$  – вектор, компоненты которого определяют объемы воды в резервуарах в момент времени  $k$ ;  $h(k) \in \mathbb{R}^n$  – вектор, компоненты которого определяют напоры воды в исходящих из резервуаров потоках в момент времени  $k$ ;  $n$  – количество резервуаров в системе; матрицы модели имеют соответствующую блочную структуру [22].

Резервуары и исполнительные элементы СПРВ имеют эксплуатационные ограничения. В соответствии со СНиП 2.04.02-84 [23] давление в городских водопроводных сетях должно изменяться от 2,5 до 7,5 атмосфер, что соответствует напору воды от 25 до 75 метров. Поэтому в процессе функционирования СПРВ должны выполняться ограничения, которые аналогичны (2).

Регулирование мощности насосов должно осуществляться плавно, чтобы избежать нежелательных переходных процессов в герметичных трубах, что может привести к их повреждению. Поэтому для обеспечения эффекта сглаживания скачков управляющих воздействий критерий качества (7) предлагается дополнить слагаемым

$$J_{\infty}^{don}(k) = \sum_{k=1}^{\infty} \Delta u^T(k) W_{\Delta} \Delta u(k), \quad \Delta u(k) = u(k) - u(k-1),$$

где  $W_{\Delta} \in \mathbb{R}^{m \times m}$  – положительно определенная диагональная весовая матрица.

Для системы (40) рассматривается задача синтеза стратегии управления режимами работы насосных станций гарантированной стоимости, которая может использоваться для определения в каждый момент времени объемов перекачиваемой воды с учетом эксплуатационных ограничений на их значения в виде функции от объемов во-

ды в резервуарах сети и значений напора воды, которые позволяют удерживать объемы воды в резервуарах и величины напора воды в заданных пределах при любых допустимых объемах потребления и утечек воды.

Предполагается, что нелинейные функции являются ограниченными и удовлетворяют квадратичным неравенствам следующего вида [20]

$$\begin{aligned} h_u^T(k, u)h_u(k, u) &\leq u^T(k)\Sigma_u^{\max T} F^T F \Sigma_u^{\max} u(k), \\ h_d^T(k, d)h_d(k, d) &\leq d^T(k)\Sigma_d^{\max T} H^T H \Sigma_d^{\max} d(k), \end{aligned} \quad (41)$$

где  $F^T = [0_{n \times m} \quad \text{diag}(F_1, \dots, F_m) \quad 0_{(n-m) \times m} \quad 0_{\Lambda m \times m}]$ ;  $H^T = [0_{n \times q} \quad \text{diag}(H_1, \dots, H_q) \quad 0_{(n-q) \times q} \quad 0_{\Lambda m \times q}]$ ;  
 $F_i = \frac{8\alpha_K \rho}{\pi^2 D_i^4}$ ,  $i = \overline{1, m}$ ;  $H_j = -\frac{8\alpha_K \rho}{\pi^2 D_j^4}$ ,  $j = \overline{1, q}$ ;  $\alpha_K$  – коэффициент Кориолиса;  $\rho$  – плотность воды;  $D_i$  – диаметр трубы, исходящей из резервуара  $i$ ;  $\Sigma_u^{\max} = \text{diag}(u_1^{\max}, \dots, u_m^{\max})$ ;  
 $\Sigma_d^{\max} = \text{diag}(d_1^{\max}, \dots, d_q^{\max})$ .

Закон управления строится в виде линейной динамической обратной связи вида (10), где значения компонент вектора  $\xi^*$ , определяющего уровень страховых запасов воды, вычисляются на основании граничных значений объемов потребления с учетом времени на транспортировку воды от источников до потребителей, а также минимально допустимых объемов воды в резервуарах и продуктивной модели Леонтьева:

$$\xi^* = \left[ v^{*T}, 0_{1 \times n}, \underbrace{v^{*T}, \dots, v^{*T}}_{\Lambda} \right]^T, \quad v_i^* = \begin{cases} (I_n - \Pi)^{-1} \hat{d}, & i = \overline{1, q}, \\ \Lambda_i (I_n - \Pi)^{-1} \hat{d}, & i = \overline{q+1, n}, \end{cases} \quad \hat{d}_i = \begin{cases} \Lambda_i d_i^{\max} + x_i^{\min}, & i = \overline{1, q}, \\ x_i^{\min}, & i = \overline{q+1, n}, \end{cases}$$

где  $\Pi \in \mathbb{R}^{n \times n}$  – матрица смежности графа, описывающего модель СПРВ.

Определим квадратичную функцию Ляпунова, построенную на решениях системы (40), замкнутой управлением (10), в виде (13), где матрица Ляпунова соответствует (14). Тогда результат решения задачи синтеза ограниченного стабилизирующего управления режимами работы насосных станций в системе подачи и распределения воды может быть представлен в виде следующей теоремы.

Теорема 4 [22]. Рассмотрим систему (40) с ограничениями (2), (41) и пусть матрицы  $\hat{Q}(k)$ ,  $\hat{Y}(k)$  получены в результате решения оптимизационной задачи (18) при ограничениях на матричные переменные  $Q(k) = Q^T(k) \in \mathbb{R}^{N \times N}$ ,  $Y(k) \in \mathbb{R}^{m \times N}$ ,  $N = 2n + \Lambda m$  и скалярные параметры  $\beta_1(k)$ ,  $\beta_2(k)$ ,  $\alpha_3(k)$

$$\beta_1(k) > 0, \quad \beta_2(k) > 0, \quad \alpha_3(k) > 0, \quad Q(k) > 0, \quad \begin{bmatrix} Q_x & CQ(k) \\ Q(k)C^T & Q(k) \end{bmatrix} \succeq 0, \quad (42)$$

$$\begin{bmatrix} \epsilon e_m (\xi(k) - \xi^*)^+ Y^T(k) & Y(k) \\ Y^T(k) & Q(k) \end{bmatrix} \preceq 0, \quad \begin{bmatrix} u^{\max} (\xi(k) - \xi^*)^+ Y^T(k) & Y(k) \\ Y^T(k) & Q(k) \end{bmatrix} \succeq 0, \quad (43)$$

$$\begin{bmatrix}
 Q(k) & Y^T(k)W_\Delta K_{k-1} & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times q} & \Phi^T(k) & 0_{N \times q} & Q(k)W_\xi & Y^T(k)W_\Sigma & \Psi^T(k) \\
 K_{k-1}^T W_\Delta Y(k) & -K_{k-1}^T W_\Delta K_{k-1} & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times m} & 0_{N \times N} \\
 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times q} & (A-I_N)^T & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times m} & 0_{N \times N} \\
 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & \beta_1(k)I_N & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times q} & \beta_1(k)I_N & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times m} & 0_{N \times N} \\
 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & \beta_2(k)I_N & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times q} & \beta_2(k)I_N & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times m} & 0_{N \times N} \\
 0_{q \times N} & 0_{q \times q} & \Sigma_d^{\max} H^T & 0_{q \times q} & 0_{q \times q} & 0_{q \times N} & 0_{q \times q} & 0_{q \times N} & 0_{q \times m} & 0_{q \times N} \\
 0_{N \times N} & H \Sigma_d^{\max} & \beta_2(k)I_N & 0_{N \times q} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times m} & 0_{N \times N} \\
 0_{q \times N} & 0_{q \times q} & 0_{q \times N} & 0_{q \times q} & 0_{q \times q} & G^T & 0_{q \times q} & 0_{q \times N} & 0_{q \times m} & 0_{q \times N} \\
 0_{q \times N} & 0_{q \times q} & 0_{q \times N} & 0_{q \times q} & 0_{q \times q} & G^T & O & 0_{q \times N} & 0_{q \times m} & 0_{q \times N} \\
 \Phi(k) & 0_{N \times N} & A-I_N & \beta_1(k)I_N & \beta_2(k)I_N & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & G & G & Q(k) & G Q_d^{\prime 2} & 0_{N \times N} & 0_{N \times m} & 0_{N \times N} \\
 0_{q \times N} & 0_{q \times q} & 0_{q \times N} & 0_{q \times q} & 0_{q \times q} & 0_{q \times N} & \alpha_3(k)I_q & 0_{q \times N} & 0_{q \times m} & 0_{q \times N} \\
 W_\xi Q(k) & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & W_\xi & 0_{N \times m} & 0_{N \times N} \\
 W_\Sigma Y(k) & 0_{m \times N} & 0_{m \times N} & 0_{m \times N} & 0_{m \times N} & 0_{m \times q} & 0_{m \times N} & 0_{m \times q} & 0_{m \times q} & 0_{m \times N} & 0_{m \times q} & 0_{m \times N} & W_\Sigma & 0_{m \times N} \\
 \Psi(k) & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times q} & 0_{N \times N} & 0_{N \times m} & \beta_1(k)I_N
 \end{bmatrix} \geq 0, \tag{44}$$

где  $\Phi(k) = AQ(k) + BY(k)$ ,  $\Psi(k) = F \Sigma_u^{\max} Y(k)$ ,  $W_\Sigma = W_u + W_\Delta$ ,  $K_{k-1} = K(k-1)$ ,  $K_0 = 0_{m \times N}$ .

Если задача (18) при ограничениях (42)–(44) имеет решение, то:

- для любого начального состояния  $v(0) \geq v^*$ ,  $u(k) = 0_{m \times 1} \forall k \leq 0$ , а также внешнего возмущения  $d(k) \in E(d^*, Q_d)$  система (40), замкнутая управлением (10), является робастно устойчивой при ограничениях (2), (41);
- среди всех линейных управлений вида (10) регулятор с матрицей (22) доставляет минимум по критерию следа матрицы инвариантному эллипсоиду для замкнутой системы (40) в момент времени  $k$ .

**Выводы.** В статье предложены методики решения задачи синтеза ограниченного робастного гарантирующего управления запасами в сетях поставок для централизованного и децентрализованного способа построения системы управления, а также наличия нелинейных ограниченных взаимосвязей между подсистемами.

Особенностями рассмотренной задачи являются:

- интервальная неопределенность внешнего спроса;
- наличие запаздываний по управлению, значения которых являются неопределенными;
- наличие несимметричных структурных ограничений на значения состояний и управляющих воздействий.

Закон управления строится в виде линейной динамической обратной связи по сигналу невязки между наличными и страховыми уровнями запаса ресурсов. Для подавления влияния возмущений, моделирующих изменения внешнего спроса, одновременно с обеспечением робастной устойчивости замкнутой системы применен метод инвариантных эллипсоидов. Для уменьшения степени консерватизма результатов управления используется параметризованная функция Ляпунова, а также дескрипторный подход к описанию системы. Применение техники линейных матричных неравенств позволило свести задачу синтеза управления к последовательности задач полуопределенного программирования, решение которых может быть получено с помощью свободно распространяемых программных пакетов на базе системы MATLAB.

**Обозначения.** ФЛ – функция Ляпунова; ЛМН – линейное матричное неравенство; СПРВ – система подачи и распределения воды.

Литература

1. Лотоцкий В.А. Модели и методы управления запасами / В.А. Лотоцкий, А.С. Мандель. – М.: Наука, 1991. – 188 с.
2. Bertsekas D.P. Recursive state estimation for a set-membership description of uncertainty / D.P. Bertsekas, I. Rhodes // IEEE Trans. Automat. Control. – 1971. – Vol. 16. – P. 117–128.
3. Поляк Б.Т. Управление линейными системами при внешних возмущениях: техника линейных матричных неравенств / Б.Т. Поляк, М.В. Хлебников, П.С. Щербаков. – М.: ЛЕНАНД, 2014. – 560 с.
4. Blanchini F. Set theoretic methods in control / F. Blanchini, S. Miani. – Boston : Birkhäuser, 2008. – 504 p.
5. Щербаков П.С. Приближенные методы в параметрической робастности линейных систем управления : дис. ... д-ра физ.-мат. наук : 05.13.01 / Щербаков Павел Сергеевич. – М., 2004. – 215 с.
6. Feron E. Analysis and synthesis of robust control systems via parameter-dependent Lyapunov functions / E. Feron, P. Apkarian, P. Gahinet // IEEE Transactions on Automatic Control. – 1996. – Vol. 41. – P. 1041–1046.
7. Zhang W. Robust stability test for uncertain discrete-time systems: a descriptor system approach / W. Zhang, H. Su, Y. Liang, Z. Han // Latin American Applied Research. – 2011. – Vol. 41, No. 4. – P. 359–364.
8. Дорофеев Ю.И. Анализ распределенных сетей поставок как объектов автоматического управления / Ю.И. Дорофеев, А.А. Никульченко // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск «Системний аналіз, управління та інформаційні технології». – Х.: НТУ «ХПІ». – 2012. – № 29. – С. 15–22.
9. Дорофеев Ю.И. Построение математических моделей управляемых сетей поставок с учетом запаздываний потоков / Ю.И. Дорофеев, А.А. Никульченко // Системні дослідження та інформаційні технології. – 2013. – № 1. – С. 16–27.
10. Blanchini F. Feedback control of production-distribution systems with unknown demand and delays / F. Blanchini, R. Pesenti, F. Rinaldi, W. Ukovich // IEEE Trans. on Robotics and Automation. – 2000. – Vol. 16. – No. 3. – P. 313–317.
11. Дорофеев Ю.И. Синтез системы оптимального управления запасами с дискретным ПИД-регулятором с использованием ЛМН / Ю.И. Дорофеев // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2014. – Вип. 4(41). – С. 34–41.
12. Дорофеев Ю.И. Робастное стабилизирующее управление запасами в сетях поставок в условиях неопределенности внешнего спроса и интервалов задержки пополнения запасов / Ю.И. Дорофеев, Л.М. Любчик, А.А. Никульченко // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2014. – № 5. – С. 146–160.
13. Oliveira M.C. LMI characterization of structural and robust stability: the discrete-time case / M.C. Oliveira, J.C. Geromel, L. Hsu // Linear Algebra Appl. – 1999. – No. 296. – P. 27–38.
14. Алберт А. Регрессия, псевдоинверсия и рекуррентное оценивание / А. Алберт. – М.: Наука, 1977. – 224 с.
15. Дорофеев Ю.И. Синтез ограниченного робастного гарантирующего управления запасами с помощью параметризованной функции Ляпунова / Ю.И. Дорофеев // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: ХУПС, 2015. (принята к опублікованню).

16. Дорофеев Ю.И. Дескрипторный подход к синтезу ограниченного робастного гарантирующего управления запасами с использованием параметризованной функции Ляпунова / Ю.И. Дорофеев // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2015. (принята к опубликованию).
17. Дорофеев Ю.И. Синтез децентрализованного управления запасами в сетях поставок на основе робастной стабилизации подсистем / Ю.И. Дорофеев // Вісник НТУ «ХПІ». Тематичний випуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. (принята к опубликованию).
18. Воронов А.А. Метод векторных функций Ляпунова в теории устойчивости / А.А. Воронов, В.М. Матросов. – М. : Наука, 1987. – 312 с.
19. Šiljak D.D. Robust stability of discrete systems / D.D. Šiljak, M.E. Sezer // Int. J. Control. – 1988. – Vol. 48(5). – P. 2055–2063.
20. Stipanovic D.M. Robust stability and stabilization of discrete-time nonlinear systems: the LMI approach / D.M. Stipanovic, D.D. Šiljak // International Journal of Control. – 2001. – Vol. 74. – P. 873–979.
21. Меренков А.П. Теория гидравлических цепей / А.П. Меренков, В.Я. Хасилев. – М.: Наука, 1985. – 278 с.
22. Дорофеев Ю.И. Робастное подавление возмущений при управлении насосными станциями в системе централизованного водоснабжения / Ю.И. Дорофеев, Л.М. Любчик // Радиоэлектроника, информатика, управление. – 2014. – № 2(31). – С. 164–173.
23. СНиП 2.04.02-84 Водоснабжение. Наружные сети и сооружения.

Bibliography (transliterated)

1. Lotockij V.A. Modeli i metody upravlenija zapasami V.A. Lotockij, A.S. Mandel'. – М.: Nauka, 1991. – 188 p.
2. Bertsekas D.P. Recursive state estimation for a set-membership description of uncertainty D.P. Bertsekas, I. Rhodes. IEEE Trans. Automat. Control. 1971. Vol. 16. P. 117–128.
3. Poljak B.T. Upravlenie linejnymi sistemami pri vneshnih vozmushhenijah: tehnika linejnyh matrichnyh neravenstv. B.T. Poljak, M.V. Hlebnikov, P.S. Shherbakov. – М.: LE-NAND, 2014. – 560 p.
4. Blanchini F. Set theoretic methods in control F. Blanchini, S. Miani. – Boston : Birkhäuser, 2008. – 504 p.
5. Shherbakov P.S. Priblizhennye metody v parametriceskoj robastnosti linejnyh sistem upravlenija : dis. ... d-ra fiz.-mat. nauk : 05.13.01. Shherbakov Pavel Sergeevich. – М., 2004. – 215 p.
6. Feron E. Analysis and synthesis of robust control systems via parameter-dependent Lyapunov functions E. Feron, P. Apkarian, P. Gahinet. IEEE Transactions on Automatic Control. 1996. Vol. 41. P. 1041–1046.
7. Zhang W. Robust stability test for uncertain discrete-time systems: a descriptor system approach W. Zhang, H. Su, Y. Liang, Z. Han. Latin American Applied Research. 2011. Vol. 41, #4. P. 359–364.

8. Dorofieiev Yu.I. Analiz raspredelennyh setej postavok kak ob'ektov avtomaticheskogo upravlenija. Yu.I. Dorofieiev, A.A. Nikulchenko. Visnik NTU «HPI». Tematichnij vipusk «Sistemnij analiz, upravlinnja ta informacijni tehnologii». 2012. #29. P. 15–22.
9. Dorofieiev Yu.I. Postroenie matematicheskikh modelej upravljaemyh setej postavok s uchetom zapazdyvanij potokov Yu.I. Dorofieiev, A.A. Nikulchenko. Sistemni doslidzhennja ta informacijni tehnologii. 2013. #1. P. 16–27.
10. Blanchini F. Feedback control of production-distribution systems with unknown demand and delays F. Blanchini, R. Pesenti, F. Rinaldi, W. Ukovich. IEEE Trans. on Robotics and Automation. 2000. Vol. 16. #3. P. 313–317.
11. Dorofieiev Yu.I. Sintez sistemy optimal'nogo upravlenija zapasami s diskretnym PID-reguljatorom s ispol'zovaniem LMN Yu.I. Dorofeev. Zbirnik naukovih prac' Kharkivs'kogo universitetu Povitrijanij Sil. Kh.: HUPS, 2014. Vip. 4(41). P. 34–41.
12. Dorofieiev Yu.I. Robastnoe stabilizirujushhee upravlenie zapasami v setjah postavok v uslovijah neopredelennosti vneshnego sprosa i intervalov zaderzhki popolnenija zapasov Yu.I. Dorofieiev, L.M. Lyubchik, A.A. Nikulchenko. Izvestija RAN. Teorija i sistemy upravlenija. 2014. #5. P. 146–160.
13. Oliveira M.C. LMI characterization of structural and robust stability: the discrete-time case M.C. Oliveira, J.C. Geromel, L. Hsu. Linear Algebra Appl. 1999. #296. P. 27–38.
14. Albert A.E. Regression and the Moore-Penrose psudoinverse A.E. Albert. – London: Academic Press, 1972. – 180 p.
15. Dorofieiev Yu.I. Sintez ogranicennogo robastnogo garantirujushhego upravlenija zapasami s pomoshh'ju parametrizovanoj funkcii Lyapunova Yu.I. Dorofieiev. Zbirnik naukovih prac' Kharkivs'kogo universitetu Povitrijanij Sil. – Kh.: HUPS, 2015. (v processe publikacii).
16. Dorofieiev Yu.I. Deskriptornyj podhod k sintezu ogranicennogo robastnogo garantirujushhego upravlenija zapasami s ispol'zovaniem parametrizovanoj funkcii Lyapunova Yu.I. Dorofieiev. Radioelektronika, informatika, upravlenie. 2015. (v processe publikacii).
17. Dorofieiev Yu.I. Sintez decentralizovanogo upravlenija zapasami v setjah postavok na osnove robastnoj stabilizacii podsistem Yu.I. Dorofieiev. Visnik NTU «HPI». Tematichnij vipusk: Informatika i modeljuvannja. – Kh: NTU «HPI», 2015. (v processe publikacii).
18. Voronov A.A. Metod vektornyh funkcij Lyapunova v teorii ustojchivosti A.A. Voronov, V.M. Matrosov. – M. : Nauka, 1987. – 312 p.
19. Šiljak D.D. Robust stability of discrete systems D.D. Šiljak, M.E. Sezer. Int. J. Control. 1988. Vol. 48(5). P. 2055–2063.
20. Stipanovic D.M. Robust stability and stabilization of discrete-time nonlinear systems: the LMI approach D.M. Stipanovic, D.D. Šiljak. International Journal of Control. 2001. Vol. 74. P. 873–979.
21. Merenkov A.P. Teorija gidravlicheskih cepej A.P. Merenkov, V.Ya. Hasilev. – M.: Nauka, 1985. – 278 p.
22. Dorofieiev Yu.I. Robastnoe podavlenie vozmushhenij pri upravlenii nasosnymi stancijami v sisteme centralizovanogo vodosnabzhenija Yu.I. Dorofieiev, L.M. Lyubchik. Radioelektronika, informatika, upravlenie. 2014. #2(31). P. 164–173.
23. SNiP 2.04.02-84 Vodosnabzhenie. Naruzhnye seti i sooruzhenija.

УДК 681.5.013

Дорофєєв Ю.І.

**ЗАДАЧІ І МЕТОДИ ОБМЕЖЕНОГО РОБАСТНОГО КЕРУВАННЯ ЗАПАСАМИ  
У МЕРЕЖАХ ПОСТАВОК В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ**

Запропонована методика вирішення задачі синтезу обмеженого робастного гарантуючого керування запасами в мережах поставок, яка застосовується як у випадку централізованого, так і децентралізованого способу побудови системи керування, а також наявності нелінійних обмежених взаємозв'язків між підсистемами.

Особливостями розглянутої задачі є: інтервальна невизначеність зовнішнього попиту; наявність запізнювань по керуванню, значення яких є невизначеними; наявність несиметричних структурних обмежень на значення станів і керуючих дій.

Закон керування будується у вигляді лінійного динамічного зворотного зв'язку за сигналом нев'язки між готівковими і страховими рівнями запасу ресурсів. Для подолання впливу збурень, які моделюють зміни зовнішнього попиту, одночасно із забезпеченням робастної стійкості замкнутої системи застосований метод інваріантних еліпсоїдів. Для зменшення ступеня консерватизму результатів керування використовується параметризована функція Ляпунова, а також дескрипторний підхід до опису системи. Застосування техніки лінійних матричних нерівностей дозволило звести задачу синтезу керування до послідовності задач напіввизначеного програмування, для вирішення яких застосовуються вільно поширювані програмні пакети на базі системи MATLAB.

Dorofiev Yu.I.

**PROBLEMS AND TECHNIQUES FOR ROBUST INVENTORY CONTROL  
IN SUPPLY NETWORKS UNDER UNCERTAINTY**

The method for solving the problem of constrained robust guaranteed inventory control synthesis in supply networks is proposed, which is applied in the case of centralized and decentralized ways of control systems constructing, as well as the availability of non-linear constrained relationships between the subsystems.

The features of this problem are: interval uncertainty of external demand; the presence of control time-delays, whose values are uncertain; the presence of asymmetric structural constraints on the values of states and control actions.

The control law is constructed in the form of a linear dynamic feedback with respect to deviation between cash and safety stock levels of resources. In order to suppress the influence of disturbances, which modeling changes in external demand, while ensuring robust stability of the closed system the method of invariant ellipsoids is used. To reduce the degree of conservatism of control results is used the parameter-dependent Lyapunov function, and the descriptor system approach. With the help of the linear matrix inequalities technique the control synthesis problem is presented as a series of semidefinite programming, for solving which is used open source software on the basis of MATLAB.

Чуняєв О.М., Биков А.О.

### МОЖЛИВІСТЬ ВИНИКНЕННЯ СТАЦІОНАРНОГО ФРОНТУ КАРБІДОУТВОРЕННЯ НА ПОВЕРХНІ ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВИХ СПЛАВІВ ПРИ ДИФУЗІЙНОМУ ЛЕГУВАННІ

**Актуальність теми.** Метою дифузійного легування залізовуглецевих сплавів активними карбідоутворювачами зазвичай є отримання щільного карбідного шару на поверхні виробу, що легується. Багаторазово доведено що захисні карбідні шари забезпечують високу комплексну корозійно-механічну стійкість оброблених виробів [1–4]. Проте для отримання оптимальних характеристик і забезпечення відтворюваності результатів легування важливо утримання реакційної зони, або фронту карбідоутворення безпосередньо на поверхні виробу що легується. В роботі [5] було доведено можливість утворення стаціонарного фронту карбідоутворення обумовлену сукупністю термодинамічних властивостей карбідоутворювача та матриці. Так, якщо поверхнева концентрація карбідоутворювача буде вищою за критичну концентрацію початку карбідоутворення, але меншою за концентрацію що викликає  $\gamma \rightarrow \gamma + \alpha \rightarrow \alpha$  перетворення матриці, а концентрація вуглецю в свою чергу буде достатньою для утворення карбідів – фронт карбідоутворення лежатиме безпосередньо на поверхні і буде стаціонарним. Проте проведення процесу за таких умов не завжди технологічно (через необхідність використовувати насичуючі середовища низької потужності). А часом і просто неможливо через зміну потужності дифузійних джерел у часі. Тому визначення можливості утворення стаціонарного реакційного фронту в умовах нестаціонарної зустрічної дифузії є актуальною задачею.

**Результати аналізу.** Розглянемо випадок, коли поверхневому дифузійному легуванню активним карбідоутворюючим елементом підлягає залізовуглецевий сплав не з однорідним розподілом вуглецю, а сплав на якому провели попереднє повне обезвуглецювання поверхневого шару на деяку глибину. Наприклад, легування сталі У7 (що вміщує 0,67–0,74 % С), попередньо обезвуглецьованої на глибину 200 мкм, ванадієм в насичуючому середовищі, яке забезпечує рівновагову поверхневу концентрацію ванадію 15 %. Технологічні умови підберемо таким чином, щоб забезпечити зустріч дифузійних фронтів ванадію і вуглецю в матриці сплаву на деякій глибині. Це станеться якщо:

– насичуюче середовище забезпечує концентрацію ванадію на поверхні сплаву що легується більше 1,62 % (тобто вище  $C_{K\gamma-\alpha}$ ) за проміжок часу яким можна знехтувати, і масообмін на поверхні не лімітується властивостями насичуючого середовища (тобто, скільки ванадію б не дифундувало в сплав, насичуюче середовище здатне стійко підтримувати його рівновагову поверхневу концентрацію);

– а сталь що легується, в свою чергу, нагріта до температури обробки достатньо швидко для того, щоб запобігти відновленню концентрації вуглецю в поверхневому шарі за рахунок його дифузії із матриці, до моменту утворення дифузійного фронту ванадію.

Перед стартом масообмінних і дифузійних процесів вище означену систему можна схематично представити, як показано на рис. 1 (а).

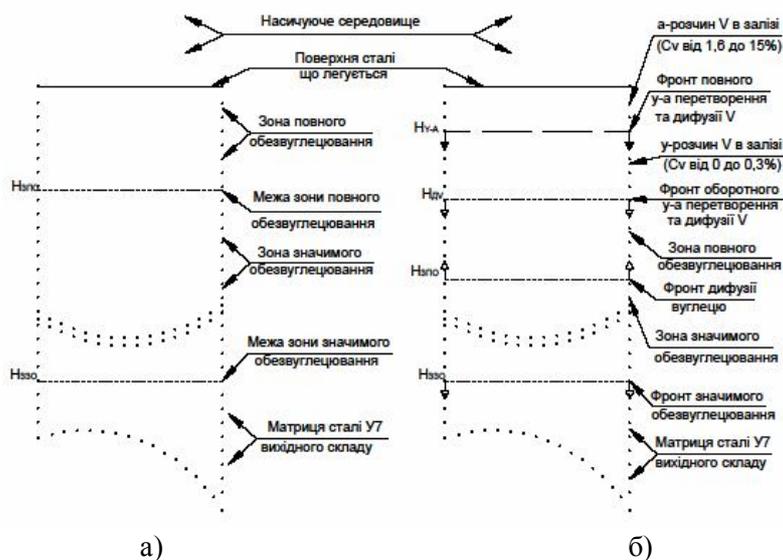


Рисунок 1 – Схема структури поверхневого шару сталі У7

після попереднього обезвуглецювання, при дифузійному легуванні ванадієм  
 а) система перед стартом масообмінних і дифузійних процесів; б) система на початковому етапі легування

Початковий етап легування по умовах опиту завершиться за проміжок часу, яким можна знехтувати. Він полягатиме в протіканні  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення на поверхні обезвуглецьованої сталі, і утворенні рухливого фронту дифузії ванадію, єдиного з фронтом фазового  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення. Вуглець при цьому також утворює дифузійний фронт на границі зони повного обезвуглецювання, що рухається в зустрічному напрямку. Рушійною силою дифузійного фронту вуглецю буде градієнт концентрації між обезвуглецьованою зоною (із вмістом менше 0,03 % C) і матрицею сталі (із вмістом близько 0,71 % C). Оскільки матриця сталі в означених умовах продовжує втрачати вуглець – границя зони значимого обезвуглецювання перетвориться на фронт значимого обезвуглецювання, який рухатиметься в напрямку від поверхні до матриці. Стан системи через деякий час після завершення початкового етапу легування представлено на рис. 1 (б).

Продовжуючи процес дифузійного легування ми досягнемо моменту, коли фронт дифузії ванадію зустрінеться з фронтом дифузії вуглецю на деякій глибині рис. 2 (а), після чого вони проникнуть один в одного. Безпосередньо з моменту взаємного проникнення дифузійних фронтів в сталі що легується утворюється область, в якій концентрації ванадію і вуглецю зростають одночасно рис. 2 (б).

І природно, через деякий проміжок часу із моменту взаємного проникнення дифузійних фронтів в області де концентрації ванадію і вуглецю зростають одночасно, виникне зона де вони стануть більше критичних  $C_{K \min KO}$ ,  $C_{C \min KO}$  – зона реакції карбідоутворення рис. 3.

З моменту коли в матриці сталі на деякій глибині виникла зона реакції карбідоутворення розвиток структури необхідно розглянути більш детально. Через утворену зону реакції проходить два зустрічних дифузійних потоки. Дифузійний потік ванадію за час  $\Delta t$  доставить в зону реакції кількість атомів ванадію  $\Delta N_V$ . Дифузійний потік вуглецю за той же проміжок часу доставить в зону реакції деяку кількість атомів вуглецю  $\Delta N_C$ . Тоді потужності зустрічних дифузійних потоків ванадію і вуглецю, що потра-

пляють в зону реакції, можна записати як  $\frac{\partial N_V}{\partial t}$  і  $\frac{\partial N_C}{\partial t}$ . Ці дифузійні потоки витрачаються на утворення карбїду ванадію  $V_2C$  в реакційній зоні, і на дифузію в напрямку руху вихідних дифузійних фронтів за межами зони реакції. Схема цих дифузійних потоків наведена на рис. 4.

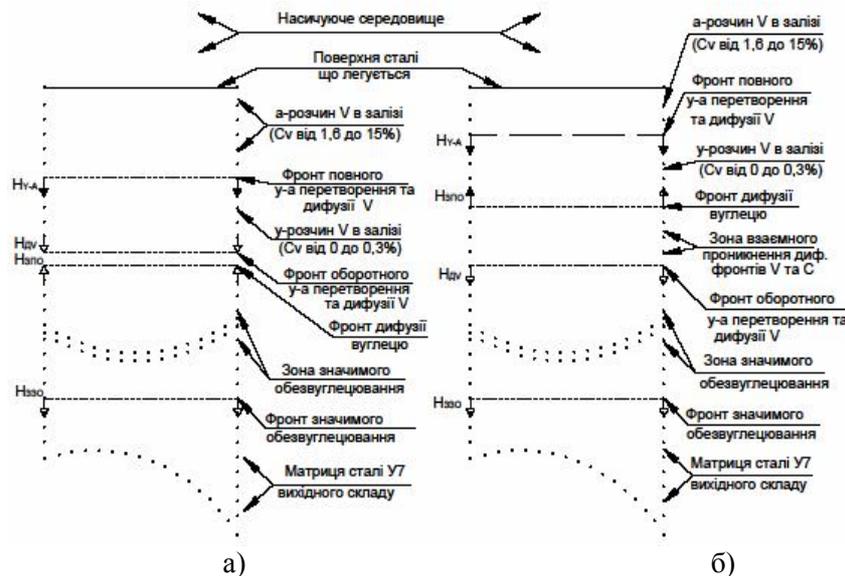


Рисунок 2 – Схема розвитку структури поверхневого шару сталі У7 після попереднього обезвуглецювання, при дифузійному легуванні ванадієм  
 а) стадія зустрічі дифузійних фронтів ванадію і вуглецю  
 б) стадія взаємного проникнення дифузійних фронтів

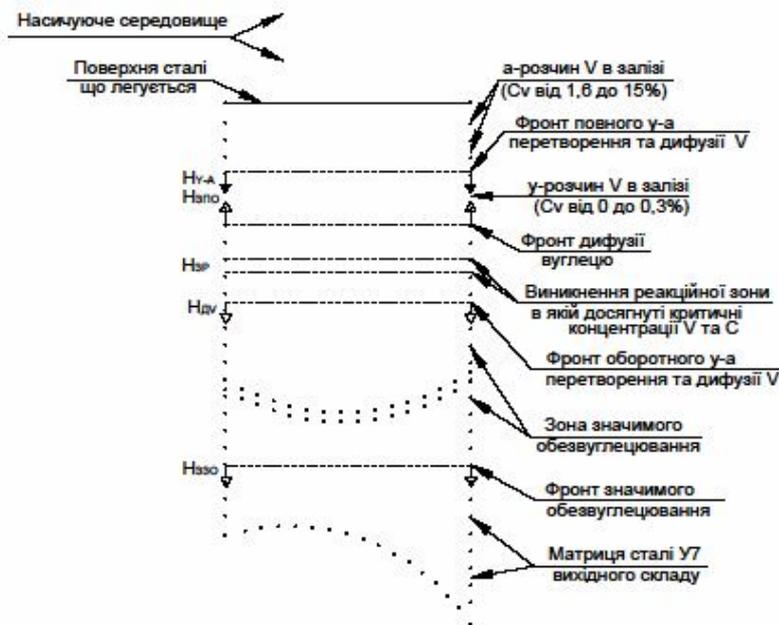


Рисунок 3 – Схема розвитку структури поверхневого шару сталі У7 після попереднього обезвуглецювання, при дифузійному легуванні ванадієм – стадія виникнення реакційної зони

Кількість атомів ванадію, що витрачається на утворення карбїду за час  $\partial t$  позначимо як  $\partial N_{V_{Cv}}$ , а кількість атомів вуглецю як  $\partial N_{C_{Cv}}$ . Тоді витрата елементів на утворення карбїду ванадію в зоні реакції можна записати як  $\frac{\partial N_{V_{Cv}}}{\partial t}$  і  $\frac{\partial N_{C_{Cv}}}{\partial t}$  для ванадію і вуглецю відповідно.

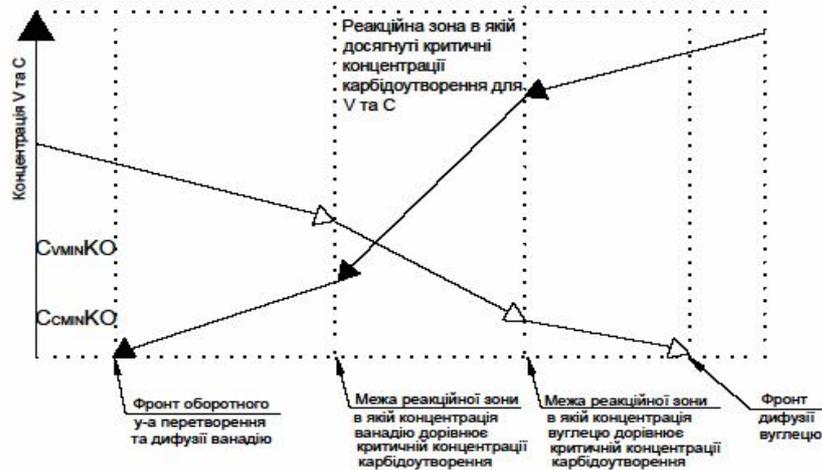


Рисунок 4 – Схема зустрічних дифузійних потоків ванадію і вуглецю в зоні їх взаємного проникнення

Кількість атомів ванадію, що дифундують за межі реакційної зони (в матрицю) за час  $\partial t$  визначимо як  $\partial N_{V\partial}$ , а кількість атомів вуглецю, що дифундують за межі реакційної зони (до поверхні) як  $\partial N_{C\partial}$ . Тоді витрата елементів на утворення дифузійної зони за межами зони реакції можна записати як  $\frac{\partial N_{V\partial}}{\partial t}$  і  $\frac{\partial N_{C\partial}}{\partial t}$  для ванадію і вуглецю відповідно. Тоді для зустрічних дифузійних потоків ванадію і вуглецю, які поступають в зону реакції, ми можемо записати:

$$\frac{\partial N_V}{\partial t} = \frac{\partial N_{V_{Cv}}}{\partial t} + \frac{\partial N_{V\partial}}{\partial t}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_C}{\partial t} = \frac{\partial N_{C_{Cv}}}{\partial t} + \frac{\partial N_{C\partial}}{\partial t}. \quad (1.1)$$

При цьому величини  $\frac{\partial N_{V_{Cv}}}{\partial t}$  і  $\frac{\partial N_{C_{Cv}}}{\partial t}$  пов'язані одна з одною стехіометричним складом карбїду  $V_2C$ . Природно також, що атоми ванадію і вуглецю хімічно зв'язані в карбїд втрачають дифузійну рухливість (вона зменшується на кілька порядків). Проте потужність дифузійних потоків реагентів, що потрапляють в зону реакції, може суттєво відрізнятися від стехіометрично необхідної. Тому вирішальний вплив на положення границь реакційної зони оказують потужності дифузійних потоків ванадію і вуглецю, що покидають цю зону.

Рівновагове положення границь реакційної зони визначається положенням границь з концентрацією  $C_V = C_{V \min KO}$  і  $C_C = C_{C \min KO}$  відповідно. Це означає, що існує деякий дифузійний потік, що покидає зону реакції, рушійною силою якого є перепад

концентрації елемента між границею реакційної зони і матрицею (для ванадію); або границею реакційної зони і поверхнею (для вуглецю).

Тепер позначимо  $\partial N_{V\partial\rho_{\text{рівн}}}$  – кількість атомів ванадію, що дифундують від зони реакції (в матрицю) за час  $\partial t$ , що обумовлено прагненням системи до встановлення рівноваги між концентрацією ванадію на границі реакційної зони  $C_V = C_{V\text{min}KO}$ , і його концентрацією в матриці. Слід відмітити, що цей дифузійний потік не може бути хімічно зв'язаним, так як він лежить в концентраційній області менше критичної концентрації карбідоутворення.

Позначимо  $\partial N_{C\partial\rho_{\text{рівн}}}$  – кількість атомів вуглецю, що дифундують від зони реакції (до поверхні) за час  $\partial t$ , обумовлена прагненням системи до встановлення рівноваги між концентрацією вуглецю на границі реакційної зони  $C_C = C_{C\text{min}KO}$  і його концентрацією в поверхневому шарі. Цей дифузійний потік не може бути хімічно зв'язаний по такій самій причині, що й аналогічний потік атомів ванадію.

Оскільки реагент, що присутній в зоні реакції у надлишку, може цю зону покинути, введемо величину  $\partial N_{V\partial\text{над}}$  – яка визначає кількість атомів ванадію, які дифундують із зони реакції (в матрицю) за час  $\partial t$ , обумовлене надлишком ванадію. Варто відмітити, що цей дифузійний потік може бути хімічно зв'язаний, проте не зв'язується завдяки нестачі вуглецю в зоні реакції.

Для вуглецю введемо аналогічну величину  $\partial N_{C\partial\text{над}}$  – яка означає кількість атомів вуглецю, що дифундують від зони реакції (до поверхні) за час  $\partial t$ , обумовлену надлишком вуглецю в реакційній зоні. Тоді витрату елементів на утворення дифузійної зони за межами зони реакції можна записати так:

$$\frac{\partial N_{V\partial}}{\partial t} = \frac{\partial N_{V\partial\rho_{\text{рівн}}}}{\partial t} + \frac{\partial N_{V\partial\text{над}}}{\partial t}; \quad (2)$$

$$\frac{\partial N_{C\partial}}{\partial t} = \frac{\partial N_{C\partial\rho_{\text{рівн}}}}{\partial t} + \frac{\partial N_{C\partial\text{над}}}{\partial t}. \quad (2.1)$$

При цьому очевидно, що в зоні де реакція іде до кінця обидва вихідних реагенти не можуть залишитися в надлишку одночасно. Вони можуть або:

– обидва витратяться повністю, тоді  $\frac{\partial N_{V\partial\text{над}}}{\partial t} = 0$  і  $\frac{\partial N_{C\partial\text{над}}}{\partial t} = 0$ ;

– або у надлишку залишиться один із реагентів.

Якщо у надлишку залишиться ванадій  $\frac{\partial N_{C\partial\text{над}}}{\partial t} = 0$ . Якщо у надлишку залишиться вуглець  $\frac{\partial N_{V\partial\text{над}}}{\partial t} = 0$ .

Для випадку коли один із реагентів, наприклад, ванадій, залишається у надлишку його дифузійний потік за межі зони реакції виражає рівняння 2. І воно означає що дифузійний потік ванадію за межі зони реакції стає більше потоку, яким рушить перепад концентрації між границею реакційної зони і матриці. А це невідворотно призводить до зростання концентрації ванадію на границі реакційної зони до рівня вище критичного  $C_V > C_{V\text{min}KO}$ , і зрушуванню границі із концентрацією  $C_V = C_{V\text{min}KO}$  в напрямку до матриці – фактично стається зміщення зони реакції.

Логічно також припустити, що у випадку із надлишком ванадію збіднення зони реакції на вуглець до концентрації  $C_C = C_{C\min KO}$  виникне до того, як потік вуглецю досягне вихідного положення границі зони реакції з концентрацією вуглецю яка дорівнює критичній  $C_C = C_{C\min KO}$ . Таким чином надлишок ванадію викличе зміщення обох границь реакційної зони, як вказано на рис. 5.

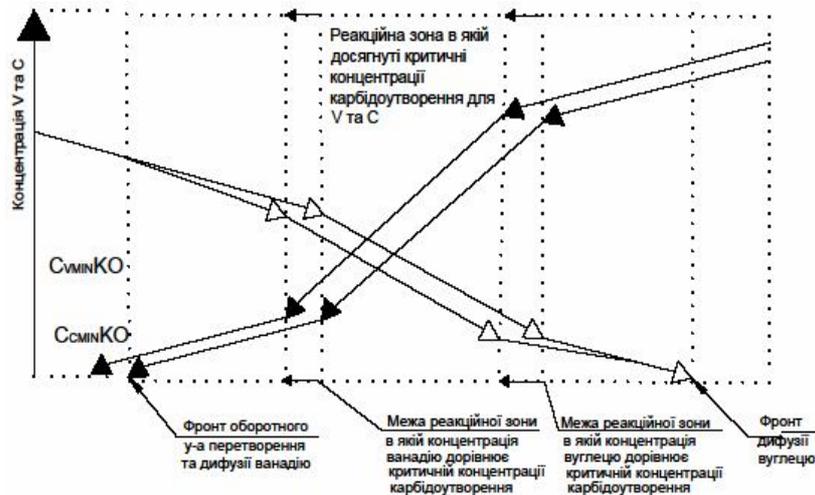


Рисунок 5 – Схема руху реакційного фронту при надлишковій потужності дифузійного потоку ванадію

Таким чином границі зони реакції карбідоутворення змістяться у напрямку дифузії реагенту, який потрапляє в зону реакції у надлишку. У випадку надлишку ванадію дифузійні потоки ванадію і вуглецю, що поступають до зони реакції запишуться як:

$$\frac{\partial N_V}{\partial t} = \frac{\partial N_{V_{св}}}{\partial t} + \frac{\partial N_{V_{д\ рівн}}}{\partial t} + \frac{\partial N_{V_{д\ над}}}{\partial t}; \quad (3)$$

$$\frac{\partial N_C}{\partial t} = \frac{\partial N_{C_{св}}}{\partial t} + \frac{\partial N_{C_{д\ рівн}}}{\partial t}. \quad (3.1)$$

А зона реакції карбідоутворення буде зміщуватися у напрямку дифузії ванадію – від поверхні до матриці, утворюючи фронт карбідоутворення що рухається, або просто фронт карбідоутворення. Аналогічно, у випадку надлишку вуглецю дифузійні потоки ванадію і вуглецю що поступають до зони реакції запишуться як:

$$\frac{\partial N_V}{\partial t} = \frac{\partial N_{V_{св}}}{\partial t} + \frac{\partial N_{V_{д\ рівн}}}{\partial t}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial N_C}{\partial t} = \frac{\partial N_{C_{св}}}{\partial t} + \frac{\partial N_{C_{д\ рівн}}}{\partial t} + \frac{\partial N_{C_{д\ над}}}{\partial t}. \quad (4.1)$$

Зона реакції карбідоутворення буде зміщуватися в напрямку дифузії вуглецю – із матриці до поверхні також утворюючи фронт карбідоутворення.

Для випадку коли обидва реагенти витрачаються повністю ( $\frac{\partial N_{Vнад}}{\partial t} = 0$ ;  $\frac{\partial N_{Cнад}}{\partial t} = 0$ ) кількість атомів ванадію, що дифундують від зони реакції (в матрицю) дорівнюватиме:

$$\frac{\partial N_{Vд}}{\partial t} = \frac{\partial N_{Vд\piвн}}{\partial t} \quad (5)$$

А кількість атомів вуглецю, що дифундують від зони реакції (до поверхні):

$$\frac{\partial N_{Cд}}{\partial t} = \frac{\partial N_{Cд\piвн}}{\partial t} \quad (5.1)$$

Обидва цих дифузійних потоки лежать в концентраційній області менше критичної концентрації карбідоутворення, і тому не призводять до зміщення границь реакційної зони. Тоді для зустрічних дифузійних потоків ванадію і вуглецю, що поступають в зону реакції, справедливо:

$$\frac{\partial N_V}{\partial t} = \frac{\partial N_{Vсв}}{\partial t} + \frac{\partial N_{Vд\piвн}}{\partial t}; \quad (6)$$

$$\frac{\partial N_C}{\partial t} = \frac{\partial N_{Cсв}}{\partial t} + \frac{\partial N_{Cд\piвн}}{\partial t} \quad (6.1)$$

Записавши рівняння для будь якого карбідоутворювача отримаємо умову виникнення стаціонарного фронту карбідоутворення в матриці сплаву що легується:

$$\frac{\partial N_K}{\partial t} = \frac{\partial N_{Kсв}}{\partial t} + \frac{\partial N_{Kд\piвн}}{\partial t}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial N_C}{\partial t} = \frac{\partial N_{Cсв}}{\partial t} + \frac{\partial N_{Cд\piвн}}{\partial t} \quad (7.1)$$

Таким чином, якщо потужності дифузійних потоків карбідоутворювача і вуглецю, що поступають в зону реакції, відповідають стехіометричній їх витраті на утворення карбиду, і одночасно підтримують дифузійний потік за межами зони реакції – зміщення границь зони реакції не виникне.

Тепер повернемося знову до схем процесу наведених на рис. 2 і 3. Логічно припустити, що дифузійний потік ванадію, яким рухає фронт повного  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення, продовжить перемішуватися в напрямку до матриці, наближуючись до границі реакційної зони областю із стрибком концентрації від 0,3–0,4 до 1,6 %. Це означає, що потужність дифузійного потоку ванадію, що поступає до зони реакції змінюється в часі.

За час  $\partial t$  ця зміна складе  $\frac{\partial^2 N_V}{\partial t^2}$ . Виходячи із умови існування стаціонарного фронту

карбідоутворення, прирощення потужності дифузійного потоку ванадію повинно бути повністю витрачено на прирощення потоку ванадію, що вступає в реакцію, і прирощення потужності його дифузійного потоку, що виходить за межі реакційної зони:

$$\frac{\partial^2 N_V}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 N_{V_{св}}}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 N_{V_{\partial \text{рівн}}}}{\partial t^2}. \quad (8)$$

Дійсно, якщо прирощення потужності дифузійного потоку ванадію не відповідає прирощенню його витрати в зоні реакції в сукупності із прирощенням потужності його дифузійного потоку, що виходить за межі реакційної зони  $\frac{\partial^2 N_V}{\partial t^2} \neq \frac{\partial^2 N_{V_{св}}}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 N_{V_{\partial \text{рівн}}}}{\partial t^2}$ , то це може означати:

що воно або більше прирощення витрати ванадію в зоні реакції і прирощення витрати на утворення дифузійної зони між границею зони реакції і матрицею  $\frac{\partial^2 N_V}{\partial t^2} > \frac{\partial^2 N_{V_{св}}}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 N_{V_{\partial \text{рівн}}}}{\partial t^2}$ , а це означає, що в реакційній зоні утворюється надлишок ванадію і  $\frac{\partial^2 N_V}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 N_{V_{св}}}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 N_{V_{\partial \text{рівн}}}}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 N_{V_{\partial \text{над}}}}{\partial t^2}$ ;

або його зміна менше вказаного сукупного прирощення  $\frac{\partial^2 N_V}{\partial t^2} < \frac{\partial^2 N_{V_{св}}}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 N_{V_{\partial \text{рівн}}}}{\partial t^2}$ , а це означає, що в реакційній зоні виникає нестача ванадію і утворюється надлишок вуглецю.

Вище вже було доведено, що надлишок одного із реагентів призводить до зміщенню границь реакційної зони. І фронт карбідоутворення починає рух в напрямку дифузії надлишкового реагенту. Тому для нестационарної зустрічної дифузії карбідоутворювача і вуглецю умова виникнення стаціонарного фронту карбідоутворення в матриці сплаву що легується прийме вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_K}{\partial t} &= \frac{\partial N_{K_{св}}}{\partial t} + \frac{\partial N_{K_{\partial \text{рівн}}}}{\partial t}; \\ \frac{\partial^2 N_K}{\partial t^2} &= \frac{\partial^2 N_{K_{св}}}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 N_{K_{\partial \text{рівн}}}}{\partial t^2}; \\ \frac{\partial N_C}{\partial t} &= \frac{\partial N_{C_{св}}}{\partial t} + \frac{\partial N_{C_{\partial \text{рівн}}}}{\partial t}; \\ \frac{\partial^2 N_C}{\partial t^2} &= \frac{\partial^2 N_{C_{св}}}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 N_{C_{\partial \text{рівн}}}}{\partial t^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Аналогічно висновкам, приведеним вище, для сильних карбідоутворювачів (Nb, Ta, Ti, Zr), а також для Mo, W, V (при понижених температурах легування і потужних зустрічних потоках реагентів), умова виникнення стаціонарного фронту карбідоутворення спрощується:

$$\begin{aligned} \frac{\partial N_K}{\partial t} &= l \frac{\partial N_C}{\partial t}; \\ \frac{\partial^2 N_K}{\partial t^2} &= l \frac{\partial^2 N_C}{\partial t^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

**Висновки 1.** При легуванні залізвуглецевих сплавів такими карбідоутворювачами як Nb, Ta, Ti, Zr, карбіди яких зв'язані сильними ковалентними зв'язками, концентрації карбідоутворювача і вуглецю на виході із зони реакції близькі до нуля. Це означає, що рушійна сила, яка обумовлює дифузію цих елементів від границь зони реакції в область із нульовою вихідною концентрацією, також близька до нуля. В цьому випадку дифузійними потоками  $\frac{\partial N_{K \text{д рівн}}}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial N_{C \text{д рівн}}}{\partial t}$  можна знехтувати. А враховуючи, що величини  $\frac{\partial N_{K \text{св}}}{\partial t}$  і  $\frac{\partial N_{C \text{св}}}{\partial t}$  пов'язані друг із другом стехіометричним складом карбіду, умова виникнення стаціонарного фронту карбідоутворення в матриці сплаву що легується для цих елементів прийме вигляд:

$$\frac{\partial N_K}{\partial t} = l \frac{\partial N_C}{\partial t};$$

$$\frac{\partial^2 N_K}{\partial t^2} = l \frac{\partial^2 N_C}{\partial t^2}.$$

де  $l$  – коефіцієнт який враховує стехіометричний склад карбіду.

Таким чином, при дифузійному легуванні залізвуглецевих сплавів такими карбідоутворювачами як Nb, Ta, Ti, Zr, для виникнення стаціонарного реакційного фронту в матриці достатньо відповідності потужності дифузійних потоків карбідоутворювача і вуглецю, що поступають в зону реакції, їх стехіометричній витраті.

2. При легуванні залізвуглецевих сплавів хромом, карбіди якого відрізняються відносною слабкістю зв'язків, концентрації хрому і вуглецю на виході із реакційної зони значущі, і можуть досягати 14 % Cr і 0,45 % C відповідно. Це означає, що дифузійними потоками  $\frac{\partial N_{K \text{д рівн}}}{\partial t}$ ,  $\frac{\partial N_{C \text{д рівн}}}{\partial t}$  при дифузійному легуванні хромом нехтувати не можна. А виникнення стаціонарного фронту карбідоутворення в матриці справедливо у загальному вигляді.

3. При легуванні залізвуглецевих сплавів такими карбідоутворювачами як Mo, W, V, карбіди яких займають проміжне положення по силі хімічного зв'язку, умова виникнення стаціонарного фронту карбідоутворення в спрощеному вигляді може застосовуватися при понижених температурах легування і потужних зустрічних потоках реагентів. Оскільки при цьому їх дифузійний відтік із зони реакції достатньо малий, у порівнянні із витратою на утворення карбіду ( $\frac{\partial N_{K \text{св}}}{\partial t} \gg \frac{\partial N_{K \text{д рівн}}}{\partial t}$ , і  $\frac{\partial N_{C \text{св}}}{\partial t} \gg \frac{\partial N_{C \text{д рівн}}}{\partial t}$ ). В інших випадках для них справедлива умова в загальному вигляді.

#### Література

1. Boyer H.E., Gall T.L. Metals handbook “Desk Edition” – Ohio: ASM-Metals Park, 1997. – P. 1250.
2. Колотыркін Я.М., Заец І.І., Зайцев І.І. Открытие № 368 // Сб. Открытия в СССР. – 1989. – С. 13.
3. Лоскутов В.Ф., Хижняк В.Г., Куницкий Ю.А., Киндарчук М.В. Диффузионные карбидные покрытия – К.: Техника, 1991. – 168 с.

4. Arai T. Carbide Coating Process by Use of Molten Borax Bath in Japan // J. Heat Treat. – 1979, Vol 18 (No. 2). – P. 15–22.

5. Товажнянський Л.Л., Чуняєва Л.О., Чуняєв О.Н. Умовля виникновєня стационарного поверхностного реакционного фронту при диффузионном легированнї железуголеродистых сплавов карбидообразователями. – Х.: Вєстник НТУ «ХПІ».– №22–2009. – 183 с.

Bibliografy (transliterated)

1. Boyer H.E. Metals handbook “Desk Edition”. H.E. Boyer, T.L. Gall. – Ohio: ASM-Metals Park, 1997. – P. 1250.

2. Kolotyrkin Ya.M., Zayets I.I., Zaytsev I.I. Otkrytie № 368. Sb. Otkrytiya v SSSR. – 1989. – P. 13.

3. Loskutov V.F., Hijnyak V.G., Kunitskiy U.A., Kindarchuk M.V. Diffuzionnye karbidnye pokrytiya – K.: Tehnika, 1991.– 168 p.

4. Arai T. Carbide Coating Process by Use of Molten Borax Bath in Japan. J. Heat Treat. – 1979, Vol 18 (No. 2). – P. 15–22.

5. Tovazhnyanskyu L.L., Chunyaeva L.O., Chunyaev O.N. Usloviya vznikhoveniya statsionarnogo poverhnostnogo reaktсионного фронта pri diffuzionnom legirovanii zhelezouglerodistykh splavov karbidoobrazovatelyami. – Kh.: Vestnik NTU «HPI».– №22–2009. – 183 p.

УДК 620.193.01

Чуняєв О.Н., Быков А.А.

**ВОЗМОЖНОСТЬ ВОЗНИКНОВЕНИЯ СТАЦИОНАРНОГО ФРОНТА  
КАРБИДООБРАЗОВАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ ЖЕЛЕЗУГОЛЕРОДИСТЫХ  
СПЛАВОВ ПРИ ДИФФУЗИОННОМ ЛЕГИРОВАНИИ**

Приведен анализ возможности возникновения стационарного фронта карбидообразования в железуголеродистых сплавах при диффузионном легированнї, и определены мощности встречных диффузионных потоков карбидообразователя и углерода удовлетворяющие образованию такого фронту.

Chunyaev O.N., Bykov A.A.

**THE POSSIBILITY OF INITIATION OF THE STATIONARY FRONT OF CARBIDE  
FORMATION ON THE SURFACE OF FERROCARBON ALLOYS DURING  
DIFFUSION ALLOYING**

Analysis of the possibility of initiation of the stationary front of carbide formation on the surface of ferrociron alloys during diffusion alloying is presented, and the power of the contrary diffusion flows of carbide forming element and carbon are defined.

УДК: 661.333(075)–048.34:005.337

Бобух А.А., Дзевочко А.М., Подустов М.А., Переверзева А.Н., Романенко Р.С.

## **ВЫБОР И ОПТИМИЗАЦИЯ КРИТЕРИЯ УПРАВЛЕНИЯ ОБЪЕКТОМ АБСОРБЦИИ-ДЕСОРБЦИИ ПРОИЗВОДСТВА КАЛЬЦИНИРОВАННОЙ СОДЫ**

### **Введение**

Производство кальцинированной соды по аммиачному способу (ПКС) относится к классу сложных непрерывных химико-технологических систем и подробно рассматривается во многих книгах, в частности [1–4]. Выполненный анализ технологической схемы ПКС позволил сделать вывод о возможности и необходимости декомпозиции задачи управления этим производством на подзадачи управления основными и вспомогательными объектами: абсорбции–десорбции (ОАБ-ДС), карбонизации–фильтрования (ОКБ-ФЛ), термического разложения гидрокарбоната кальция (ОТРГКК), обжига карбоната кальция–гашения извести (ООКК-ГИ), очистки сырого рассола (ООСР), парокотельной (ОПК), компрессорно-вакуум-насосного хозяйства (ОК-ВНХ), оборотного водоснабжения (ООВС). Предложенная декомпозиция является естественной технологически (например, ОАБ-ДС и ОКБ-ФЛ разделены через сборники аммонизированного рассола и фильтровой жидкости), в тоже время позволяет разрабатывать и внедрять компьютерно–интегрированные системы управления (КИСУ) объектами и ПКС в целом при условии согласования производительности этих объектов.

Из анализа общей суммы затрат на получение 1 т кальцинированной соды вытекает, что на технологические процессы ОАБ-ДС приходится более 60 % всех затрат на ПКС [3]. Указанное предопределило рассмотреть в первую очередь задачу выбора и оптимизации критерия управления ОАБ-ДС, что позволит повысить технико-экономические показатели ПКС в целом при реализации КИСУ ОАБ-ДС.

### **Цель работы**

Для выполнения поставленной задачи необходимо выбрать технико-экономический критерий управления ПКС, выраженный через критерий функционирования его объектов, чтобы с единых позиций рассмотреть управление ОАБ-ДС и ПКС в целом, что позволит формализовать задачу управления рассматриваемым объектом и определить пути оптимизации его критерия управления.

### **Основная часть**

Исследования показали, что химико-технологические процессы ПКС относятся к классу объектов, в которых технологические процессы перерабатываемого сырья, находясь в непрерывном контакте с аппаратами различного технологического назначения, изменяют свои химические составы. В ОАБ-ДС происходит практически полная регенерация аммиака и диоксида углерода из растворов и абсорбция газов всего производства. Выбор и оптимизация технико-экономического критерия (ТЭК) управления этим объектом представляет собой сложный процесс его изучения для получения математических зависимостей, используемых при разработке КИСУ этим объектом и производством кальцинированной соды по аммиачному способу в целом.

Поэтому остановимся на кратком описании (рисунок 1) фрагмента упрощенной технологической схемы типового объекта абсорбции–десорбции ПКС, состоящего из четырех параллельно работающих элементов (на рис. 1 показан только первый элемент,

все другие не показаны), в состав которых входят последовательно – параллельно соединенные аппараты колонного типа. В каждый элемент ОАБ-ДС входят аппараты: десорбционной части – конденсатор-холодильник газа дистилляции (КХДС) (1); теплообменник дистилляции (ТДС) (2); смеситель (реактор с мешалкой) (СМ) (3); дистиллер (ДС) (4); и абсорбционной части – промыватели: воздуха фильтров (ПВФЛ) (5), газа абсорбции (ПГАБ) (6), второй газа колонн (ПГКЛ-2) (7) и абсорбер (АБ) (8). Потoki жидкостные и пара на входах в ОАБ-ДС и в аппараты первого элемента обозначены условно, расходы: фильтровой жидкости ( $X_1, X_{11}$ ) из сборника этой жидкости ОКБ-ФЛ; пара ( $X_2, X_{21}$ ) из ОПК; очищенного рассола ( $X_3, X_{31}$ ) из сборника этого рассола ООСР; известковой суспензии ( $X_4, X_{41}$ ) из ООКК-ГИ; холодной воды ( $X_5, X_{51}$ ) из ООВС; а на выходах из аппаратов: суспензии дистилляции ( $X_{61}$ ) из ДС (4) в накопителе, аммонизированного рассола ( $X_{71}$ ) из АБ (8) в ОКБ-ФЛ. В этих же потоках также обозначены условно концентрации: аммиака ( $Y_{11}$ ) и хлора ( $Y_{21}$ ) в аммонизированном рассоле ( $X_{71}$ ); аммиака ( $Y_{41}$ ) и хлора ( $Y_{51}$ ) в суспензии дистилляции ( $X_{61}$ ); а также – температуры потока смеси аммиака, диоксида углерода и пара ( $Y_{31}$ ) из ДС (4) в АБ (8).

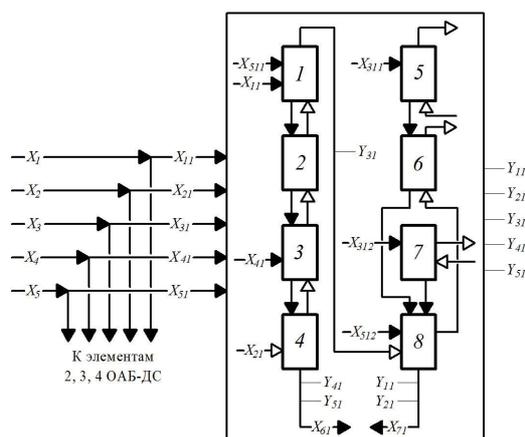


Рисунок 1 – Фрагмент упрощенной технологической схемы первого элемента объекта абсорбции–десорбции ПКС

Процесс десорбции аммиака и диоксида углерода из фильтровой жидкости ( $X_1, X_{11}$ ) начинается с десорбционной части в КХДС (1). Затем в ТДС (2) выделяются практически весь диоксид углерода и часть аммиака за счет термического разложения углеаммонийных солей, имеющих в фильтровой жидкости. В СМ (3) происходит химическое разложение связанного аммиака жидкости из ТДС (2) с помощью известковой суспензии ( $X_4, X_{41}$ ). Полная отгонка аммиака из жидкости заканчивается в ДС (4), в который подают пар ( $X_2, X_{21}$ ) под давлением. Парогазовая смесь в указанных аппаратах движется снизу вверх противотоком по отношению к жидкости. Образовавшийся в результате десорбции поток смеси аммиака, диоксида углерода и пара, охлажденный в холодильной части КХДС (4) первой частью холодной воды ( $X_5, X_{51}$ ) до температуры 58–62°C ( $Y_{31}$ ), поступает в АБ (8) абсорбционной части ОАБ-ДС, а суспензия дистилляции ( $X_{61}$ ) – в накопителе (на рис. 1 не показаны).

Процесс абсорбции аммиака очищенным рассолом ( $X_3, X_{31}$ ) осуществляется в абсорбционной части, причем 20 % этого рассола ( $X_{311}$ ) поступает в ПВФЛ (5), а 80 % ( $X_{312}$ ) – в ПГКЛ-2 (7). В ПВФЛ (5) улавливается аммиак из смеси воздуха и аммиака, просасываемой вакуум-насосами ОК-ВНХ из фильтровальной части ОКБ-ФЛ и, при необходимости, аммиака и виде аммиачной воды. В ПГКЛ-2 (7) происходит поглощение диоксида углерода из парогазовой смеси, поступающей под давлением с помощью компрессоров ОК-ВНХ из карбонизационной части ОКБ-ФЛ, после этих аппаратов в воздух выбрасывается практически чистый воздух. Жидкость из ПВФЛ (5) перетекает в ПГАБ (6), через который вакуум-насосами ОК-ВНХ просасываются газовые смеси из АБ (8), при этом аммиак абсорбируется, а диоксид углерода подается в аппараты ОTRГКК (на рис. 1 газовые потоки показаны условно).

Из ПГКЛ-2 (7) и ПГАБ (6) жидкости поступают в АБ (8) и насыщаются аммиаком и диоксидом углерода из парогазовой смеси ( $Y_{31}$ ), поэтому нагреваются до температуры свыше  $68^{\circ}\text{C}$ . В холодильную часть АБ (8) и пластинчатый холодильник подается вторая часть холодной воды ( $X_5, X_{512}$ ) для отвода выделяющейся теплоты. После АБ (8) аммонизированный рассол ( $X_{71}$ ) направляется в сборники этого рассола (на рис. 1 не показаны).

Сравнительный анализ существующих ТЭК управления [5] позволил сделать вывод о том, что применительно к ПКС целесообразно отказаться от учета эффекта улучшения использования основных фондов, так как это производство прирост дохода компенсирует с избытком увеличение эксплуатационных затрат и возможностей накопления, важным источником которого является прирост чистого дохода. Таким образом, наиболее целесообразно использовать показатель чистого дохода ( $D_{общ}$ ) в качестве общего ТЭК оптимизации при решении задачи оптимального управления технологическими процессами ПКС в виде:

$$D_{общ} = (C_c - S_c)P_c, \text{ или } D_{общ} = C_c P_c - Z_c, \quad (1)$$

где  $D_{общ}$  – общий чистый доход ПКС, грн/ч;  $C_c$  – цена 1 т кальцинированной соды, грн/ч;  $S_c$  – себестоимость 1 т кальцинированной соды, грн/ч;  $P_c$  – производительность по соде ПКС, т/ч;  $Z_c$  – затраты по производству на получение  $P_c$  т соды за 1 ч, грн/ч.

При определении частных ТЭК функционирования объектов ПКС необходимо учитывать, что в области допустимых решений они должны согласовываться с общим ТЭК ПКС, чтобы ни при каких условиях не возникло противоречие между интересами производства в целом и его отдельных объектов. При этом необходимо установить количественные взаимосвязи между показателями ТЭК и необходимыми параметрами технологического процесса, выявить те переменные, которые оказывают влияние на ход этого процесса и качество продукции, и определить их допустимые изменения.

Исходя из вышеизложенного, в качестве ТЭК функционирования  $i$  – го элемента ОАБ-ДС ПКС принят чистый доход ( $D_i, \text{грн} / \text{ч}$ ), который формально записывается аналогично формуле (1):

$$D_i = (C_i - S_i)P_i = C_i P_i - Z_i, \quad (2)$$

где  $C_i$  – цена полупродукта  $i$ -го элемента ОАБ-ДС, грн/м<sup>3</sup>;  $S_i$  – себестоимость полупродукта  $i$ -го элемента ОАБ-ДС, грн/м<sup>3</sup>;  $P_i$  – производительность по полупродукту  $i$ -го элемента ОАБ-ДС, м<sup>3</sup>/ч;  $Z_i$  – затраты в  $i$ -м элементе ОАБ-ДС на получение  $P_i$  м<sup>3</sup> полупродукта за 1 ч, грн/ч.

При использовании формулы (2) возникают трудности, поскольку элементы и ОАБ-ДС в целом не являются производционными, а на полупродукты не устанавливаются цены. Поэтому цену полупродукта ОАБ-ДС определим путем суммирования его прибыли с себестоимостью полупродукта. Причем прибыль в расчете на единицу измерения полупродукта этого объекта определяется, исходя из общей прибыли на 1 т кальцинированной соды, путем умножения ее на долю затрат по заработной плате и расходам, связанным с эксплуатацией и содержанием ОАБ-ДС в общей сумме затрат по ПКС на 1 т этой же соды. С учетом изложенного расчет цены ( $C_1$ ) полупродукта этого объекта производим по формуле:

$$C_1 = \frac{F + \sum_{\chi=1}^n g_{\chi\lambda} + k_{yn}}{y_p}, \quad (3)$$

где  $C_1$  – цена полупродукта (аммонизированного рассола) ОАБ-ДС, грн/м<sup>3</sup>;  $F$  – фактическая прибыль по ОАБ-ДС, грн/ч;  $g_{\chi\lambda}$  – удельный расход всех ( $\chi = \overline{1, n}$ )  $\lambda$ -х материально-энергетических ресурсов ОАБ-ДС, м<sup>3</sup>/ч;  $k_{yn}$  – условно-постоянные расходы ОАБ-ДС, грн/м<sup>3</sup>;  $y_p$  – удельный расход аммонизированного рассола ОАБ-ДС, м<sup>3</sup>/ч.

Формально для расчета ТЭК функционирования типового четырехэлементного ( $i = \overline{1, 4}$ ) ОАБ-ДС в виде чистого дохода ( $D$ ) достаточно суммировать значения чистых доходов ( $D_i$ ) по каждому элементу. Фактически, полученное таким образом значение чистого дохода ( $D$ ) ОАБ-ДС, необходимо корректировать в зависимости от качественных показателей производционных потоков, влияющих на протекание технологических процессов в последующем объекте (ОКБ-ФЛ). Выполняется это путем умножения отклонений текущих значений указанных показателей от их базовых значений на соответствующий коэффициент, отражающий влияние этих показателей на изменение дохода от последующего объекта, а не на изменение дохода ПКС в целом. Эти коэффициенты необходимо определять на основе анализа влияния работы ОАБ-ДС на работу ОКБ-ФЛ. Затраты на добавки (сульфидные) и электроэнергию по ОАБ-ДС отнесены к условно-постоянным расходам, так как учет их затруднен, а изменение технологического режима практически не оказывает влияния на их изменение.

Для улучшения технико-экономических показателей ПКС и недопущения загрязнения окружающей среды в ОАБ-ДС перерабатывается фильтровая жидкость, являющаяся отходом ПКС, как ведущий поток на этот объект, поэтому полученный аммиак возвращается в производство. Цена фильтровой жидкости не определяется, поскольку содержащийся в ней аммиак является частью всего аммиака, циркулирующего в производстве, вследствие чего его стоимость не рассчитывается и не учитывается в себестоимости кальцинированной соды. Имеющиеся в производстве потери аммиака учитываются при определении затрат в ОАБ-ДС.

Исходя из изложенного, ТЭК функционирования типового четырехэлементного

( $i = \overline{1,4}$ ) ОАБ-ДС в виде чистого дохода ( $D$ ) запишем в виде:

$$D = \sum_{i=1}^4 D_i = \sum_{i=1}^4 \{ [C_1 + (Y_{1i} - \bar{Y}_{1i})K_{1i} + (Y_{2i} - \bar{Y}_{2i})K_{2i} + (\bar{Y}_{3i} - Y_{3i})K_{3i}] g_{1i} + K_{4i} X_{1i} - C_2 X_{2i} - C_3 X_{3i} - C_4 X_{4i} - C_5 X_{5i} - C_6 (g_{2i} + g_{3i}) - K_{5i} \}, \quad (4)$$

где  $C_1$  – цена 1 м<sup>3</sup> аммонизированного рассола (по формулу (3)), грн/м<sup>3</sup>;  $C_2 - C_6$  – цена из калькуляции себестоимости кальцинированной соды на расходы: пара, грн/т; очищенного рассола, грн/м<sup>3</sup>; известкой суспензии, грн/т; холодной воды, грн/м<sup>3</sup>; аммиачной воды, грн/м<sup>3</sup> соответственно;  $X_{1i}$  – расход фильтровой жидкости на  $i$ -й элемент, м<sup>3</sup>/ч;  $X_{2i}$  – расход пара на  $i$ -й элемент, т/ч;  $X_{3i}$  – расход очищенного рассола на  $i$ -й элемент, м<sup>3</sup>/ч;  $X_{4i}$  – расход известковой суспензии на  $i$ -й элемент, м<sup>3</sup>/ч;  $X_{5i}$  – суммарный расход холодной воды на  $i$ -й элемент, м<sup>3</sup>/ч;  $g_{1i}$  – производительность  $i$ -го элемента, м<sup>3</sup>/ч;  $g_{2i}$  – потери аммиака с газами в  $i$ -м элементе, кг/ч;  $g_{3i}$  – потери аммиака с суспензией дистилляции, кг/ч;  $K_{1i} - K_{3i}$  – коэффициенты изменения дохода в ОКБ-ФЛ в результате изменения концентрации аммиака и хлора в аммонизированном рассоле, а также температуры смеси аммиака, диоксида углерода и пара из КХДС (1) в АБ (8)  $i$ -го элемента ОАБ-ДС, грн/Кмоль; грн/Кмоль; грн/°С соответственно;  $K_{4i}$  – коэффициент изменения затрат в  $i$ -м элементе ОАБ-ДС в результате изменения разбавления фильтровой жидкости, скорректированный на отклонение этого разбавления по хлору от базового значения, грн/ч;  $K_{5i}$  – условно-постоянные расходы по  $i$ -му элементу ОАБ-ДС, грн/ч;  $Y_{1i}, \bar{Y}_{1i}$  – текущее и базовое значения содержания аммиака в аммонизированном рассоле после  $i$ -го элемента ОАБ-ДС, Кмоль/м<sup>3</sup>;  $Y_{2i}, \bar{Y}_{2i}$  – текущее и базовое значения содержания хлора в аммонизированном рассоле после  $i$ -го элемента ОАБ-ДС, Кмоль/м<sup>3</sup>;  $Y_{3i}, \bar{Y}_{3i}$  – текущее и базовое значения температуры смеси аммиака, диоксида углерода и пара из КХДС (1) в АБ (8)  $i$ -го элемента ОАБ-ДС, °С.

Поскольку параметры  $g_{1i}, g_{2i}, g_{3i}$  непосредственно не измеряются, они пересчитываются с учетом контролируемых и вычисляемых параметров, что приводит после преобразований формулы (4) к виду:

$$D = \sum_{i=1}^4 D_i = \sum_{i=1}^4 \{ [C_1 + (Y_{1i} - \bar{Y}_{1i})K_{1i} + (Y_{2i} - \bar{Y}_{2i})K_{2i} + (\bar{Y}_{3i} - Y_{3i})K_{3i}] \frac{K_6 X_{3i}}{Y_{2i}} + K_{4i} X_{1i} - C_2 X_{2i} - C_3 X_{3i} - C_4 X_{4i} - C_5 X_{5i} - C_6 (K_{7i} + K_{8i} \frac{Y_{4i}}{Y_{5i}}) X_{6i} - K_{5i} \}, \quad (5)$$

где  $K_6$  – базовое значение содержания хлора в очищенном рассоле, Кмоль/м<sup>3</sup>;  $K_{7i}, K_{8i}$  – коэффициенты, учитывающие потери аммиака с газами и с суспензией дистилляции  $i$ -го элемента ОАБ-ДС, кг/м<sup>3</sup>;  $Y_{4i}$  – содержание аммиака в суспензии дистилляции  $i$ -го элемента ОАБ-ДС, моль/м<sup>3</sup>;  $Y_{5i}$  – содержание хлора в суспензии дистилляции  $i$ -го элемента ОАБ-ДС, Кмоль/м<sup>3</sup>.

Управляемые параметры технологического процесса  $i$ -х элементов ОАБ-ДС

$(Y_{si})$  ( $s = \overline{1,5}; i = \overline{1,4}$ ) автоматически не контролюються (криме  $(Y_{si})$ ). Поэтому для расчета величини чистого дохода по предложенному критерию (5) необходимо использовать их зависимости от управляющих переменных  $(X_{ji})$  ( $j = \overline{1,5}; i = \overline{1,4}$ ) вида:

$$Y_{si}(t) = f_{si}(X_{ji}(t) + \xi_{si}, (t) (s = \overline{1,5}; i = \overline{1,4}; j = \overline{1,5}), \quad (6)$$

где  $\xi_{si}$  – неконтролируемые возмущения;  $t$  – время.

Технологическим регламентом для ОАБ-ДС установлены жесткие ограничения на минимальные и максимальные изменения управляющих  $(X_{ji}(t))$  и управляемых  $(Y_{ji}(t))$  параметров вида:

$$\begin{aligned} X_{ji}^{\min} &\leq X_{ji}(t) \leq X_{ji}^{\max}, (j = \overline{1,5}; i = \overline{1,4}), \\ Y_{si}^{\min} &\leq Y_{si}(t) \leq Y_{si}^{\max}, (s = \overline{1,5}). \end{aligned} \quad (7)$$

Существуют для ОАБ-ДС и специфические ограничения: по суммарному расходу  $(R)$  фильтровой жидкости

$$R - \varepsilon \leq \sum_{i=1}^4 X_{1i}(t) \leq R + \varepsilon, \quad (8)$$

и характеризующие степень абсорбции аммиака очищенным рассолом

$$G_1 \leq \frac{Y_{1i}(t)}{Y_{2i}(t)} \leq G_2, \text{ или } G_1 Y_{2i}(t) \leq Y_{1i}(t) \leq G_2 Y_{2i}(t), \quad (9)$$

где  $R$  – суммарная нагрузка (расход) ОАБ-ДС по ведущему потоку – фильтровой жидкости, зависящая от плана выпуска кальцинированной соды;  $\varepsilon$  – малое число, зависящее от содержания аммиака в фильтровой жидкости;  $G_1 = 1,12; G_2 = 1,17$  – ограничения, характеризующие степень абсорбции аммиака очищенным рассолом.

Учитывая, что зависимости (5) и (6) являются функциями времени и неконтролируемых возмущений, задачу управления ОАБ-ДС можно сформулировать следующим образом: определить максимум чистого дохода (5) по управляющим переменным  $(X_{ji}(t), j = \overline{1,5}, i = \overline{1,4})$  при ограничениях вида равенства (6) и неравенств (7) – (9).

Так как предложенная задача в общем виде представляет собой задачу нелинейного программирования [6, 7], для нахождения эффективных методов ее решения перепишем зависимость (5) в следующем виде:

$$D(t) = \sum_{i=1}^4 D_i(X_{ji}, Y_{si}, t). \quad (10)$$

Задачу оптимизации (10) необходимо решать как задачу оптимизации  $i$  – х элементов ОАБ-ДС при выполнении неравенства (8). Предложенное решение приводит к следующей декомпозиции задачи оптимизации (10):

$$\max_{X_{ji}} \sum_{i=1}^4 D_i(X_{ji}, Y_{si}, t) = \max_{X_{1i}} \sum_{i=1}^4 \max_{X_{ji}, j \neq 1} D_i(X_{ji}, Y_{si}, t). \quad (11)$$

Декомпозиція задачі (10) сприяє переходу від вихідної задачі нелінійного програмування до чотирьох задач пониженої розмірності визначення максимумів  $D_i (i = \overline{1, 4})$  при фіксованих значеннях  $X_{1i}$ , а також – до задачі визначення оптимума по  $X_{1i}$ .

Задачі (11) при обмеженнях (6)–(9) прийнято називати для об'єктів ПКС задачами розподілу навантажень (для ОАБ-ДС розподілу фільтрувальної рідини  $X_{1i}$  як ведучого потоку [3]).

Декомпозиція задачі нелінійного програмування (10) до задачі (11) дозволяє не тільки зменшити складність рішення (складність рішення росте швидше, ніж лінійна функція від розмірності задачі), але й передбачає зручний метод для оптимізації – динамічне програмування [8], оскільки задача оптимізації (11) при фіксованих значеннях  $X_{1i}$  представляється як багатоступінчастий процес з кінцевими обмеженнями (8).

В зв'язі з тим, що чистий дохід ( $D(t)$ ) ОАБ-ДС є функцією не тільки керуючих змінних  $X_{ji}$ , але й часу (нестационарної величини), задачу оптимізації (11) неможливо розв'язувати одноразово. Тому необхідно розв'язувати її періодично через інтервали часу, впродовж яких зміна характеристик ОАБ-ДС не призводить до недопустимого відхилення оцінюваної величини чистого доходу від його дійсного значення. Існує нижня межа рішення задачі оптимізації (11), обумовлена швидкістю сучасних мікропроцесорних контролерів (МПК). Запропонований інтервал рішення задачі оптимізації (11) назвемо великим інтервалом часу і він визначено на практиці тривалістю в вісім годин (робоча зміна ПКС).

Оскільки рішення задачі оптимізації (11) пов'язано з великими інтервалами часу, всередині них можливе дрейф значень керуваних змінних ( $Y_{si}(t)$ ):

$$Y_{si}(t) = f_{si}(\arg \max_{X_{ji}} D(t), t + \xi_{si}), \quad (12)$$

з їх оптимальних значень, визначених з рішення задачі оптимізації (11):

$$Y_{si}(0) = f_{si}(\arg \max_{X_{ji}} D(t), 0 + \xi_{si}), \quad (13)$$

де  $t = 0$  позначає початок великого інтервалу. В зв'язі з вказаним дрейфом всередині великого інтервалу часу необхідно ввести малі інтервали (в реальному масштабі) часу, для яких повинна розв'язуватися задача стабілізації  $Y_{si}(t)$  відносно

до  $Y_{si}(0)$ . При розв'язанні задачі стабілізації впродовж малих інтервалів часу необхідно прагнути до мінімуму витрат керуючих параметрів ( $\min I$ ):

$$\min_{X_{ji}} I = \min_{X_{ji}} \sum_{s=1}^5 \sum_{\substack{i=1 \\ s \neq 3}}^4 (Y_{si}(t) - Y_{si}(0))^2; j = \overline{1,5}, \quad (14)$$

причем ведущий поток – расход фильтровой жидкости ( $X_{1i}$ ) необходимо оставить неизменным, что позволяет разбить задачу (14) на ряд скалярных задач при фиксированных  $i^*$ :

$$\min_{X_{ji^*}} I_{i^*} = \min_{X_{ji^*}} \sum_{s=1}^5 \sum_{\substack{i=1 \\ s \neq 3}}^4 (Y_{si^*}(t) - Y_{si^*}(0))^2; j = \overline{2,5}, i = \overline{1,4}. \quad (15)$$

Решение совокупности задач (15) позволяет на всех малых интервалах (в реальном масштабе) времени стабилизировать технологические ограничения  $Y_{si}(t)$  на спланированных в начале большого интервала оптимальных значениях.

Практическая реализация предложенной стратегии (10 – 15) управления ОАБ-ДС может быть обеспечена при рабочем состоянии оборудования с применением адаптивных рекуррентных процедур управления [9] и наличии необходимых основных математических моделей. Для нестационарного процесса ОАБ-ДС эти модели могут быть получены с помощью адаптивных алгоритмов идентификации нестационарных объектов [10]. Для разработки КИСУ ОАБ-ДС предложенные математические зависимости (1–15) наиболее просто можно осуществить при помощи многофункциональных, быстродействующих и высоконадежных МПК со специальным программным обеспечением [11]. Контроль и управление соответствующими параметрами необходимо осуществлять современными контрольно-измерительными приборами и средствами автоматизации [11]. Реализация разработанной КИСУ ОАБ-ДС будет способствовать повышению эффективности функционирования этого объекта и снижению энергетических затрат всего ПКС в целом.

**Вывод.** В результате исследований технико-экономического критерия управления для ПКС, выбран критерий чистого дохода ОАБ-ДС и обоснована целесообразность его использования. Приведен конкретный вид критерия чистого дохода и формализована задача оптимизации ОАБ-ДС, которую целесообразно рассматривать как решение двух задач управления на большом (8 часов) и малом интервалах (реальный масштаб) времени. Показано, что на первом интервале времени решается задача оптимизации, а на втором – задача стабилизации.

Применение критерия чистого дохода для управления ОАБ-ДС позволит повысить технико-экономические показатели ПКС в целом при реализации КИСУ ОАБ-ДС.

#### Литература

1. Шокин И.Н. Технология соды [Текст] / И.Н. Шокин, С.А. Крашенинников. – М.: Химия. 1975. – 287 с.
2. Зайцев И.Д. Теория и методы автоматизированного проектирования химических производств. Структурные основы [Текст] / И. Д. Зайцев. – К.: Наукова думка. 1981. – 309 с.
3. Зайцев И.Д. Производство соды [Текст] / И.Д. Зайцев, Г.А. Ткач, Н.Д. Стоев. – М.: Химия. 1984. – 312 с.

4. Крашенинников С.А. Технология кальцинированной соды и очищенного бикарбоната натрия [Текст] / С.А. Крашенинников. – М.: Высшая школа. 1985. –286 с.
5. Бобух А.А. Автоматизированная система управления технологическими процессами содового производства: Обзорная информация / А.А. Бобух, В.М. Момот, Л.А. Байбакова. – М.: НИИТЭХИМ. 1981. – 36 с.
6. Базара М. Нелинейное программирование. Теория и алгоритмы [Текст] / М. Базара, К. Шетти. Пер. с англ. – М.: Мир. 1982. –563 с.
7. Холоднов В.А. Решение задач нелинейного программирования на основе градиентных методов с использованием компьютерной математики Mathcad: Методические указания / В.А. Холоднов, Е.С. Боровинская, В.П. Андреева, В.И. Черемисин. – СПб.: СПб ГТИ (ТУ). 2010. – 69 с.
8. Беллман Р. Динамическое программирование и современная теория управления [Текст] / Р. Беллман, Р. Калаба . – М.: Наука. 1969. – 118 с.
9. Бобух А.А. Оптимальный в классе адаптивных рекуррентных процедур алгоритм управления [Текст] / А.А. Бобух, Д.А. Ковалев, А.М. Дзевочко , А.А. Климов, М.А. Подустов, А.Н. Переверзева // Щоквартальний науково-практичний журнал «Інтегровані технології та енергозбереження». Видавничий центр НТУ «ХП». – 2015. № 2. – С. 23–29.
10. Бобух А.А. Двухшаговый адаптивный алгоритм идентификации нестационарных объектов [Текст] / А.А. Бобух, А.М. Дзевочко , М.А. Подустов, А.С. Кравченко // Вісник НТУ «ХП». – Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія. – Х.: НТУ «ХП». – 2015. № 30 (1139). – С. 11–17.
11. Бобух А.А. Компьютерно–интегрированная система автоматизации технологических объектов управления централизованным теплоснабжением: монография [Текст] / А.А. Бобух, Д.А. Ковалев; под ред. А.А. Бобуха. – Х.: ХНУГХ им. А.Н. Бекова, 2013. – 226 с.

Bibliography (transliterated)

1. Shokin I.N. Tehnologiya sodyi [Tekst]. I.N. Shokin, S.A. Krashennnikov. – Moskow: Himiya, 1975. – 287 p.
2. Zaytsev I.D. Teoriya i metodyi avtomatizirovannogo proektirovaniya himicheskikh proizvodstv. Strukturnye osnovyi [Tekst]. I. D. Zaytsev. – K.: Nauk. dumka. 1981. – 309 p.
3. Zaytsev I.D. Proizvodstvo sodyi [Tekst]. I.D. Zaytsev, G.A. Tkach, N.D. Stoev. – Moskow: Himiya. 1984. – 264 p.
4. Krashennnikov S.A. Tehnologiya kaltsinirovannoy sodyi i ochischennogo bikarbonata natriya [Tekst]. S.A. Krashennnikov.– Moskow: Vyssh. shkola. 1985. –286 p.
5. Bobuh A.A. Avtomatizirovannaya sistema upravleniya tehnologicheskimi protsesami sodovogo proizvodstva: Obzornaya informatsiya. A.A. Bobuh, V.M. Momot, L.A. Baybakova. – М.: НИТЕХИМ. 1981. – 36 p.
6. Bazara M. Nelineynoe programmirovaniye. Teoriya i algoritmyi [Tekst]. M. Bazara, K. Shetti. Per. s ang. – М.: Mir. 1982. –563 p.
7. Holodnov V.A. Reshenie zadach nelineynogo programmirovaniya na osnove gradientnykh metodov s ispolzovaniem kompyuternoy matematiki Mathcad: Metodicheskie ukazaniya. V.A. Holodnov, E.S. Borovinskaya, V.P. Andreeva, V.I. Cheremisin. – SPb.: SPb GTI (TU). 2010. – 69 p.
8. Bellman R. Dinamicheskoe programmirovaniye i sovremennaya teoriya upravleniya [Tekst]. R. Bellman, R. Kalaba . – М.: Nauka. 1969. – 118 p.

9. Bobuh, A.A. Optimalniy v klasse adaptivnykh rekurrentnykh protsedur algoritm upravleniya [Tekst]. A.A. Bobuh, D.A. Kovalev, A.M. Dzevochko, A.A. Klimov, M.A. Podustov, A.N. Pereverzeva. Schokvartalniy naukovo-praktichniy zhurnal «Integrovani tehnologii ta energozberezheniya». NTU «KHPI». – 2015. № 2. – P. 23–29.

10. Bobuh, A.A. Dvuhshagoviy adaptivniy algoritm identifikatsii nestatsionarnykh ob'ektov [Tekst]. A.A. Bobuh, A.M. Dzevochko, M.A. Podustov, A.S. Kravchenko. Visnik NTU «KHPI». – 2015. № 30 (1139). – P. 11–17.

11. Bobuh A.A. Kompjuterno–integrirovannaja sistema avtomatizacii tehnologicheskikh obektov upravlenija centralizovannym teplosnabzheniem: monografija [Tekst]. A.A. Bobuh, D.A. Kovalev; pod red. A.A. Bobuha. – H.: HNUGH im. A.N. Beketova, 2013. – 226 p.

УДК: 661.333(075)–048.34:005.337

Бобух А.О., Дзевочко О.М., Подустов М.О., Переверзева А.М., Романенко Р.С.

### **ВИБІР ТА ОПТИМІЗАЦІЯ КРИТЕРІЯ КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТОМ АБСОРБЦІЇ-ДЕСОРБЦІЇ ВИРОБНИЦТВА КАЛЬЦИНОВАНОЇ СОДИ**

В результаті досліджень техніко-економічного критерію керування для виробництва кальцированої соди за аміачним способом, вибраний критерій чистого доходу об'єкта абсорбції-десорбції та обґрунтована доцільність його використання. Приведено конкретний вид критерію чистого доходу та формалізована задача оптимізації об'єкта абсорбції-десорбції, яку доцільно розглядати як розв'язання двох задач керування на великому (8 годин) та малому (реальному масштабі) інтервалах часу. Показано, що на першому інтервалі часу треба розв'язувати задачу оптимізації, а на другому – задачу стабілізації.

Застосування критерію чистого доходу для керування об'єктом абсорбції-десорбції дозволить підвищити техніко-економічні показники об'єкта абсорбції-десорбції та виробництва кальцированої соди за аміачним способом в цілому при реалізації комп'ютерно – інтегрованої системи керування об'єктом абсорбції-десорбції.

Bobukh A.A., Dzevochko A.M., Podustov M.A., Pereverzeva A.N., Romanenko R.S.

### **SELECTION AND OPTIMIZATION CRITERIA CONTROL FOR OBJECT OF ABSORPTION-DESORPTION IN SODA ASH PRODUCTION**

The studies of technical and economic criteria control for the soda ash production by ammonia method, the selected criterion of net income of the facility of absorption-desorption and the expediency of its use. When held a particular view of the criterion of net income and formalized the optimization problem of the object absorption-desorption, which should be viewed as the solution of two tasks control of large and small intervals. It is shown that on a large time interval, it is necessary to solve the optimization problem, and the small task of stabilization.

The application of the criterion of net income to control the object absorption-desorption will improve technical and economic indices of the object absorption-desorption of soda production by ash ammonia method in General when delivering computer – integrated control systems for object of absorption-desorption.

Анипко О.Б.<sup>1</sup>, Сиренко С.Н.<sup>2</sup>, Ковтонюк И.Б.<sup>1</sup>

**ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ В БОЕВОЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЕ БРОНЕТАНКОВОЙ ТЕХНИКИ**

*1 – ХУВС им. И. Кожедуба, 2 – ГП «ХКБМ им. А.А. Морозова»*

Одним из факторов, определяющих показатели огневой мощи бронетанковой техники (БТТ) является ее возможность поиска и обнаружения целей [1], которая обеспечивается на отечественной БТТ приборами наблюдения и прицеливания из состава комплекса управления огнем (КУО).

Кроме того, для поиска и обнаружения целей используются различные наземные средства разведки тактического и оперативно-тактического назначения, которые ведут поиск целей непосредственно вблизи линии соприкосновения войск или на некотором удалении от нее. На вооружении украинской армии находится бронированная разведовательно-дозорная машина БРДМ – 2, имеющая в своем составе оптические дневные и ночные приборы наблюдения [2]. Данные приборы наблюдения установлены непосредственно в корпусе БРДМ – 2. В то же время, в соответствии с аналитическим обзором [3], в странах НАТО используются поисковые системы с комплексированными средствами поиска, установленными на выдвинутой мачте. Это:

- радиолокационная станция, тепловизор, телекамеры дневного и ночного наблюдения, дальномер, установленные на изделии Snezka (Чехия), Coyote (Канада);
- тепловизор, телекамера дневного наблюдения, дальномер, установленные на изделиях Panhard VBL (Франция), Saab Dynamics (Швеция);

При этом данные об обнаруженных целях наземными средствами разведки передаются на уровень батальона, бригады.

Для улучшения показателя поиска и обнаружения целей, в БТТ постоянно совершенствуются приборы наблюдения и поиска цели: от дневно-ночного прибора, имеющего в своем составе электронно-оптические преобразователи до дневно-ночного прибора панорамного типа, в состав которого входит тепловизионная камера, что повышает вероятность обнаружения цели.

На рис. 1 показан граф переходов модели функционирования танкового вооружения [4].

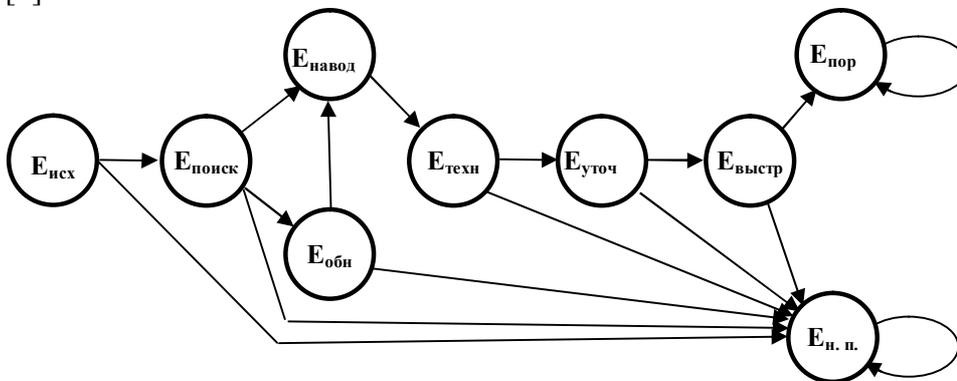


Рисунок 1 – Граф переходов модели функционирования танкового вооружения

На графе переходов данной модели показаны следующие состояния:

$E_{исх}$  – исходное состояние, объект БТТ находится на поле боя, все системы и механизмы комплекса вооружения включены;  $E_{поиск}$  – поиск целей всеми возможными средствами поиска (зависит от типа объекта БТТ и имеющихся технических средств);  $E_{обн}$  – цель обнаружена командиром, проидентифицирована и выдано целеуказание наводчику;  $E_{навод}$  – цель взята на обслуживание наводчиком;  $E_{тех}$  – техническая подготовка выстрела (измерение дальности, выбор боеприпаса, зарядание);  $E_{уточн.}$  – уточнение наводки прицельной марки на цель;  $E_{выстр}$  – осуществление процесса выстрела, боеприпас покинул ствол;  $E_{пор}$  – цель поражена;  $E_{н.п.}$  – цель не поражена.

Вероятность перехода из состояния  $E_{обн}$  в  $E_{навод}$  определяется вероятностью обнаружения цели.

$$W_{обн} = P_{обн}; \quad (1.1)$$

$$W_{н.п.} = 1 - P_{обн}. \quad (1.2)$$

При этом вероятность обнаружения цели

$$P_{обн} = f(\tau_{обн}), \quad (1.3)$$

где  $\tau_{обн}$  время обнаружения цели.

Если

$$\tau_{обн} \geq (\tau_{обн}^{пред}), \quad (1.4)$$

то цель не будет обнаружена и, соответственно, цель не будет поражена.

В работе [5] вероятность обнаружения  $P_{обн}$  для стационарного пуассоновского потока определена как

$$P_{обн.} = 1 - e^{-\eta\tau}, \quad (1.5)$$

где  $\eta$  среднее число обнаружений цели в единицу времени;  $\tau$  время поиска (обнаружения).

Для осуществления процесса выстрела из танковой пушки, для обеспечения производительности комплекса вооружения по механизму зарядания:

$$\tau_{обн} \leq \tau_{зар}, \quad (1.6)$$

где  $\tau_{зар}$  время зарядания выстрела по времени работы механизма зарядания.

В работе [6] показано, что вероятность обнаружения объекта определяется шестью основными факторами, характеризующими условия наблюдения:

1) угловым размером объекта  $\gamma$ ; 2) контрастом объекта с фоном  $K$ ; 3) яркостью фона  $L_{\Phi}$ ; 4) угловым размером поля обзора  $2\beta$ ; 5) временем обнаружения  $\tau_{обн}$ ; 6) угловой скоростью движения объекта  $\omega$ .

Формула, выражающая время обнаружения  $\tau_{обн}$  как функция параметров:  $\gamma$ ,  $K$ ,  $L_{\Phi}$ ,  $2\beta$ , представлена в виде:

$$\tau_{обн} = A(2\beta)^2 / K^2 \gamma^3 L_{\Phi}^{0.3}, \quad (1.7)$$

где  $A$  – постоянная не зависящая от параметров  $\gamma$ ,  $K$ ,  $L_\Phi$ ,  $2\beta$ .

Из выражения 1.7 видно, что если зафиксировать три параметра, то время поиска пропорционально четвертому в некоторой степени  $n$  (положительной или отрицательной). Коэффициент пропорциональности  $a$  зависит от того, какие именно значения остальных трех параметров зафиксированы. Тогда перепишем формулу 1.7 в виде:

$$\tau_{\text{обн}} = a_4 \cdot (2\beta)^2. \quad (1.8)$$

Из выражения 1.8 видно, что время обнаружения цели прямо пропорционально обзореваемой площади.

Обнаружение целей приборами, установленными на БТТ, весьма ограничено по дальности. Это оптические приборы с кратностью увеличения от  $1^x$  до  $12^x$ , с полями зрения от  $30^\circ$  до  $4^\circ$ .

С целью расширения поисковых возможностей на БМ «Оплот» установлен прицел, панорамного типа. Но физический принцип прицела не изменился – это оптика. При чем ее возможности существенно ограничиваются возможностями зрения оператора. Тепловизионная камера, установленная в панорамный прицел, расширяет поисковые возможности (как днем, так и ночью), но также возможности ограничены погодными условиями. Дальность видения в условиях тумана – до 100 м.

Одним из выходов из сложившейся ситуации является применение для разведки целей других физических принципов – радиолокация, акустика [7]. Но это требует внесения существенных изменений в КУО БТТ.

На современном этапе ускорить процедуру обнаружения цели можно путем внешнего указания ее расположения для последующего распознавания и идентификации (курсовой угол на цель), что позволит приблизить производительность комплекса вооружения к производительности механизма заряжания.

Такая задача может быть решена путем применения легких разведывательных летательных микроаппаратов (ЛМА) тактического звена, которыми могут оснащаться танки и танковые подразделения (взвод, рота). Это автономные беспилотные летательные аппараты (БПЛА), запускаемые с руки.

В настоящее время на вооружении Вооруженных Сил Украины стоят беспилотные авиационные комплексы (БПАК) «Стриж» с БПЛА Ту-141 и «Рейс» с БПЛА Ту-143, разработки и изготовления 80-х годов прошлого столетия [8]. Основные характеристики данных БПАК приведены в таблице 1.

Таблица 1

Характеристики	БПАК «Стриж» с БПЛА Ту-141	БПАК «Рейс» с БПЛА Ту-143
Масса, кг	5370	1600
Масса нагрузки, кг	100	130
Скорость полета км/ч	1110	950
Высота полета, м	50÷6000	50÷5000
Дальность полета, км	1000	до 180
Время полета, мин	54	30

Особенностью данных БПЛА является их работа по заранее заложенной программе без выхода в радиоэфир. При этом съемка земной поверхности происходит на

кино-, фотопленку. Обработка снятого материала происходит после возвращения БПЛА на место старта. Для обработки материала требуется соответствующее время, что может привести к «старению» информации.

В тоже время в странах НАТО применяются БПЛА такие как Wasp AE, Puma AE, Raven компании AeroVironment, Inc. США [9], MicroB израильской компании BlueBird Aero systems [10], Aladin Mini немецкой фирмы EMT Germany [11], LV580 французской фирмы Lehmann Aviation Ltd [12] имеющие характеристики, приведенные в таблице 2.

Таблица 2

Характеристика БПЛА	Компания производитель, страна /Наименование БПЛА					
	AeroVironment, Inc., США			BlueBird Aero systems, Израиль	EMT, Германия	Lehmann Aviation Ltd, Франция
	Wasp AE	Puma AE	Raven	MicroB	Aladin Mini	LV580
Полезная нагрузка	Стабилизированный модуль с ТВ и ТПВ камерами	Стабилизированный модуль с ТВ и ТПВ камерами	Стабилизированный модуль с ТВ и ТПВ камерами		модуль с ТВ и ТПВ камерами	
Дальность, км	5 (зона прямой видимости)	15	10	до 10	> 15	до 5
Продолжительность полета, мин.	50	210	60–90	до 60	> 60	до 40
Скорость, км/час	20	37–83	32–81	45–85	40–70	до 45
Рабочая высота полета, м	150 (макс)	152	30–152	до 1000	30–300	
Размах крыла, см	102	280	140	99	146	92
Длина, см	76	140	90	77	157	
Вес, кг	1,3	6,1	1,9	1,5	< 4,0	0,95
Метод запуска	с руки с ручной пусковой установки (с возможностью дистанционного запуска)	с руки с ручной пусковой установки (как вариант – с направляющей)	с руки с ручной пусковой установки	ручная пневматическая пусковая установка		с руки
Метод возврата	возможность посадки на воду	автономный или ручное управление	ручное управление	на парашюте	автономный, ручное управление	самостоятельно (без парашюта)

Данные БПЛА имеют размах крыла от 102 см до 280 см, вес от 1,3 кг до 6,1 кг, дальность полета до 15 км, высоту полета от 30 м до 1000 м и время полета до 1,5 часов. В своем составе БПЛА имеют GPS навигацию, телевизионные и инфракрасные ка-

меры со стабилизированным полем зрения, приемопередающую аппаратуру управления. Управление БПЛА происходит дистанционно с наземного пункта управления и контроля.

Современные события показали, что дистанционно управляемые БПЛА подвергаются подавлению средствами радиоэлектронной борьбы, а источники управляющего сигнала пеленгуются средствами радиотехнической разведки противника и, таким образом, осуществляется целеуказание с последующим огневым поражением.

Поэтому еще раз подчеркнем, что БПЛА разведывательного назначения должен быть автономным, автоматически управляемым, т.е. лететь по заданному маршруту с учетом погодных условий и передавать разведывательную информацию в реальном масштабе времени.

Передача информации о разведываемых целях в реальном масштабе времени позволит в конечном итоге, не только повысить производительность комплекса танкового вооружения, но и будет дополнительным источником информации для боевой информационно-управляющей системы тактического звена, что повысит командную управляемость подразделений и отдельных объектов БТТ.

### Литература

1. С.Л. Близгарева, В.В. Кошелев Влияние поисковых возможностей танка на его огневую мощь. Вопросы оборонной техники. Научно-технический сборник. Серия 6 Бронетанковая техника. Выпуск № 6 (118). Москва 1984.
2. Бронированная разведовательно-дозорная машина БРДМ–2. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Книга 1. Министерство обороны СССР. Главное бронетанковое управление. Москва. Военное издательство. 1987.
3. Лифанов Ю.С., Саблин В.Н., Салтан М.И. Направления развития зарубежных средств наблюдения за полем боя. – Москва.: Радиотехника, 2004 - 64 с, ил. (Серия «Научно – аналитические обзоры», редактор серии В.Ф. Кравченко).
4. Анипко О.Б., Борисюк М.Д., Бусяк Ю.М. Концептуальное проектирование объектов бронетанковой техники. Харьков. НТУ «ХПИ». 2008. 196 с.
5. Абчук В.А., Суздаль В.Г. Поиск объектов. Москва. Советское радио. 1977. 333 с.
6. Травникова Н.П. Эффективность визуального поиска. Москва. Машиностроение, 1985, 128 с., ил.
7. Бирюков И.Ю., Сиренко С.Н. Интеграция дополнительной оптико-акустической разведки в систему управления огнем танка. Інтегровані технології та енергозбереження. Харків. НТУ «ХПИ». №1. 2015.
8. Журнал DEFENSE EXPRESS №12 (декабрь, 2014) Экспорт оружия и оборонный комплекс Украины.
9. Fact sheet [www.avinc.com/uas/small\\_uas](http://www.avinc.com/uas/small_uas).
10. [www.bluebird-uav.com/](http://www.bluebird-uav.com/).
11. [www.emt-penzberg.de/](http://www.emt-penzberg.de/).
12. [www.lehmannaviation.com/](http://www.lehmannaviation.com/).

### **Bibliography (transliterated)**

1. S.L. Blizhareva, V.V. Koshelev Vliyanie poiskovuh vozmozhnostey tanka na ego ognevuyu moshch. Voprosy oboronnoy tehniki. Nauchno-tehnicheskii sbornik. Seriya 6. Bronetankovaya tehnika. Vypusk №6 (118). Moskva. 1984.

2. Bronirovannaja razvedovatelno-dozornaja mashina BRDM–2. Tehnicheskoye opisaniye i instruktsiya po ekspluatatsii. Kniga 1. Ministerstvo oborony SSSR. Glavnoye bron-etankovoye upravleniye. Moskva. Voennoe izdatelstvo. 1987.
3. Lifanov Yu.S., Sablin V.N., Saltan M.I. Napravlenija pazvitija zarubezhnyh sredstv nablyudenija za polem boja. Moskva.: Padiotehnika, 2004 – 64. il. (Serija «Nauchno – analiticheskie obzory», redaktor serii V. F. Kravchenko).
4. Anipko O.B., Borisyuk M.D., Busjak Yu.M. Kontseptualnoe proektirovanie bron-etankovoj tehniky. Harkov, NTU «KhPI». – 2008. – 196.
5. Abchuk V.A., Suzdal V.G. Poisk obyektov. Moskva. Sovyetskoe radio. 1977. – 333.
6. Travnikova N.P. Effektivnost vizualnogo poiska. Moskva. Mashinostroyenie. 1985 – 128., il.
7. Biryukov I.Yu., Sirenko S.N. Integratsiya dopolnitelnoy optiko-akusticheskoy razvedki v sistemu upravleniya ognem tanka. Integrovani tehnologii ta energozberezheniya. Kharkiv. NTU «KhPI». №1. 2015.
8. Zhurnal DEFENSE EXPRESS №12 (dekabr, 2014) Eksport oruzhija i oboronnij kompleks Ukraini.
- 9 Fact sheet [www.avinc.com/uas/small\\_uas](http://www.avinc.com/uas/small_uas).
10. [www.bluebird-uav.com/](http://www.bluebird-uav.com/).
11. [www.emt-penzberg.de/](http://www.emt-penzberg.de/).
12. [www.lehmannaviation.com/](http://www.lehmannaviation.com/).

УДК 623.4.021: 623.438.3.011

Аніпко О.Б., Сіренко С.М., Ковтонюк І.Б.

### **ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ У БОЙОВІЙ ІНФОРМАЦІЙНО-КУРУЮЧІЙ СИСТЕМІ БРОНЕТАНКОВОЇ ТЕХНІКИ**

Розглянуто застосування безпілотних літальних апаратів для пошуку та виявлення цілей, що дасть можливість підвищити ефективність комплексу управління вогнем бронетанкової техніки.

Anipko O., Sirenko S., Kovtonyuk I.

### **APPLICATION OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN BATTLE MANAGEMENT SYSTEM OF ARMORED EQUIPMENT**

Use of unmanned aerial vehicles for search and detection of targets has been studied, which shall enable to enhance efficiency of armored equipment fire control system.

УДК 622.691.4

Шейна З.В., Голубенко В.П., Мусиенко О.В.

### **РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ЗАВЕРШАЮЩЕЙ СТАДИИ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Характерными особенностями разработки месторождений на завершающем этапе, с точки зрения перспективы извлечения углеводородов, является снижение рабочего давления, низкий дебит скважин и их неудовлетворительное техническое состояние. Срок эксплуатации таких скважин составляет от 40 лет и более.

Очевидно, что при проектировании разработки месторождений на завершающем этапе, особое внимание следует уделить технологическим решениям, позволяющим стабилизировать темпы добычи газа и повышать газоконденсатотдачу на эксплуатационных объектах.

Основными технологическими решениями являются [1]:

- снижение рабочего давления на месторождениях с целью увеличения темпов отбора газа;
- переводение скважин на выше или нижезалегающие эксплуатационные горизонты;
- бурение новых эксплуатационных скважин;
- обновление ликвидированных скважин;
- проектирование бурения других (боковых) стволов низкодебитных скважин и скважин недействующего фонда;
- отделение пробковых горизонтов;
- обратная закачка инертных газов, попутного природного газа и др.

Наиболее экономным технологическим решением, содействующим увеличению добычи газа на месторождениях с определенной степенью истощения, является понижение рабочего давления.

Достигают снижения давления на определенную величину [2]:

- внедрением методов по очистке газопроводов от накопившихся отложений;
- уменьшением местных сопротивлений путем замены или реконструкции запорной арматуры;
- поиском и привлечением в систему новых низконапорных потребителей природного газа месторождений с низким рабочим давлением;
- вводом в эксплуатацию компрессорного оборудования на базе УКПГ, ГС или ДКС месторождения;
- путем проведения работ по разъединению шлейфов скважин, работающих по линейной схеме сбора.

Рабочее давление скважин – основной влияющий фактор на величину дебита на месторождениях на завершающей стадии эксплуатации. Его величину определяют значения конечного давления и потерь при транспортировке газа.

Снижение конечного давления на пункте передачи газа приводит к снижению рабочего давления скважин, а увеличение перепада между пластовым давлением и давлением на устье скважин способствует увеличению объемов добычи газа.

Определение рабочего давления скважин месторождения проводят по годам эксплуатации в зависимости от тенденции изменения давления на входе в центральный газосборный пункт месторождения и выбранных компрессорных агрегатов.

Алгоритм расчета должен включать в себя следующие этапы, описанные ниже.

Задаются начальными условиями расчета и его точностью:

– давлением на входе в центральный газосборный пункт  $P_{ex}$ ;

– проектным объемом добычи газа из месторождения  $Q_{np}$ ;

– точностью расчета  $\varepsilon = (Q_{np} - Q_{факт}) / Q_{np} \cdot 100$ ,

где  $Q_{факт}$  – фактический суммарный дебит скважин, тыс.м<sup>3</sup>/сутки.

Величина рабочего давления на входе в центральный газосборный пункт и общие потери в процессе сбора продукции влияют на рабочее давление на устье скважин месторождений в каждый из годов дальнейшей эксплуатации месторождения:

$$p = P_{ex} + \sum \Delta P^{cp}_{м.з.} + \Delta P^{cp}_{обв} + \Delta P^{cp}_{шл}, \quad (1)$$

где  $P_{ex}$  – входное давление на центральном газосборном пункте (при эксплуатации с ДКС – на входе в ДКС) в каждый из последующих годов эксплуатации, кгс/см<sup>2</sup>;  $\sum \Delta P^{cp}_{м.з.}$  – суммарные усредненные потери давления в системе межпромысловых газопроводов, кгс/см<sup>2</sup>;  $\Delta P^{cp}_{обв}$  – суммарные усредненные потери давления в обвязке установок подготовки газа;  $\Delta P^{cp}_{шл}$  – суммарные усредненные потери в шлейфах скважин.

Потери давления в межпромысловом газопроводе определяют как разницу между давлениями на начальном пункте и центральном газосборном пункте:

$$\Delta P_{м.з.} = P_n - P_{ex}, \quad (2)$$

где  $P_n$  – давление в начальном пункте, которое рассчитывают, исходя из основного уравнения газопроводов:

$$P_n = \sqrt{P_{ex}^2 + \frac{9,41 \cdot 10^{12} \cdot Q_{np}^2 \cdot \lambda_{факт} \cdot \Delta \cdot T \cdot z \cdot L}{d^5}}, \quad (3)$$

где  $\lambda_{факт}$  – фактический коэффициент гидравлического сопротивления, определяемый экспериментально для каждого отдельного участка межпромыслового газопровода по алгоритму гидравлического расчета газопроводов;  $Q_{np}$  – заданная фактическая продуктивность участка газопровода, равная проектному объему добычи газа из месторождения, млн.м<sup>3</sup>/сутки;  $\Delta$  – относительная плотность газа по воздуху;  $T_{cp}$  – средняя температура газа, К;  $L$  – длина рассчитываемого участка газопровода, км;  $z_{cp}$  – средний коэффициент сжимаемости газа;  $d$  – внутренний диаметр системы межпромысловых газопроводов, мм;  $P_{ex}$  – конечное давление на входе в центральный газосборный пункт, кгс/см<sup>2</sup>.

Суммарные усредненные потери давления в обвязке установок подготовки газа определяют, исходя из количества объектов, на которых проводится сбор и подготовка газа (УКПГ, УППГ, ДКС (ГС)):

$$\Delta P^{cp}_{обв} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta P_{обв}}{n}, \quad (4)$$

где  $n$  – количество установок подготовки газа по пути его транспортирования от устья скважины до центрального газосборного пункта.

Величина потерь давления в обвязке установок подготовки газа определяется в процессе экспериментальных исследований путем замера давления в контрольных точках объекта: входная линия, вход и выход сепарационного оборудования, замерные диафрагмы, охранные краны.

Так, исходя из практики эксплуатации объектов сбора и подготовки газа самого старого газодобывающего региона Украины – западного, для инженерных расчетов средние допустимые потери давления можно принять по таблице 1.

Таблица 1 – Средние допустимые потери давления

Наименование объекта	Величина потерь давления, кгс/см <sup>2</sup>
Входной узел и узел сепарации газа на ДКС или центральном газосборном пункте	0,175
Сепараторы первой ступени УКПГ	0,16
Сепараторы второй ступени УКПГ	0,1
Газопровод-подключение	0,075
Потери в установках предварительной подготовки газа	0,2
Регулирующие штуцера, блок входных ниток	0,4

Потери давления в шлейфах скважин определяют как разницу между фактическим давлением на устье скважины и давлением на входе в установку подготовки газа:

$$\Delta P_{\text{шл}} = P_{\text{факт}} - P_{\text{УКПГ}}^{\text{ex}} \quad (5)$$

Для каждой конкретной скважины месторождения данные о фактических давлениях на устье скважины и на входе в установку подготовки газа получают путем:

- измерения в полевых условиях;
- выбора из рапорта о режиме работы скважин месторождения.

Усреднение параметра проводят по количеству эксплуатационных скважин.

Величину фактического суммарного дебита скважин месторождения  $Q_{\text{факт}}$  (тыс. м<sup>3</sup>/сутки) определяют исходя из определенного рабочего давления на устье скважины месторождения по формуле Адамова [3]:

$$Q_{\text{факт}} = \sqrt{\frac{P_6^2 - p^2 \cdot e^{2s}}{\theta}} \quad (6)$$

где  $p$  – абсолютное давление на устье скважины, МПа;  $P_6$  – абсолютное давление на забое скважины, МПа;

$$S = 0,03415 \cdot \frac{\Delta \cdot l}{z \cdot T_{\text{cp}}} \quad (7)$$

где  $\Delta$  – относительная плотность газа;  $z$  – коэффициент сжатия газа в пластовых условиях;  $T_{cp}$  – абсолютная температура газа в пластовых условиях, К;  $l$  – глубина спуска насосно-компрессорных труб, м;

$$\theta = 0,0133 \cdot \lambda \cdot \frac{T_{cp}^2 \cdot z^2}{d_{екв}^5} (e^{2s} - 1), \quad (8)$$

где  $\lambda$  – коэффициент гидравлического сопротивления скважины;  $d_{екв}$  – внутренний диаметр НКТ скважин, см;

$$d_{екв}^{2,6} = \sum_{i=1}^m d_i^{2,6}, \quad (9)$$

где  $m$  – количество эксплуатационных скважин.

Давление на забое остановленной скважины можно найти по формуле барометрического нивелирования Лапласа-Бабине:

$$P_{нл} = P_{ст} \cdot e^{2s}, \quad (10)$$

где  $P_{нл}$  – абсолютное пластовое давление, МПа;  $P_{ст}$  – давление на устье остановленной скважины после его стабилизации (статическое давление), МПа.

В условиях постоянной депрессии на пласт:

$$P_г = P_{нл} - \Delta P, \quad (11)$$

где  $\Delta P$  – депрессия на пласт, МПа.

При наличии значений коэффициентов фильтрационных сопротивлений в какой-то момент времени  $A(t)$  и  $B(t)$  используют уравнение прилива газа к средней скважине.

$$P_{нл}^2 - P_г^2 = A(t)Q_{факт} + B(t)Q_{факт}^2. \quad (12)$$

При выполнении условия точности расчет считают законченным.

В случае невыполнения равенства проводят перерасчет расчетного давления на устье скважин, принимая в качестве проектного объема добычи величину фактического дебита скважин месторождения  $Q_{факт}$ .

Расчет носит оценочный характер и дает возможность оценить дополнительный объем прилива газа к скважине при внедрении тех или других мероприятий по снижению рабочих давлений скважин.

Для примера оценена эффективность внедрения комплекса мероприятий для Бильче-Волицкого газового месторождения во Львовской области (таблица 2), используя вышепредставленный алгоритм.

Расчет носит оценочный характер и дает возможность оценить дополнительный объем прилива газа к скважине при внедрении тех или иных мероприятий по снижению рабочих давлений скважин, но ярко показывает эффективность внедрения тех или иных

мероприятий. На его основании выбирают экономически и технологически обоснованные пути увеличения отдачи углеводородов из пласта.

Таблица 2 – Результаты моделирования реакции месторождения на внедрение комплекса мероприятий

Мероприятие	Значение снижения рабочего давления, $\Delta P_{\text{раб}}$ , кгс/см <sup>2</sup>	Значение рабочего давления до и после внедрения мероприятия, $P_{\text{раб}}$ , кгс/см <sup>2</sup>	Прирост дополнительной добычи газа, $\Delta Q$ , млн. м <sup>3</sup> /год	Капиталовложение, тыс. грн	Эффективность мероприятия при реализации газа по цене 6600 грн за 1000 куб.м., тыс. грн.
Очистка газопроводов системы сбора газа	1,0	9,84/8,84	1,74	80,0 – оборудование камерами запуска и приема очистных поршней основного газосборного коллектора	11404
Устранение местных сопротивлений	0,6	9,84/9,24	0,8	20,0 – замена диафрагм, запорной арматуры	5260
Направление газа в низконапорную сеть	0,5	3,5/3,0 – для низконапорных скважин	0,6	32,0 – оборудование резервной линии из низконапорных скважин в обход ДКС	3928
Реконструкция ДКС	1,5	9,84/8,34	2,25	12000,0 – установка нового компрессора и его обвязка	2850
Разъединение шлейфов скважин	2,84	9,84/7,0	4,38	35000,0 – сооружение шлейфов общей протяженностью 77,5 км	6092 (окупаемость ожидается на второй год внедрения)

Выводы: представлен алгоритм расчета показателей разработки месторождений на завершающей стадии эксплуатации в условиях внедрения мероприятий, связанных с оптимизацией работы газосборной и газотранспортной системы, а также результаты реализации его положений для одного из старых месторождений Львовской области.

#### Литература

1. Галко Т.М., Аксьонов В.В. Особливості проектування розробки газоконденсатних родовищ на завершальній стадії промислової експлуатації. –

Науково-виробничий журнал: «Нафтова і газова промисловість» Київ «НАК «Нафтогаз України» – №2, 2009 – С. 26–28.

2. Братах М.І., Шимановський Р.В. Проблемні питання збору, транспортування і розподілу газу власного видобутку українських родовищ. – Проблеми і перспективи транспортування нафти і газу : Матеріали міжнародної науково-технічної конференції.– Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2012. – С. 53–55.

3. Бойко В.С., Кондрат Р.М., Яремійчук Р.С. Довідник з нафтогазової справи. – К.:Львів, 1996. –620 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Galko T.M., Aksonov V.V. Osoblivosti proektuvannya rozrobki gazokondensatnih rodovisch na zavershalny stadiyi promislovoyi ekspluatatsiyi. – Naukovo-virobnichiy zhurnal: «Naftova i gazova promislovist» Kiyiv «NAK «Naftogaz Ukrayini» – #2, 2009 – P. 26–28.

2. Bratah M.I., Shimanovskiy R.V. Problemnii pitannya zboru, transportuvannya i rozpodilu gazu vlasnogo vidobutku ukrayinskih rodovisch. – Problemi i perspektivi transportuvannya nafti i gazu : Materiali mIzhnarodnoyi naukovo-tehnichnoyi konferentsiyi.– Ivano-Frankivsk: IFNTUNG, 2012. – P. 53–55.

3. Boyko V.S., Kondrat R.M., Yaremiychuk R.S. Dovidnik z naftogazovoyi spravi. – K.:Lviv, 1996. –620 p.

УДК 622.691.4

Шеїна З.В., Голубенко В.П., Мусієнко О.В.

### **РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ РОЗРОБКИ РОДОВИЩА НА ЗАВЕРШАЛЬНІЙ СТАДІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ**

Представлений алгоритм розрахунку показників розробки родовища на завершальній стадії експлуатації в умовах впровадження заходів, пов'язаних із оптимізацією роботи газозбірної та газотранспортної системи.

Sheina Z.V., Golubenko V.P., Musienko O.V.

### **METHOD OF PRODUCTION PARAMETERS ESTIMATION FOR THE GAS FIELD AT THE FINAL STAGE OF DEVELOPMENT**

The method of estimation is presented based on the formula Adamova and taking into the account the effluence of gathering and processing systems parameters. The article also shows the results of calculations for the one of the oldest field in Western Ukraine region.

**ТЕРМІЧНЕ РОЗКЛАДАННЯ ПРЕКУРСОРІВ В ТЕХНОЛОГІЇ СКЛАДНИХ КАТАЛІЗАТОРІВ ОКИСНЕННЯ АМОНІАКУ ДО N<sub>2</sub>O**

**Постановка и актуальність задачі.** Розробка процесу газофазного каталітичного селективного окиснення вуглеводнів нітроген (I) оксидом поставило нагальну задачу розробки технології N<sub>2</sub>O з одиничною потужністю на порядок більшою, порівняно з установками одиничної потужності в декілька тисяч тон на рік, що базуються на термічному розкладанні нітрит-нітратних солей. Подальше збільшення потужності таких установок практично неможливо внаслідок високої вибухонебезпечності процесу, тому найбільш перспективним напрямком є дослідження і впровадження каталітичного низькотемпературного окиснення амоніаку до N<sub>2</sub>O. На підставі вивчення патентної та науково-технічної літератури зроблено висновок про доцільність та перспективність застосування принципово нового підходу до проведення процесу отримання N<sub>2</sub>O – застосування каталітичного реактору із висхідним потоком каталізатору. Це зумовлює необхідність розробки високоселективних каталізаторів підвищеної механічної міцності та термічної стійкості, які мають високу питому поверхню та певну порувату структуру, тобто наноструктурованих мікро-мезопоруватих гетерогенних каталізаторів нового покоління, які суміщають високу каталітичну активність та транспортні характеристики мезопоруватих матеріалів.

Для отримання таких систем найбільш перспективним є золь-гель метод, який дозволяє цілеспрямовано контролювати розмір часток, питому поверхню та порувату структуру матеріалів на різних стадіях синтезу. Шляхом зміни різних параметрів синтезу: температури, концентрації, додавання стабілізаторів і структуроутворюючих агентів, введення низькомолекулярних лігандів у вихідний розчин можливо управляти швидкістю утворення золів та драглів і тому отримувати матеріали із заданими властивостями [1–3].

Простота керування золь-гель синтезом обумовлює його наступні переваги: можливість досягти високої чистоти отриманих матеріалів, змінювати фізичні характеристики, такі як розподіл розмірів пор і об'єм пор, варіювати композиційну однорідність на молекулярному рівні; здатність синтезувати зразки за низьких температур; можливість ввести декілька компонентів в одну стадію. Золь-гель синтез включає в себе утворення золю з наступним переходом його в гель. Гель формується в результаті конденсації часток золю.

Для визначення параметрів технології каталізаторів були проведені термогравіметричні дослідження суміші кристалогідратів нітратних солей. Термогравіметричний та диференціально-термічний аналіз застосовувались для визначення механізмів осадження та кристалізації оксидів, оцінки впливу часток золю на інтенсивність та температуру фазових перетворювань, для визначення температурних інтервалів втрат летких компонентів та визначення температури фазових переходів при синтезі оксидів, термічних ефектів в процесах розкладання коагулятів при отриманні нанопорошків оксидів, що входять до складної каталітичної композиції Mn-Bi-Ce-Cu-O.

Для вибору раціональних умов термообробки прекурсорів проводили диференціально-термічний аналіз із використанням прибору термогравіметричного та диференціального термічного аналізу Q-1500D (F. Paulik, J. Paulik, L. Erdey) та синхронного

термоаналізатору. Фазовий аналіз порошків проводили методом рентгенофазового аналізу на приборі «Дрон-3» з  $\text{CuK}\alpha$ -випромінюванням та графітовим монохроматором. Ідентифікацію фаз, які входять до досліджуваних об'єктів, проводили у відповідності з табличними даними (база рентгенометричних даних ICDD PDF-2 Database [4]).

**Результати та обговорення.** Власні дослідження та літературні дані свідчать, що високу активність і селективність проявляють складні оксидні каталізатори на основі  $\text{MnO}_2$ , серед яких особливе місце посідає  $\text{Mn-Bi-O}$  композиція, селективність якої по  $\text{N}_2\text{O}$  суттєво вище за селективності  $\text{MnO}_2$ . Крім того, додавання  $\text{CeO}_2$  та  $\text{CuO}$  як промотуючих добавок дозволяє значно підвищити селективність і покращити структурно-механічні властивості каталізатору [5–6]. Купрум оксид є один із найбільш активних оксидних каталізаторів окислення. Унікальність оксиду  $\text{CeO}_2$  в тому, що він як текстурний промотор підвищує термічну стабільність каталізатору, забезпечує стабільну роботу каталізатору під час коливань складу аміачно-повітряної суміші при можливій зміні вмісту кисню в суміші, накопичуючи Оксиген та звільнюючи його з кристалічної ґратки завдяки здатності швидко змінювати ступінь окиснення від +4 до +3 та зворотно. Висока температура плавлення, термостійкість та висока реакційна здатність в твердофазних реакціях, доступність роблять  $\text{CeO}_2$  ефективним текстурним промотором. Інтерес до оксидів  $\text{CeO}_2$  та  $\text{CuO}$  зумовлений можливістю утворення твердих розчинів, які характеризуються більш високою рухливістю оксигену кристалічної ґратки та високою кисневою ємністю, підвищеною механічною міцністю та термічною стійкістю. Фазовий склад, рухливість іонів оксигену залежать від дисперсності оксидів та дефектності їх структури, які в свою чергу визначаються умовами синтезу.

Для отримання оксидів використовували модифікований цитратний золь-гель метод. Як прекурсори для синтезу змішаних церійвмісних метал-оксидних каталізаторів складу  $\text{Mn-Bi-Cu-Ce-O}$  для реакції окиснення амоніаку до  $\text{N}_2\text{O}$  використовували нітрати металів  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  як найбільш доступні реактиви. Для стабілізації золів використовували водний розчин лимонної кислоти  $\text{H}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$  та ПЕГ 20 000  $\text{HO}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{O})_n\text{H}$  як стабілізатори та структуроутворюючі компоненти, оскільки вони нетоксичні, навіть можуть входити до складу харчових продуктів, а також фармацевтичних препаратів.

Поліетиленгліколь (ПЕГ) додавали у співвідношенні 1:4. Нітрати  $\text{Mn}$ ,  $\text{Bi}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Ce}$  змішували з лимонною кислотою в об'ємному співвідношенні 1:1. До одержаних розчинів краплями добавляли розчин  $\text{NH}_4\text{OH}$  при постійному перемішуванні до  $\text{pH} \approx 2\text{--}4$ . Отриманий золь нагрівали на магнітний мішалці, не доводячи до кипіння протягом 3–5 годин. При випаровуванні води він перетворювався у в'язкий гель, який запалювався та згорав. Отриманий в результаті горіння пухнастий порошок пропікали з метою видалення залишків органічних домішок.

Наприклад, для одержання Бісмут (III) оксиду розчиняли в 50 мл нітратної кислоти 4 г  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ , змішували з лимонною кислотою в мольному співвідношенні 1:1 та нагрівали на водяній бані за температури  $100^\circ\text{C}$ . При випарюванні води утворювався жовтуватий гель. Потім гель розкладався при нагріванні від  $150^\circ\text{C}$  до  $500^\circ\text{C}$  із швидкістю нагріву близько  $10^\circ$  за хвилину протягом 4 годин. Під час пропікання утворювалась чорна пухка піноподібна маса, яка займала великий об'єм в муфельній печі. При подальшому підвищенні температури чорна маса перетворювалась в масу білого кольору в результаті видалення карбону. Зразки, що пропечені за температури  $450^\circ\text{C}$  протягом 20 хвилин, містили менш за 1 % карбону. В зразках, що пропечені за більш високої температури ( $500\text{--}510^\circ\text{C}$ ), карбон не був виявлений зовсім. Результати терміч-

ного аналізу Бісмут (III) нітрату як прекурсору складної каталітичної композиції показано на рис. 1(а).

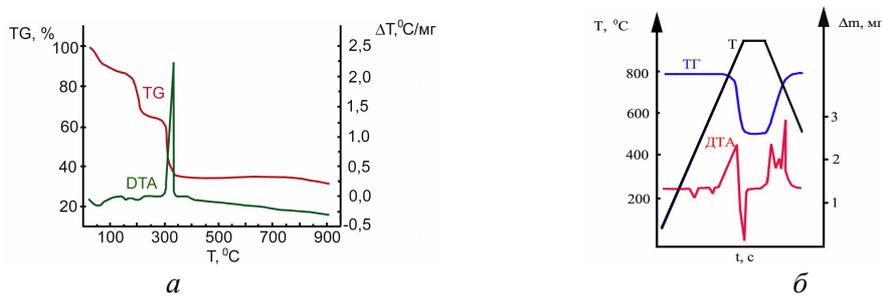


Рисунок 1 – Результати термічного аналізу сполук бісмуту: *a* – дериватограма прекурсору  $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ; *б* – дериватограма  $\text{Bi}_2\text{CuO}_4$

Втрата ваги за температур 20–332 °С відбувається внаслідок трансформації прекурсору в Бісмут (III) оксид. Аналіз даних термічного аналізу свідчить, що на дериватограмах можливо виділити ряд ефектів, що пов’язані з різними процесами, що відбуваються при нагріванні коагулятів. Крива диференціально-термічного аналізу має один ендотермічний пік за температури 332 °С (випаровування води та розкладання лимонної кислоти) та два екзотермічного піка за температури 55 °С і 155 °С (розкладання Бісмут (III) нітрату). Крива ваги показує відсутність втрати ваги за температур 350–800 °С, тобто пропікання прекурсору треба проводити за температур 300–350 °С.

Результати рентенофазового аналізу (РФА) для зразків, що пропечені за температури 500 °С, показали наявність кристалічної структури та фази  $\beta\text{-Bi}_2\text{O}_3$  (JCPDS № 27-50) [4]. Параметри кристалічної ґратки  $a = 7,736 \text{ \AA}$  та  $c = 5,614 \text{ \AA}$ , питома поверхня висушеного порошку  $90 \text{ м}^2/\text{г}$ , середній розмір часток приблизно 50 нм.

Термічні дослідження системи  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-CuO}$ , що були проведені нами за стандартною методикою [7] і корелюють з літературними даними [8], показали, що діаграма стану системи  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-CuO}$  відноситься до типу діаграм з однією сполукою складу  $\text{Bi}_2\text{CuO}_4$ , що плавиться конгруентно. Тому діаграму можна представити як дві квазібінарні системи:  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-Bi}_2\text{CuO}_4$  ( $0 < X_{\text{CuO}} < 0,5$ ), що відноситься до розряду простих діаграм с евтектикою, що плавиться за температури 770°С, і  $\text{Bi}_2\text{CuO}_4\text{-CuO}$  ( $0,5 < X_{\text{CuO}} < 0$ ). Бісмут купрат кристалізується в тетрагональній сингонії з параметрами  $a = 0,8484 \text{ нм}$ ,  $c = 0,5814 \text{ нм}$  [8].

Високотемпературні рентгенографічні дослідження показали, що  $\text{Bi}_2\text{CuO}_4$  зберігає тетрагональну ґратку до плавлення. Однак на кривих термогравиметричного аналізу (ТГ) при 730 °С спостерігається втрата маси, що відбивається на зміні параметрів кристалічної ґратки і супроводжується екзотермічним ефектом на кривій ДТА (рис. 1(б)).

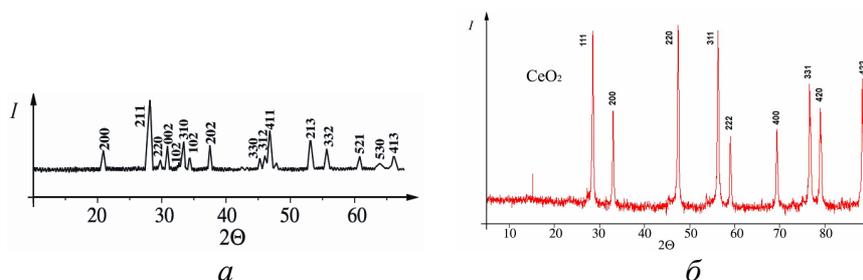


Рисунок 2 – Результати рентгенофазового аналізу: *a* – порошок бінарного композиту  $\text{Bi}_2\text{O}_3\text{-CuO}$ ; *б* – порошок  $\text{CeO}_2$

Результати РФА (рис. 2(a)) показали наявність рефлексів, що характерні для тетрагонального  $\text{Bi}_2\text{CuO}_4$  (JCPDS File, No. 42–0334). При охолодженні маса зворотно відновлюється, з невеликим гістерезисом, а РФА виявляє додаткові рефлекси, які характерні для оксидів  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  та  $\text{CuO}$ .

На кривих диференціально-термічного аналізу (ДТА) спостерігаються екзотермічні ефекти, що відповідають зворотному фазовому перетворенню  $\delta\text{-Bi}_2\text{O}_3 \rightarrow \gamma\text{-Bi}_2\text{O}_3 \rightarrow \beta\text{-Bi}_2\text{O}_3 \rightarrow \alpha\text{-Bi}_2\text{O}_3$ . Встановлено, що за температури  $730^\circ\text{C}$   $\text{Bi}_2\text{CuO}_4$  дисоціює за реакцією  $2\text{Bi}_2\text{CuO}_4 \rightarrow 2\text{Bi}_2\text{O}_3 + \text{Cu}_2\text{O} + 0,5\text{O}_2 \uparrow$  із виділенням кисню.

На рисунку 3 (а) приведені термограми розкладання  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ . Ендотермічний ефект розкладання гідрату Купрум (II) нітрату при  $130\text{--}200^\circ\text{C}$  свідчить про термічний гідроліз гідрату нітрату з утворенням основної солі складу  $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{NO}_3$ . Кінцевими продуктами розкладання основної солі  $\text{Cu}_2(\text{OH})_3\text{NO}_3$  (останній ендотермічний ефект) є  $\text{CuO}$ ,  $\text{NO}_2$  і  $\text{H}_2\text{O}$ .

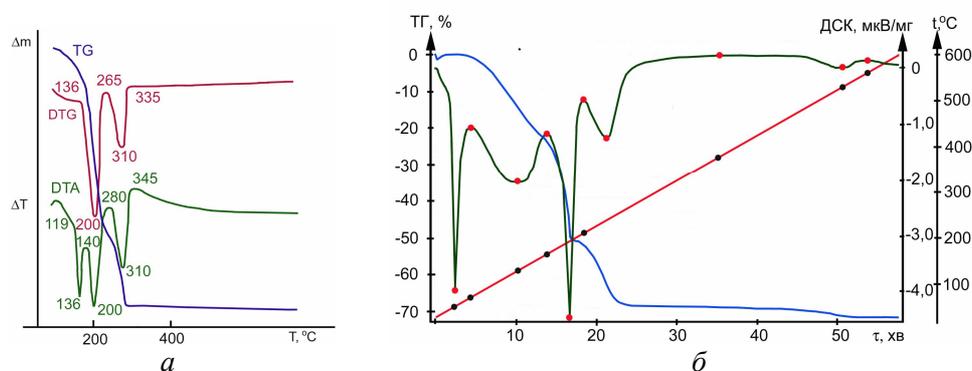


Рисунок 3 – Термограми розкладання:

а – прекурсору  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ; б – прекурсору  $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

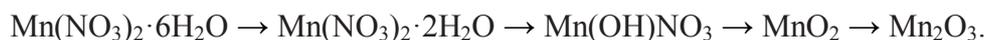
На рисунку 3 (б) представлена дериватограма процесу розкладання гексагідрату Манган нітрату. При аналізі кривих встановлено, що процес термодеструкції сполуки, взятої для аналізу, проходить наступні стадії: плавлення кристалогідрату (перший пік ендоефекту, без зміни маси проби, появляється за температури  $40,6^\circ\text{C}$ ), відщеплення від кристалогідрату  $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  води (процес дегідратації перебігає за температури  $65\text{--}164^\circ\text{C}$ , із ендоефектом за температури  $127^\circ\text{C}$ ), утворення сполуки  $\text{Mn}(\text{OH})\text{NO}_3$  (в температурному діапазоні  $164\text{--}210^\circ\text{C}$ , із піком ендоефекту за температури  $192^\circ\text{C}$ ), утворення  $\text{MnO}_2$  (в температурному діапазоні  $210\text{--}376^\circ\text{C}$ , с ендоефектом за температури  $250^\circ\text{C}$ ) та розкладання Манган двооксиду до  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  (в температурному діапазоні  $490\text{--}560^\circ\text{C}$  із максимумом ендоефекту за температури  $529^\circ\text{C}$ ).

По зломам кривої термогравіметрії (ТГ) можна зробити висновок про зміну маси взятої для аналізу проби. Так за температури  $145^\circ\text{C}$  втрачається  $20,5\%$  маси. Другий злом відповідає температурі  $192^\circ\text{C}$ . При цьому маса проби знижується на  $51\%$ , що відповідає утворенню напівпродукту  $\text{Mn}(\text{OH})\text{NO}_3$ . Третій злом кривої ТГ відповідає температурі  $273^\circ\text{C}$ . В цій точці втрачається  $69\%$  маси, що відповідає утворенню фази Манган (IV) оксиду  $\text{MnO}_2$ . Завершення процесу утворення  $\text{MnO}_2$  настає за температури  $376^\circ\text{C}$ . Втрати маси в цій точці складає  $69,7\%$ , що корелює з кількістю газоподібних продуктів, що виділяються згідно реакції термічного розкладання гексагідрату Манган нітрату:

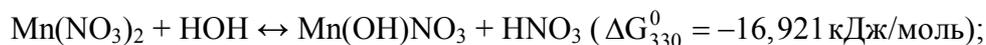


Аналіз дериватограми свідчить, що за температури 376°C починається процес розкладання  $\text{MnO}_2$  до  $\text{Mn}_2\text{O}_3$  згідно рівнянню реакції  $2\text{MnO}_2 = \text{Mn}_2\text{O}_3 + 0,5\text{O}_2$ .

Отже на основі аналізу дериватограми, процес термічного розкладання гексагідрату Манган нітрату в температурному діапазоні від 25 до 600 °C можна представити наступною послідовністю:



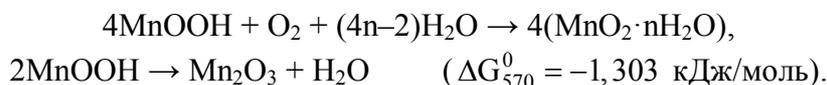
Процес термолізу прекурсору  $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$  – це поетапний перебіг реакцій: гідроліз манган нітрату, а потім ступінчастого окислення іона  $\text{Mn}^{2+}$  по окисно-відновлювальним реакціям з паралельною дегідратацією прекурсору. Хімізм процесу можна представити наступними рівняннями: гідроліз розчинів нітрату  $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$



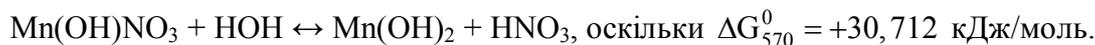
окисно-відновлювальні реакції при нагріванні:



При неповному розкладанні Манган оксогідроксиду або в умовах недостачі кисню можливі побічні процеси:



Гідроліз Манган оксогідроксиду по другому ступені термодинамічно неможливий:



На стадії дегідратації при нагріванні кристалогідрату  $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2$ , на фоні прискореного процесу гідролізу Манган нітрату утворюється гідроксонітрат, який перетворюється далі в Манган оксогідроксид за окисно-відновлювальною реакцією. Тобто, термодинамічні розрахунки енергії Гіббса  $\Delta G_T^0$  для реакцій, які перебігають в системі, підтвердили послідовність перетворювань за окисно-відновлювальною реакцією за наступною іонною схемою  $\text{Mn}^{2+} \rightarrow \text{Mn}^{3+} \rightarrow \text{Mn}^{4+}$ .

Результати рентгенофазового аналізу продуктів, які одержано в результаті термічного розкладання гексагідрату Манган нітрату за температури 290 °C, показали, що положення та інтенсивність піків зразку відповідає фазі  $\text{MnO}_2$ .

Для визначення температури розкладання  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$  проводили термічний аналіз  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$  як прекурсору складного каталізатору, результати якого наведені на рис. 4(а).

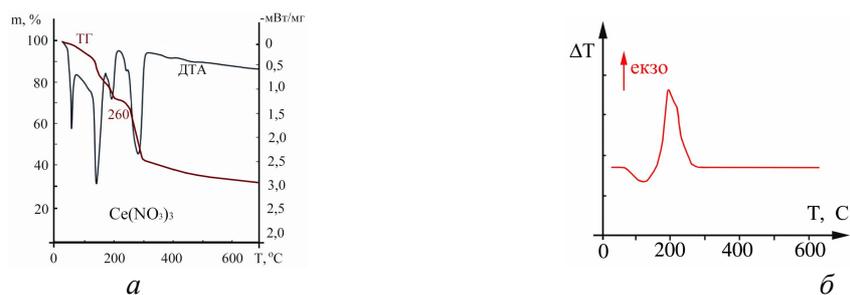


Рисунок 4 – Дериватограма прекурсорів: *a* –  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ ; *б* –  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 + \text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$

Три пика на кривій ДТА обумовлені втратою абсорбованої, фізично зв'язаної та кристалізаційної води. Розкладання  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$  починається за температури 260 °С. При пропінанні за температури 450 °С утворюється  $\text{CeO}_2$ . Термічне розкладання  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$  перебігає по реакції  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3(\text{T}) \rightarrow \text{CeO}_2(\text{T}) + \uparrow\text{NO}_x$ .

Фізико-хімічні процеси, перебігають при термолізі суміші  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 + \text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  як прекурсорі складної манган-церієвої оксидної каталітичної композиції Mn-Ce-O (видалення слабкозв'язаної води, розкладання безпосередньо хімічних сполук, кристалізація фаз, що утворились) завершаються в області температур до 400 °С (рис. 4(б)). При нагріванні до більш високих температур значні теплові ефекти відсутні. Таким чином, температура пропінання 500–510 °С відповідає повному завершенню перетворень, що мають місце при термообробці зразків. Порівняльний аналіз кривих ДТА прекурсорів  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$ ,  $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  та  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3 + \text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  дозволяє припустити утворення твердого розчину в складній каталітичній системі  $\text{MnO}_2\text{-CeO}_2$ .

На рентгенограмі  $\text{MnO}_2\text{-CeO}_2$  присутні рефлекси ( $2\theta = 28,4; 32,8; 47,4; 56,2$ ), що характерні для фази  $\text{CeO}_2$  (рис. 2(а)), стала кристалічної ґратки *a* складала 5,351 Å, що менше за параметр комірки церій (IV) оксиду ( $a = 5,408$  Å). Це зменшення обумовлено заміщенням катіонів  $\text{Ce}^{4+}$  з іонним радіусом 0,88 Å катіонами  $\text{Mn}^{4+}$  з меншим іонним радіусом – 0,52 Å, що узгоджується з правилом Вегарда та свідчить про утворення твердого розчину в системі  $\text{MnO}_2\text{-CeO}_2$  [9].

Результати дериватографічного та рентгенофазового аналізів дозволили визначити умови отримання складних каталізаторів необхідної якості та запропонувати наступну схему модифікованого золь-гель синтезу (рис. 5) для удосконалення технології складних каталітичних композицій для процесу низькотемпературного окиснення амоніаку до  $\text{N}_2\text{O}$ . Розроблений спосіб керованого золь-гель синтезу наноструктурованих Mn-Bi-Cu-Ce-O каталізаторів різного складу із використанням низькомолекулярних лігандів дозволяє отримати мезопоруватий за класифікацією IUPAC церійвмісний каталізатор з вузьким розподілом пор за розмірами і великою питомою поверхнею (табл. 1).

Таблиця 1 – Фізико-хімічні характеристики каталітичної композиції складу Mn-Bi-Cu-Ce-O

Питома поверхня $S_{\text{ВЕТ}}$ , $\text{м}^2/\text{г}$ , ( $p/p_0 = 0,07\text{--}0,3$ )	Загальний об'єм пор $V_{\text{пор}}$ , $\text{см}^3/\text{г}$ ( $p/p_0 = 0,99$ )	$d_{\text{пор}}$ , нм	Середній розмір кристалітів, нм	Параметр кристалічної ґратки, Å
114,5	0,18	2,8	6,9	5,3987

Дослідження активності та селективності розроблених каталізаторів показали, що для найбільш активного каталізатора ступінь перетворення по  $\text{NH}_3$  складає 99,4÷99,6 % за температур 330–340 °С, час контактування ~1,2 с. Визначені умови, за

яких на катализаторі Mn-Bi-Cu-Ce-O досягається максимальна селективність по цільовому продукту N<sub>2</sub>O (92,5±93,5 %) і мінімальна по NO (0,1±0,2 %) [6].

**Висновки.** Для вибору параметрів технології катализатора були проведені дослідження процесу термічного розкладання кристалогідратів нітратів Mn, Bi, Cu, Ce як прекурсорів складної каталітичної композиції окислення амоніаку до N<sub>2</sub>O. Результати дослідження процесів зменшення маси та їх теплові ефекти дозволили провести порівняльний аналіз та визначити найбільш ймовірні хімічні та фізичні перетворення речовин в процесі його нагрівання. Для визначення характеристик структури та їх зміни при кінцевій термообробці проведені дослідження впливу температури пропікання на процеси структуро- і фазоутворення в прекурсорах, що має велике значення для передбачення експлуатаційних характеристик отриманих матеріалів.

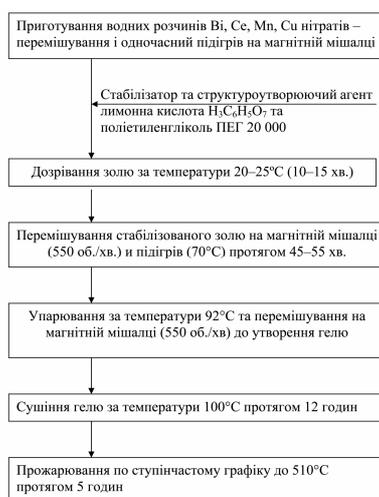


Рисунок 5 – Модифікована схема золь-гель синтезу змішаних церійвмісних метал-оксидних катализаторів окиснення амоніаку до N<sub>2</sub>O

### Література

1. Catalysis / Ed. by J.J. Spivey, Y-F. Han.– The Royal Society of Chemistry, 2014.– 287 p.
2. Ceramics Science and Technology, V. 2 – Materials and properties / Ed. by R. Riedel and I-W. Chen. – Hoboken : Wiley, 2010 – 862 p.
3. Ross J.R. Heterogeneous catalysis fundamentals and applications / J.R. Ross. – Elsevier, 2012. – 223 p.
4. ICDD PDF-2 Database, ASTM. Joint committee on powder diffraction standards. – Philadelphia, PA (USA), 1997.
5. Slavinskaya E.M. Studies of the mechanism of ammonia oxidation into nitrous oxide over Mn-Bi-O/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst / E. M. Slavinskaya, S.A. Veniaminov, P. Notté [et al.] // Journal of Catalysis. – 2004. – V. 222, № 1. – P. 129–142.
6. Масалітіна Н.Ю. Нітроген (I) оксид. Дослідження процесу одержання шляхом низькотемпературного окиснення аміаку / Н.Ю. Масалітіна, А.С. Савенков, О.М. Близнюк, О.М. Огурцов // Хімічна промисловість України.– 2014.– № 5(124).– С. 54–58.
7. Даниэльс Ф. Физическая химия / Ф. Даниэльс, Р. Ольберти. – М. : Мир, 1978. – 645 с.
8. Белоусов В.В. Особенности фазовых равновесий в системе Cu-Bi-O. / В.В. Бе-

лоусов, В.Н. Конев, А.К. Рослик // Сверхпроводимость: физика, химия, техника. – 1990. – т. 3, № 8. – С. 1895–1897.

9. Вест А. Химия твердого тела. Теория и приложения: в 2-х частях. Ч. 2 / А. Вест. – М. : Мир, 1988. – 558 с.

Bibliography (transliterated)

1. Catalysis. Ed. by J.J. Spivey, Y-F. Han. – The Royal Society of Chemistry, 2014. – 287 p.

2. Ceramics Science and Technology, V. 2 – Materials and properties. Ed. by R. Riedel and I-W. Chen. – Hoboken : Wiley, 2010 – 862 p.

3. Ross J.R. Heterogeneous catalysis fundamentals and applications. J.R. Ross. – Elsevier, 2012. – 223 p.

4. ICDD PDF-2 Database, ASTM. Joint committee on powder diffraction standards. – Philadelphia, PA (USA), 1997.

5. Slavinskaya E.M. Studies of the mechanism of ammonia oxidation into nitrous oxide over Mn-Bi-O/ $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> catalyst. E. M. Slavinskaya, S.A. Veniaminov, P. Notté [et al.]. Journal of Catalysis. – 2004. – V. 222, № 1. – P. 129–142.

6. Masalitina N.Yu. NitroGen (I) oksid. Doslidzhennya protsesu oderzhannya shlyahom nizkotemperaturnogo okisnennya ammiaku. N.Yu. Masalitina, A.S. Savenkov, O.M. Bliznyuk, O.M. Ogurtsov. Himichna promislovist Ukraini. – 2014. – # 5(124). – P. 54–58.

7. Daniels F. Fizicheskaya himiya, F. Daniels, R. Olberti. – М. : Mir, 1978. – 645 p.

8. Belousov V.V. Osobnosti fazovyih ravnesiy v sisteme Su-Bi-O. V.V. Belousov, V.N. Konev, A.K. Roslik. Sverhprovodimost: fizika, himiya, tehnika. – 1990. – т. 3, # 8. – P. 1895–1897.

9. Vest A. Himiya tverdogo tela. Teoriya i prilozheniya: v 2-h chastyah. Ch. 2. A. Vest. – М. : Mir, 1988. – 558 p.

УДК 54.44.677.042.62

Масалитина Н.Ю., Савенков А.С.

**ТЕРМИЧЕСКОЕ РАЗЛОЖЕНИЕ ПРЕКУРСОРОВ В ТЕХНОЛОГИИ СЛОЖНЫХ КАТАЛИЗАТОРОВ ОКИСЛЕНИЯ АММИАКА ДО N<sub>2</sub>O**

Результаты термического, термогравиметрического и рентгенофазового анализов позволили определить условия получения сложных высокоселективных оксидных катализаторов окисления аммиака до N<sub>2</sub>O, предложить схему модифицированного золь-гель синтеза для усовершенствования технологии сложных каталитических композиций для процесса низкотемпературного окисления аммиака до N<sub>2</sub>O.

Masalitina N.Yu., Savenkov A.S.

**THERMAL DECOMPOSITION OF PRECURSORS IN TECHNOLOGY OF MIXED CATALYSTS OF AMMONIA OXIDATION TO N<sub>2</sub>O**

The results of a thermal, thermogravimetric analysis and X-ray diffraction (XRD) makes it possible to determine the conditions for production of high selective mixed oxide catalysts of ammonia oxidation to N<sub>2</sub>O, and to propose the scheme of modified sol-gel synthesis for improvement of compound catalytic composition technology for low temperature ammonia oxidation to N<sub>2</sub>O.

Огурцов А.Н., Близнюк О.Н., Клещев Н.Ф.

**РАДИАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ МОДИФИКАЦИИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПОКРЫТИЙ. МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ФОТОДИССОЦИИ В МОЛЕКУЛЯРНЫХ ПЛЁНКАХ  $\text{NH}_3$  И  $\text{H}_2\text{O}$** 

**Постановка и актуальность задачи.** Химическая физика элементарных актов фотохимических и структурных преобразований материалов облучением в качестве одной из основных проблем рассматривает разнообразные способы селективного преформатирования системы межатомных связей в молекулах, составляющих различные материалы. Радиационные технологии, в которых энергия электронных возбуждений конвертируется в структурные нарушения кристаллической решётки, либо диссоциирует определённые внутримолекулярные связи, являются одновременно и одним из наиболее эффективных способов контролируемых изменений структуры материалов [1], и комплексным аналитическим методом, позволяющим осуществлять в реальном времени мониторинг состояния облучаемого образца [2], что в совокупности позволяет наметить пути решения задачи управляемой модификации материалов электронными возбуждениями, моделируя промышленные процессы на модельных системах [3]. Потенциальными преимуществами подобных безреагентных технологий модификации материалов облучением является возможность получения материалов с модифицированным комплексом свойств, причём речь может идти об управлении радиационной чувствительностью молекулярных материалов с целью не только радиационной модификации, но и радиационной стабилизации материалов.

Селективное возбуждение диссоциативных либо ридберговских состояний позволяет управлять процессами модификации образца как на ранних, дорадикальных, стадиях, так и на этапе возбуждения продукта фотодиссоциации. Селективность радиационно-химических процессов выражается в разрыве определённых химических связей в молекулах, локализации радиационных изменений на структурных и химических дефектах образца и неаддитивных эффектах при облучении сложных систем [3]. В большинстве методов радиационной модификации поверхности молекулярных кристаллов и функциональных плёнок используют методику локализации электронных возбуждений вблизи поверхности, что стимулирует разрыв, прежде всего, относительно слабых межмолекулярных связей, образуемых в большинстве случаев дисперсионными (ван-дер-ваальсовыми) взаимодействиями, и сопровождается десорбцией молекул с поверхности образца [4]. Исследование же процессов, приводящих к разрыву сильной внутримолекулярной связи, зачастую имеющей ковалентный характер, в значительной степени затруднено необходимостью локализовать необходимое количество энергии в объёме порядка элементарной ячейки на время, за которое происходит молекулярная диссоциация.

Для исследования процессов диссоциации ковалентной внутримолекулярной связи обычно используется метод "молекулярного скальпеля" [5] – селективного фотовозбуждения с помощью синхротронного излучения  $K$ -оболочек атомов, образующих молекулы. Кроме того, использование молекулярных плёнок, адсорбированных на металлических подложках, позволяет, вследствие большой плотности молекул и их однозначной ориентации, провести эффективные поляризационные исследования, что крайне затруднено при проведении аналогичных исследований в газовой фазе.

Разрыв межатомной связи вследствие селективного фотовозбуждения электрон-

ных  $K$ -оболочек является относительно новым перспективным методом управления процессом модификации функциональных покрытий, стимулированной электронными возбуждениями [6].  $K$ -оболочки, особенно в гетероядерных молекулах, исходно являются локализованными, позволяя селективно возбуждать определённый атом в составе молекулы.

Проведённые в последние годы исследования десорбции с поверхности различных веществ показали, что возбуждение  $K$ -оболочек эффективно стимулирует диссоциацию и десорбцию [7]. В большинстве случаев релаксация дырки в  $K$ -оболочке приводит к образованию дважды (или даже многократно) возбуждённых валентных состояний, которые хорошо локализованы и, если валентные дырки образовались в связывающих молекулярных орбиталях, являются сильно антисвязывающими. Антисвязывающий характер возбуждённого состояния ещё более усиливается, если его формирование сопровождается переносом электронов из металлической подложки в свободные состояния антисвязывающих орбиталей адсорбата. В данной работе на модельных системах  $\text{NH}_3/\text{Ru}(001)$  и  $\text{H}_2\text{O}/\text{Ru}(001)$  были экспериментально исследованы процессы молекулярной диссоциации простейших азот- и кислородсодержащих молекул, стимулированные фотовозбуждением в области  $N1s$  и  $O1s$  состояний.

**Эксперимент.** Экспериментальное измерение масс-спектров выхода десорбированных молекулярных фрагментов проводилось на ондуляторном канале BW3 накопительного кольца DORIS-III Гамбургской синхротронной лаборатории HASYLAB Международного синхротронного центра DESY в Германии. Канал был оборудован двумя сменными ондуляторами, перекрывающими диапазон энергий 15–2000 эВ, и монохроматором скользящего падения SX-300 фирмы Zeiss, обеспечивающими поток фотонов  $\sim 10^{12}$  фотонов/с и энергетическое разрешение  $\Delta E = 150$  мэВ для диапазона 500 эВ при токе электронов 100 мА в накопительном кольце.

Молекулярные плёнки выращивались из газовой фазы путём конденсации на охлаждённой металлической подложке гелиевого криостата. Перед выращиванием образцов монокристаллическая  $\text{Ru}(001)$  подложка очищалась в вакууме пучком ионов аргона, нагреванием до  $T = 1450$  К в атмосфере  $p = 10^{-4}$  Па кислорода и отжигом до  $T = 1570$  К. Чистота поверхности подложки контролировалась методами рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (XPS – X-ray Photoelectron Spectroscopy) и спектроскопии тонкой структуры вблизи края рентгеновского поглощения (NEXAFS – Near Edge X-ray Absorption Fine Structure). Для получения монослойных, двухслойных и многослойных функциональных плёнок молекулярных газов использовался микрокапиллярный дозатор, что позволяло с высокой точностью воспроизводить условия роста и многократно выращивать различные плёнки необходимой толщины в ходе одного эксперимента.

В хорошо изученных процессах фотофрагментации в газовой фазе или на поверхности диэлектриков, где отсутствуют (или чрезвычайно слабы) процессы нейтрализации образующихся заряженных фрагментов, доминируют ионные продукты реакции [2]. Однако в случае фотостимулированной диссоциации (ФСД) хемисорбированных или физадсорбированных плёнок на металлических подложках ситуация совершенно иная. В большинстве случаев, ионные фрагменты преобладают только для "экзотических" многоэлектронных финальных состояний с очень низкими сечениями возбуждения [8]. Для однодырочных и даже для двухдырочных состояний продукты десорбции – молекулы или фрагменты молекул – образуются в нейтральном состоянии. Поэтому для детектирования нейтральных частиц, десорбирующихся с поверхности мо-

лекулярных кристаллических пленок, был использован уникальный криогенный квадрупольный масс-спектрометр с ионизацией исследуемых продуктов десорбции электронной бомбардировкой [9]. Именно этим детектором, при использовании ондулятора синхротрона в качестве перестраиваемого источника монохроматических фотонов, регистрировались спектры фотостимулированной десорбции (ФСД-спектры) как нейтральных частиц, так и (при выключенном ионизаторе детектора) ионизированных молекулярных фрагментов. Одновременно с этим с помощью детектора быстрых электронов, на сетку которого подавался задерживающий потенциал 350 В, регистрировались спектры парциального выхода электронов (ПВ-спектры). При этом регистрировались только быстрые электроны, которые испускались образцами вследствие ионизации *K*-оболочек атомов, и не учитывались медленные электроны, которые испускались валентными оболочками молекул вследствие стимулированных в них релаксационных каскадов. Поэтому в диапазонах энергий фотовозбуждения *K*-оболочек атомов, стимулирующих десорбцию, ПВ-спектры электронов фактически представляли собой спектры фотопоглощения. Более детально экспериментальная установка и методы выращивания образцов из газовой фазы описаны в работе [9].

**Результаты и обсуждение.** На рис. 1 представлены спектры фотостимулированной десорбции молекулярных фрагментов при фотовозбуждении молекулярных плёнок NH<sub>3</sub> (рис. 1(а)) и H<sub>2</sub>O (рис. 1(б)) при фотовозбуждении соответствующих молекулярных плёнок в области N1s и O1s переходов в *K*-оболочках атомов азота (399–405 эВ) и кислорода (531–543 эВ). Поляризация ондуляторного фотонного пучка была перпендикулярна поверхности образца. На рис. 1(а) представлено семейство ФСД-спектров нейтральных NH<sub>3</sub><sup>0</sup>, NH<sub>2</sub><sup>0</sup>, H<sub>2</sub><sup>0</sup>, H<sup>0</sup> и ионизированных H<sup>+</sup> и H<sub>2</sub><sup>+</sup> молекулярных фрагментов системы NH<sub>3</sub>/Ru(001). На рис. 1(б) изображены ФСД-спектры нейтральных H<sub>2</sub>O<sup>0</sup>, OH<sup>0</sup>, H<sup>0</sup> и ионизированных H<sup>+</sup> и H<sub>2</sub><sup>+</sup> молекулярных фрагментов системы H<sub>2</sub>O/Ru(001).

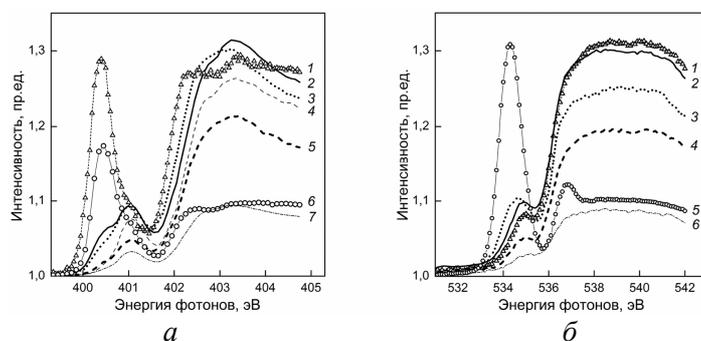


Рисунок 1 – Спектры фотостимулированной десорбции:  
 а – система NH<sub>3</sub>/Ru(001): 1 – H<sub>2</sub><sup>+</sup>; 2 – ПВ; 3 – NH<sub>2</sub><sup>0</sup>; 4 – H<sup>0</sup>; 5 – H<sub>2</sub><sup>0</sup>; 6 – H<sup>+</sup>; 7 – NH<sub>3</sub><sup>0</sup>;  
 б – система H<sub>2</sub>O/Ru(001): 1 – H<sub>2</sub>O<sup>0</sup>; 2 – ПВ; 3 – H<sub>2</sub><sup>+</sup>; 4 – OH<sup>0</sup>; 5 – H<sup>+</sup>; 6 – H<sup>0</sup>

Для сравнения на рис. 1 также приведены ПВ-спектры, которые регистрировались одновременно с соответствующими ФСД-спектрами. Форма ПВ-спектров и спектров выхода H<sup>+</sup> на рис. 1(а) хорошо воспроизводит для системы NH<sub>3</sub>/Ru(001) аналогичные спектры, измеренные ранее, в том числе объёмно-поверхностное расщепление [N1s]4a<sub>1</sub>-пики (400,7/400,8 эВ для поверхностной компоненты и 401,2 эВ – для объёмной). Однако для системы H<sub>2</sub>O/Ru(001) вид ФСД-спектров не демонстрирует явно объёмно-поверхностного расщепления.

В целом, для системы NH<sub>3</sub>/Ru(001) спектры нейтральных фрагментов подобны

ПВ-спектру, а спектри ионизованих фрагментів помітно відрізняються від спектра фотопоглощення [10]. Для системи  $\text{H}_2\text{O}/\text{Ru}(001)$ , на перший погляд, таке відхилення в поведінці спектральних особливостей в області  $[\text{O}1s]4a_1$  переходу не спостерігається. Для аналізу як процесів фотостимульованої диссоціації, так і для виявлення точок розгалуження каналів енергетичної релаксації при збудженні  $1s$  станів  $K$ -оболочок атомів азоту та кисню в молекулах аміаку та води було запропоновано аналізувати та порівнювати не ФСД-спектри, а нормовані на спектри фотопоглощення ФСД/ПВ-спектри. Така нормування дозволила візуалізувати слабкі ефекти, які в оригінальних ФСД-спектрах були недостатньо помітні. На рис. 2 представлені приклади використання такої методики.

На рис. 2(а) представлені ФСД/ПВ-спектри для  $\text{H}^+$  та  $\text{NH}_2^0$  молекулярних фрагментів в системі  $\text{NH}_3/\text{Ru}(001)$ . Для помітності амплітуда ФСД-спектра нейтрального фрагмента збільшена в п'ять разів. Аналогічно, на рис. 2(б) представлені ФСД/ПВ-спектри для  $\text{H}^+$  та  $\text{OH}^0$  молекулярних фрагментів в системі  $\text{H}_2\text{O}/\text{Ru}(001)$  та амплітуда ФСД-спектра нейтрального фрагмента збільшена в десять разів. Помітна антикореляція спектрів в області  $1s$  збуджень атомів N та O доводить наявність розгалуження каналів енергетичної релаксації, які закінчуються формуванням нейтральних або іонізованих фрагментів.

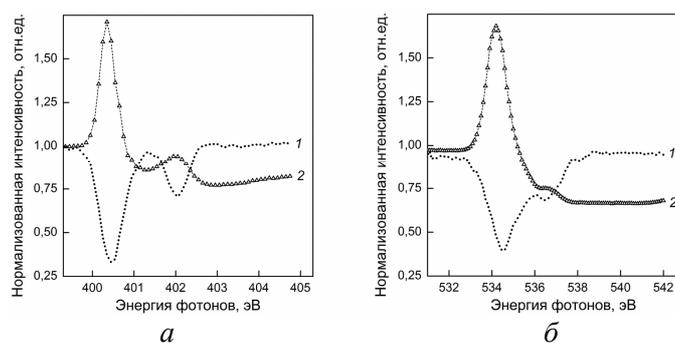


Рисунок 2 – Нормовані ФСД/ПВ-спектри:  
 а – система  $\text{NH}_3/\text{Ru}(001)$ : 1 –  $\text{H}^+/\text{ПВ}$ ; 2 –  $(\text{NH}_2^0 \times 5)/\text{ПВ}$ ;  
 б – система  $\text{H}_2\text{O}/\text{Ru}(001)$ : 1 –  $\text{H}^+/\text{ПВ}$ ; 2 –  $(\text{OH}^0 \times 10)/\text{ПВ}$

При цьому, якщо для системи  $\text{NH}_3/\text{Ru}(001)$  така методика просто підтвердила посилення виходу  $\text{H}^+$  при збудженні поверхневих  $\text{N}1s$  станів, на відміну від, наприклад, ПВ-спектрів фотоелектронів, які також мають подвійну структуру, то для системи  $\text{H}_2\text{O}/\text{Ru}(001)$  наявність об'ємно-поверхневого розщеплення вперше зареєстровано в формі відносно слабого високоенергетичного плеча в області 535 еВ, яке надає смугам в спектрах ФСД/ПВ асиметричний вигляд. На вихідних ФСД-спектрах (рис. 1(б)) така асиметрія зовсім не очевидна. Крім того, з рис. 1 видно, що вихід нейтральних фрагментів  $\text{NH}_3^0$ ,  $\text{NH}_2^0$ ,  $\text{H}_2^0$ ,  $\text{H}^0$  для системи  $\text{NH}_3/\text{Ru}(001)$  та  $\text{H}_2\text{O}^0$ ,  $\text{OH}^0$ ,  $\text{H}^0$  для системи  $\text{H}_2\text{O}/\text{Ru}(001)$  не тільки не посилюється, а, навпаки, послаблюється при збудженні  $1s$  станів атомів N та O в молекулах аміаку та води, які розташовані на поверхні зразка. Спектри виходу нейтралей повторюють відповідні ПВ-спектри в області об'ємних збуджень та навіть послаблені в області поверхневих збуджень.

Отримані результати демонструють протилежну тенденцію порівняно з даними, отриманими від ізольованих молекул в газовій фазі [11]. Для ізольованих молекул процеси надшвидкої диссоціації зменшують вихід іонів, але збільшують вихід нейтралей, в той час як для конденсованих плівок

выход ионов усиливается, а роста нейтралей не наблюдается. Мы объясняем это различие в процессах диссоциации молекул в газовой фазе и в конденсированной плёнке матричным эффектом, который заключается в исходной поляризации молекулярной орбитали на поверхности плёнки и снижении барьера к делокализации резонансного электрона в матрицу. После распада дырки в *K*-оболочке атом водорода ещё достаточно близок к матрице, чтобы произошёл эффективный перенос заряда, и образовался ион. Такая исходная поляризация атомов водорода, которые затем покидают поверхность плёнки, должна даже усиливать фотостимулированную десорбцию ионов. Главный канал молекулярной диссоциации в газовой фазе – сверхбыстрая диссоциация и испускание нейтральных атомов водорода – подавлен в случае конденсированной фазы. Предложенный метод может быть использован для анализа процессов энергетической релаксации в нитрозоаминокомплексах рутения и в комплексах оксидов с рутением, которые в последнее время интенсивно изучаются в связи с исследованиями прекурсоров металлических сплавов, фотохромных, биологически активных и полифункциональных материалов [12]. Кроме того, нитрозо-, нитро- и нитрозонитратные комплексами являются основными соединениями, в которых существует рутений в азотнокислых растворах переработки отработанного ядерного топлива, концентрация рутения в которых превышает содержание рутения в природном сырье [13]. Также динамика электронных возбуждений определяет каталитические свойства катализаторов, содержащих рутений и другие металлы платиновой группы, которые разрабатываются как для очистки хвостовых газов, так и для синтеза азот- и кислородсодержащих соединений [14].

**Выводы.** Таким образом, предложенный метод анализа спектров фотостимулированной десорбции молекулярных фрагментов при фотовозбуждении *K*-орбиталей с использованием нормализованных спектров позволил разделить каналы энергетической релаксации, в которых формируются нейтральные и ионизированные фрагменты молекул аммиака и воды. Анализ спектров выхода десорбции нейтральных фрагментов с плёнок на поверхности рутения показал, что в отличие от случая свободных молекул, в системе металл-адсорбат не реализуется механизм сверхбыстрой диссоциации молекул. Этот результат может быть использован как для исследования процессов энергетической релаксации в азот-рутениевых и кислород-рутениевых системах, так и для объяснения механизмов каталитического действия рутений-содержащих катализаторов.

#### Литература

1. Огурцов А.Н. Модификация кристаллов электронными возбуждениями / А.Н. Огурцов. – Харьков : НТУ "ХПИ", 2009. – 368 с.
2. Martin P.M. Introduction to surface engineering and functionally engineered materials / P.M. Martin. – Salem : Scrivener Publishing, 2011. – 576 p.
3. Itoh N. Materials modification by electronic excitation / N. Itoh, M. Stoneham. – Cambridge : Cambridge University Press, 2000. – 536 p.
4. Ogurtsov A.N. Luminescent analysis of defect accumulation kinetics in radiation technology of crystal structure modification by irradiation / A.N. Ogurtsov, N.Yu. Masalitina // Issues of Chemistry and Chemical Technology. – 2011. – №1. – P. 144–146.
5. Tanaka K. Control of chemical reactions by core excitations / K. Tanaka, E.O. Sako, E. Ikenaga et al. // Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena. – 2001. – V. 119, № 2. – P. 255–266.
6. Огурцов А.Н. Радиационные технологии модификации модельных кристаллов электронными возбуждениями: 4. Десорбция атомарных кристаллов // Інтегровані

технології та енергозбереження. – 2008. – №1. – С. 23–32.

7. Föhlisch A. Direct observation of electron dynamics in the attosecond domain / A. Föhlisch, P. Feulner, F. Hennies et al. // *Nature*. – 2005. – V. 436, № 7049. – P. 373–376.

8. Огурцов А.Н. Радиационные технологии модификации модельных кристаллов электронными возбуждениями: 5. Модификация молекулярных криокристаллических плёнок возбуждением внутриатомных электронных оболочек / Огурцов А.Н. // *Інтегровані технології та енергозбереження*. – 2009. – №1. – С. 31–40.

9. Romberg R. Photon stimulated desorption of neutral hydrogen atoms from condensed water and ammonia by resonant O1s and N1s excitation: search for the signature of ultrafast bond breaking / R. Romberg, S.P. Frigo, A. Ogurtsov et al. // *Surface Science* – 2000. – V. 451, № 1. – P. 116–123.

10. Огурцов О.М. Аналіз молекулярної фотодисоціації в плівках NH<sub>3</sub>/Ru(001) в радіаційній технології модифікації функціональних покриттів опроміненням / О.М. Огурцов, О.М. Близнюк, М.Ф. Клещев // *Хімічна промисловість України*. – 2015. – №4. – 19–22.

11. Piancastelli M.N. Resonant photofragmentation of water at the oxygen K edge by high-resolution ion-yield spectroscopy / M.N. Piancastelli, A. Hempelmann, F. Heiser et al. // *Physical Review A*. – 1999. – V. 59, № 1. – P. 300–306.

12. Tfouni E. Structure, chemical and photochemical reactivity and biological activity of some ruthenium amine nitrosyl complexes / E. Tfouni, M. Krieger, B.R. McGarvey et al. // *Coordination Chemistry Reviews*. – 2003. – V. 236. – P. 57–69.

13. Mun C. Review of literature on ruthenium behavior in nuclear power plant severe accidents / C. Mun, L. Cantrel, C. Madic // *Nuclear Technology*. – 2006. – V. 156. – №3. – P. 332–346.

14. Liu H. Ammonia synthesis catalysts: Innovation and practice / H. Liu. – Singapore: World Scientific Publishing, 2013. – 872 p.

#### Bibliography (transliterated)

1. Ogurtsov A.N. Modifikatsiya kriokristallov elektronnyimi vzbuzhdeniyami. A.N. Ogurtsov. – Harkov : NTU "HPI", 2009. – 368 p.

2. Martin P.M. Introduction to surface engineering and functionally engineered materials. P.M. Martin. – Salem : Scrivener Publishing, 2011. – 576 p.

3. Itoh N. Materials modification by electronic excitation. N. Itoh, M. Stoneham. – Cambridge : Cambridge University Press, 2000. – 536 p.

4. Ogurtsov A.N. Luminescent analysis of defect accumulation kinetics in radiation technology of crystal structure modification by irradiation. A.N. Ogurtsov, N.Yu. Masalitina. *Issues of Chemistry and Chemical Technology*. – 2011. – #1. – P. 144–146.

5. Tanaka K. Control of chemical reactions by core excitations. K. Tanaka, E.O. Sako, E. Ikenaga et al. *Journal of Electron Spectroscopy and Related Phenomena*. – 2001. – V. 119, # 2. – P. 255–266.

6. Ogurtsov A.N. Radiatsionnyie tehnologii modifikatsii modelnyih kristallov elektronnyimi vzbuzhdeniyami: 4. Desorbtsiya atomarnyih kriokristallov. *Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya*. – 2008. – #1. – P. 23–32.

7. Föhlisch A. Direct observation of electron dynamics in the attosecond domain A. Föhlisch, P. Feulner, F. Hennies et al. *Nature*. – 2005. – V. 436, № 7049. – P. 373–376.

8. Ogurtsov A.N. Radiatsionnyie tehnologii modifikatsii modelnyih kristallov elektronnyimi vzbuzhdeniyami: 5. Modifikatsiya molekulyarnyih kriokristallicheskih plynok

vozbuzhdeniem vnutriatomnyih elektronnyih obolochek. Ogurtsov A.N. Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya. – 2009. – #1. – P. 31–40.

9. Romberg R. Photon stimulated desorption of neutral hydrogen atoms from condensed water and ammonia by resonant O1s and N1s excitation: search for the signature of ultrafast bond breaking. R. Romberg, S.P. Frigo, A. Ogurtsov et al. Surface Science – 2000. – V. 451, # 1. – P. 116–123.

10. Ogurtsov O.M. Analiz molekulyarnoyi fotodisotslatsiyi v plivkah NH<sub>3</sub>/Ru(001) v radlatsiyniy tehnologiyi modifikatsiyi funktsionalnih pokrittiv opromlennyam. O.M. Ogurtsov, O.M. Bliznyuk, M.F. Kleshev. Himichna promislovist Ukrayini. – 2015. – #4. – 19–22.

11. Piancastelli M.N. Resonant photofragmentation of water at the oxygen K edge by high-resolution ion-yield spectroscopy. M.N. Piancastelli, A. Hempelmann, F. Heiser et al. Physical Review A. – 1999. – V. 59, # 1. – P. 300–306.

12. Tfouni E. Structure, chemical and photochemical reactivity and biological activity of some ruthenium amine nitrosyl complexes. E. Tfouni, M. Krieger, B.R. McGarvey et al. Coordination Chemistry Reviews. – 2003. – V. 236. – P. 57–69.

13. Mun C. Review of literature on ruthenium behavior in nuclear power plant severe accidents. C. Mun, L. Cantrel, C. Madic. Nuclear Technology. – 2006. – V. 156. – #3. – P. 332–346.

14. Liu H. Ammonia synthesis catalysts: Innovation and practice. H. Liu. – Singapore: World Scientific Publishing, 2013. – 872 p.

УДК 537.57; 539.23; 66.085

Огурцов О.М., Близнюк О.М., Клещев М.Ф.

### **РАДІАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МОДИФІКАЦІЇ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ПОКРИТТІВ. МАС-СПЕКТРОМЕТРИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ ФОТОДИСОЦІАЦІЇ В МОЛЕКУЛЯРНИХ ПЛІВКАХ NH<sub>3</sub> ТА H<sub>2</sub>O**

Досліджені процеси фотостимульованої десорбції нейтральних та іонізованих фрагментів молекул аміаку з поверхні плівки NH<sub>3</sub>/Ru(001) та молекул води з поверхні плівки H<sub>2</sub>O/Ru(001). Мас-спектри фотостимульованої десорбції проаналізовані з використанням методики нормалізації цих спектрів на фотопоглинання зразку. Визначені енергетичні діапазони фотозбудження молекулярної дисоціації, в яких відбувається розгалуження процесів енергетичної релаксації з утворенням нейтральних та іонізованих фрагментів.

Ogurtsov A.N., Bliznjuk O.N., Kleshchev N.F.

### **RADIATION TECHNOLOGY OF FUNCTIONAL COATING SYSTEMS MODIFICATION. MASS-SPECTROMETRY ANALYSIS OF PHOTODISSOCIATION PROCESSES IN MOLECULAR FILMS OF NH<sub>3</sub> AND H<sub>2</sub>O**

Photostimulated desorption processes of neutral and ionized fragments of ammonia molecule from surface of NH<sub>3</sub>/Ru(001) film and water molecule from surface of H<sub>2</sub>O/Ru(001) film were investigated. The mass-spectra of photostimulated desorption have been analyzed using normalization of these spectra on sample photoabsorption. The energy ranges of photoexcitation of molecular dissociation were determined in which the energy relaxation branching processes with formation of neutral and ionized fragments occur.

УДК 663.4

Романов М.С., Романова З.М., Березка Т.О., Плахотна Ю.М.

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ФІЛЬТРУВАННЯ ПИВА**

В умовах ринкової боротьби необхідно постійно покращувати якість пива, тому важливо проводити дослідження технологічних процесів, проводити розробки, давати рекомендації, застосування яких дозволить економити основні і допоміжні матеріали при виробництві пива, не завдаючи шкоди його якості і тим самим знижуючи його собівартість.

Питання фільтрування пива – це складний технологічний процес, який в основному залежить від генерації дріжджів, що використовувалася для зброджування суслу та ступеню освітлення пива перед початком фільтрації. Все це обумовлює необхідність поглибленого дослідження процесу фільтрування пива у виробничих умовах для заводів різної потужності.

Цілі фільтрування пива на сучасному рівні розвитку пивоварної промисловості стають все більш багатограними та складними: освітлення нефільтрованого пива, його стабілізація та карбонізація, купажування пива, додавання різноманітних добавок, що корегують показники фільтрованого пива.

Важливим є удосконалення технології фільтрування пива на основі встановлених раціональних режимів фільтрування пива із застосуванням кізельгурового свічкового фільтра. Це дозволить раціонально використовувати кізельгур, а також досягти необхідної якості пива.

Досліджували процес фільтрування пива «Оболонь Світле» 11 % та «Оболонь Преміум» 12 %.

Досліди здійснювали таким чином. Спочатку фіксували показники якості нефільтрованого пива, а саме: масову частку сухих речовин у початковому суслі, масову частку спирту, кислотність, колір, рН, динамічну в'язкість та мутність, а також генерацію дріжджів для виробництва цього сорту пива: чиста культура, 2 та 4 генерація. Потім проводили пасивний експеримент за наступною методикою. Кожну годину фіксували показники різниці тисків на вході і виході фільтра, зміну продуктивності фільтра та показники мутності фільтрованого пива.

Властивість дріжджів утворювати пластівці дуже важлива і процес утворення пластівців може проходити відносно швидко або затягуватися. Цей фактор впливає на ряд процесів, зокрема на освітлення пива та на тривалість робочого циклу фільтра. Чим старша генерація, тим зменшується ферментативна активність дріжджів і ступінь їх флокуляції, стійкість до автолізу, а також, збільшується ймовірність забруднення сторонніми мікроорганізмами. Тому на практиці не використовують дріжджі старші 4–5 генерації.

Досліджували процес фільтрації пива двох сортів, а результати дослідів наведені на графіках – для пива «Оболонь Світле» 11 %.

Раніше зазначалося, що генерація дріжджів впливає на показники нефільтрованого пива, що поступає на фільтрацію, зокрема на мутність. Показники мутності досліджувалися дані детектора під кутом  $25^{\circ}$ , оскільки цей кут свідчить про кількість більш крупних частинок, наприклад дріжджових клітин або частинок діатоміту. Значення цього показника за нормативами повинно бути не більше 0,20.

На рис. 1. наведено залежність показників мутності фільтрованого пива залежно від генерації дріжджів.

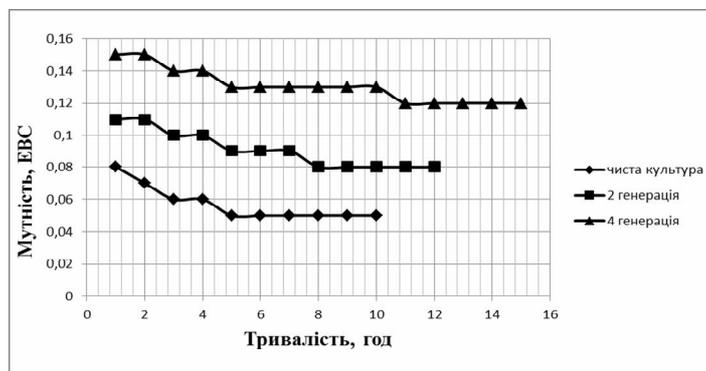


Рисунок 1 – Зміна мутності пива під час фільтрації залежно від генерації дріжджів

В результаті дослідів, що наведені на рис. 1. видно, що чим старша генерація дріжджів, тим вищі показники мутності нефільтрованого пива і фільтрованого пива. Мутність пива на початку фільтрування більша, ніж в кінці фільтрації на 0,03 од. ЕВС.

На рис. 1 наведено, зміну різниці тисків з часом фільтрації залежно від генерації дріжджів та ступеня освітлення нефільтрованого пива.

Результати дослідів наведені на рисунку 2 показали, що процес фільтрації в основному залежить від генерації дріжджів, різниця тисків на вході і на виході фільтра різко зростає при використанні 4 генерації і сягає максимуму (5 бар) приблизно через 10 годин від початку фільтрації, що свідчить про необхідність закінчення фільтрування. Через цей же час значення різниці тисків для чистої культури становитиме 2,5 бар, а для 2 генерації – 3,7 бар, що свідчить про можливість подальшого фільтрування протягом певного часу.

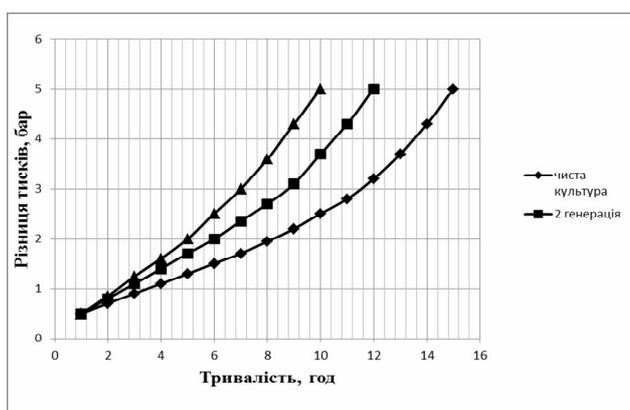


Рисунок 2 – Зміна різниці тисків на вході і виході фільтра з часом фільтрації залежно від генерації дріжджів

Таким чином досліди показали, що всі вище наведені фактори істотно впливають на швидкість і якість фільтрування пива, яке поступає на фільтрацію.

Як зазначалося вище, генерація дріжджів впливає на тривалість робочого циклу фільтра, а також на його продуктивність. На рис. 3 наведено графіки зміни продуктивності фільтра з часом фільтрації залежно від генерації дріжджів.

Результати дослідів, що наведені на рис. 3. показали, що при використанні 4 генерації продуктивність фільтра різко падає і мінімальне значення продуктивності настає через 10 годин фільтрування. За цей же час фільтрування середня продуктивність фільтра буде спостерігатись при використанні 2 генерації, а при використанні чистої культури буде майже максимальною.

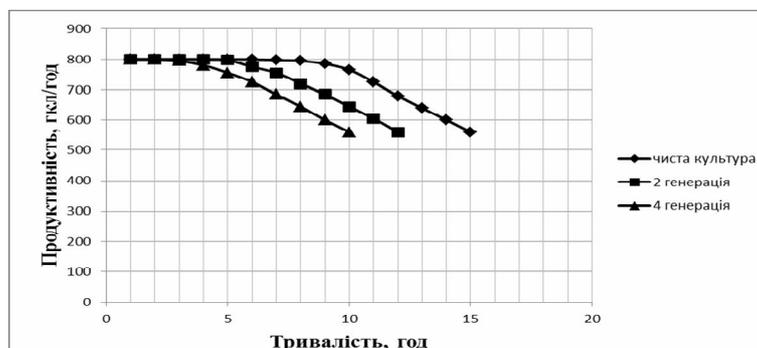


Рисунок 3 – Зміна продуктивності фільтра з часом фільтрації залежно від генерації дріжджів

За 10 годин фільтрації було нафільтровано пива при використанні чистої культури – 7940 гкл і можна фільтрувати ще біля 5 годин; при використанні 2 генерації – 7580 гкл і можна фільтрувати ще біля 2 годин; при використанні 4 генерації – 7125 гкл і фільтрування необхідно припинити про, що свідчить максимальне значення різниці тисків та мінімальне значення продуктивності.

Досліджували пиво з трьох різних ЦКБА для зброджування якого використовували відповідно чисту культуру, 2 та 4 генерації. З кожного ЦКБА було нафільтровано по 3 форфаси пива.

В нижче розміщених таблицях наведені дані фізико - хімічних показників досліджуваного пива «Оболонь Світле» 11 %, динамічна в'язкість, якого 1,7 мПа\*с.

Дані фізико-хімічних показників нефільтрованого та фільтрованого пива «Оболонь Світле» з використанням чистої культури (ступінь освітлення пива – 3,5 млн. дріжджових клітин в 1см<sup>3</sup>) наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Фізико-хімічні показники нефільтрованого та фільтрованого пива «Оболонь Світле» з використанням чистої культури дріжджів

Показники	Нефільтроване пиво з ЦКТ	Форфас №1	Форфас №2	Форфас №3
Масова частка сухих речовин у початковому суслі, %	14,41	11,05	11,03	11,02
Масова частка спирту, %	5,13	3,75	3,73	3,72
Кислотність	2,0	1,5	1,5	1,5
pH	4,37	4,35	4,35	4,35
Колір, EBC	20,5	8,5	8,6	8,5
Колір, од. кол.	1,5	0,5	0,5	0,5
Мутність, EBC	44,2/73,8	0,22/0,08	0,21/0,06	0,20/0,05

У табл. 2 наведені дані фізико-хімічних показників нефільтрованого та фільтрованого пива «Оболонь Світле» з використанням 2 генерації дріжджів (ступінь освітлення пива – 2,6 млн. дріжджових клітин в 1 см<sup>3</sup>).

Таблиця 2 – Фізико-хімічні показники нефільтрованого та фільтрованого пива «Оболонь Світле» з використанням 2 генерації дріжджів

Показники	Нефільтроване пиво з ЦКТ	Форфас №1	Форфас №2	Форфас №3
Масова частка сухих речовин у початковому суслі, %	14,51	11,03	11,01	11,00
Масова частка спирту, %	5,06	3,72	3,71	3,71
Кислотність	2,1	1,55	1,55	1,55
pH	4,46	4,42	4,42	4,43
Колір, ЕВС	20,7	8,7	8,7	8,7
Колір, од. кол.	1,5	0,5	0,5	0,5
Мутність, ЕВС	59,7/93,8	0,26/0,11	0,26/0,10	0,25/0,08

У табл. 3 наведені фізико-хімічні показники нефільтрованого та фільтрованого пива «Оболонь Світле» з використанням 4 генерації дріжджів (ступінь освітлення пива – 1,0 млн. дріжджових клітин в 1 см<sup>3</sup>).

Таблиця 3 – Фізико-хімічні показники нефільтрованого та фільтрованого пива «Оболонь Світле» з використанням 4 генерації дріжджів

Показники	Нефільтроване пиво з ЦКТ	Форфас №1	Форфас №2	Форфас №3
Масова частка сухих речовин у початковому суслі, %	14,41	11,00	10,98	10,97
Масова частка спирту, %	4,99	3,71	3,68	3,66
Кислотність	2,1	1,55	1,55	1,55
pH	4,48	4,42	4,42	4,43
Колір, ЕВС	22,9	8,8	8,8	8,8
Колір, од. кол.	1,7	0,55	0,55	0,55
Мутність, ЕВС	88,5/123,8	0,29/0,15	0,30/0,13	0,31/0,12

За отриманих даних можна зробити висновки, що генерація дріжджів впливає на швидкість фільтрації та на показники фільтрованого пива. Чим старша генерація, тим дріжджі менш активні та гірше флокулюються. Тому чим старша генерація дріжджів використовувалась, тим менша концентрація їх повинна бути у пиві, що поступає на фільтрацію, бо це впливає на процес фільтрування, а також на мутність готового пива. На якість пива впливає також автоліз дріжджів. Чим старша генерація, тим менш стійкі вони до автолізу в порівнянні з чистою культурою. При сильному автолізі пиво набуває гіркий сторонній присмак. Поява у пиві продуктів розпаду білків клітин створює сприятливі умови для розвитку сторонніх мікроорганізмів, що може призвести до зниження

біологічної стійкості пива. Виділені з автолізних клітин протеолітичні ферменти розщеплюють білки пива, змінюючи при цьому білкову та колоїдну стійкість пива і викликають погіршення його смаку.

### Висновки і рекомендації

1. Встановлено, що мутність нефільтрованого пива залежить від генерації дріжджів, чим старша генерація, тим вищі показники мутності нефільтрованого і фільтрованого пива. Показники мутності фільтрованого пива зменшуються за час фільтрації на 0,03 од. ЕВС.

2. Встановлено залежність продуктивності фільтра від якості нефільтрованого пива. При використанні 4 генерації продуктивність фільтра різко падає і мінімальне значення продуктивності настає через 10 годин фільтрування, а при використанні чистої культури за цей же час фільтрації продуктивність фільтра буде майже максимальною.

3. Чим старша генерація дріжджів використовується, тим більша кількість у пиві клітин, що погано флокулюються, тому перед фільтрацією пиво необхідно довше освітлювати, тобто витримувати при низьких температурах ( $-1-0^{\circ}\text{C}$ ) перед початком фільтрації.

4. Теоретично і експериментально доведено, що за 10 годин фільтрації було нафільтровано пива при використанні чистої культури – 7940 гкл і можна фільтрувати ще біля 5 годин; при використанні 2 генерації – 7580 гкл і можна фільтрувати ще біля 2 годин; при використанні 4 генерації – 7125 гкл і фільтрування необхідно припинити про, що свідчить максимальне значення різниці тисків та мінімальне значення продуктивності. За цей час різниця кількості нафільтрованого пива між чистою культурою і 4 генерацією складає 815 гкл.

5. Теоретично і експериментально доведено, що для одержання кращих показників процесу фільтрування 14 % пиво повинно мати такі показники:

- динамічна в'язкість – 1,7–1,8 мПа·с для 14 % пива;
- кількість дріжджевих клітин в 1 см<sup>3</sup> пива не більше 3–3,5 млн (для чистої культури) і 1–2,6 млн (для 2–4 генерації);

На основі отриманих теоретичних і експериментальних досліджень була запропонована апаратурно-технологічна схема, яка забезпечує одержання кращих показників процесу фільтрування. Це заключається в попередньому корегуванні масової частки сухих речовин початкового сусла, що пришвидшує фільтрування пива; відділення перших порцій пива від води, які потім використовуються для попереднього корегування масової частки сухих речовин початкового сусла, що забезпечує менші втрати пива в цеху; приготування і дозування діатомітової суспензії в різних ємкостях, що виключає можливість потрапляння кисню в пиво через кізельгур.

### Література

1. Домарецький В.А. Технологія харчових продуктів: підручник для студентів вищих навчальних закладів / В.А. Домарецький, М.В. Остапчук, А.І. Українець – К.: НУХТ, 2003. – 565 с.

2. Домарецький В.А. Технологія солоду та пива: підручник для студентів вищих навчальних закладів / В.А. Домарецький.– К.: ІНКООС, 2004. – 426 с.

3. Ермолаева Г.А. Справочник работника лаборатории пивоваренного предприятия / Г.А. Ермолаева. – СПб: Профессия, 2004 – 536 с.

4. Жвирблянская А.Ю. Дрожжи в пивоварении / А.Ю. Жвирблянская, В.С. Исаева. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 197 с.

5. Каглер М. Фильтрование пива: пер. с чеш. / М. Каглер, Я. Воборский. – М.: Агропромиздат, 1986. – 279 с.

Bibliography (transliterated)

1. Domaretskiy V.A. Tehnologiya harchovih produktiv: pidruchnik dlya studentiv vischih navchalnih zakladiv. V.A. Domaretskiy, M.V. Ostapchuk, A.I. Ukrayinets – K.: NUHT, 2003. – 565 p.

2. Domaretskiy V.A. Tehnologiya solodu ta piva: pidruchnik dlya studentiv vischih navchalnih zakladiv. V.A. Domaretskiy. – K.: INKOS, 2004. – 426 p.

3. Ermolaeva G.A. Spravochnik rabotnika laboratorii pivovarenogo predpriyatiya. G.A. Ermolaeva. – SPB: Professiya, 2004 – 536 p.

4. Zhvirblyanskaya A.Yu. Drozhzhi v pivovarenii. A.Yu. Zhvirblyanskaya, V.S. Isaeva. – M.: Pischevaya promyshlennost, 1979. – 197 p.

5. Kagler M. Filtrovanie piva: per. s chesh. M. Kagler, Ya. Voborskiy. – M.: Agro-promizdat, 1986. – 279 p.

УДК 663.4

Романов Н.С., Романова З.Н., Березка Т.А., Плахотная Ю.Н.

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИИ ПИВА**

Вопрос фильтрации пива – сложный технологический процесс, который в основном зависит от генерации дрожжей, используемых для сбраживания сусле, и степени осветления пива перед началом фильтрации. Это обуславливает необходимость углубленного исследования процесса фильтрации пива в производственных условиях для заводов разной мощности. Нами проведено исследование рациональных режимов фильтрования пива с использованием кизельгурового свечного фильтра с целью усовершенствования технологии фильтрации пива. Это позволит рационально использовать кизельгур, а также достичь необходимого качества пива.

Romanov N.S., Romanova Z.N., Berezka T.A., Plakhotnaya Y.N.

**STUDY OF BEER FILTRATION**

Beer filtering is a complex process that depends mainly on the yeast generation used for wort fermentation and beer clarification degree before filtration. This necessitates an in-depth study of the beer filtration in a production environment for different capacities plants. We conducted a study of rational modes of beer filtration with diatomite candle filter technology to improve the filtration of beer. This allows efficient use of diatomaceous earth, as well as to achieve the required quality of the beer.

УДК 674.8

Татарьянц М.С., Завинский С.И., Трошин А.Г., Михайличенко В.П.

## ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ КОМПОЗИТНОГО СЫРЬЯ ЧЕРЕЗ ДРОССЕЛЬНО-ПЕРЕМЕШИВАЮЩИЙ ЭЛЕМЕНТ

### 1. Введение

В современной промышленности большую роль играет производство композиционных материалов. Композиционные материалы представляют собой материалы, структура которых состоит из нескольких компонентов, различных по своим физико-механическим свойствам. По характеру своей структуры композитные материалы подразделяются на волокнистые, дисперсно-упрочнённые, слоистые [1]. Возможность сочетания в одном продукте свойств нескольких материалов-компонентов позволяет получать композиты с самыми разными характеристиками, что обуславливает наличие очень широкой номенклатуры продукта.

Соответственно для производства такого количества различных продуктов существуют разные технологические процессы и разное оборудование [2], [3]. Учитывая разнообразие оборудования, можно сделать вывод об актуальности теоретических изысканий, направленных на поиск расчётных зависимостей для определения технологических параметров такого оборудования.

### 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Производство композиционных материалов зачастую предусматривает продавливание исходного сырья тем или иным способом (например, при помощи шнека) через матрицу для формирования продукта. Следовательно, объектом исследования (целью которого является выведение определённых расчётных зависимостей) должен стать процесс прохождения композиционного сырья через внутренние элементы прессующей машины [4]. Есть литература, в которой рассматривается движение композиционного сырья в жидком виде через конические каналы [5], [6]. В нашей работе [7] проводился силовой расчёт шнековой машины, предназначенной для прессования органического композитного сырья.

Однако существуют шнековые экструдеры, в которых сырьё может находиться не только в жидком, но и в твёрдом состоянии, в сыпучем виде. Такие машины зачастую имеют цилиндрикоконические дроссельно-перемешивающие элементы, которые располагаются соосно со шнеком внутри корпуса. Они могут использоваться для выравнивания потока сырья, разогрева материала за счёт трения, перемешивания и гомогенизации материала, также могут выполнять парозапорную функцию. Расчёт процесса движения материала в таких условиях потребует отдельных изысканий, а поскольку законы гидродинамики в данном случае неприменимы, необходимо рассмотреть процесс с позиций механики сыпучего тела, в основу которой заложено кулоновское трение материала на поверхности дроссельно-перемешивающего элемента.

### 3. Цель и задачи исследования

Целью данной работы является вывод аналитических зависимостей, позволяющих рассчитывать потери давления при движении сыпучего композитного материала через дроссельно-перемешивающий элемент с учётом его вращения.

Для достижения цели работы были решены следующие задачи:

1. Построение расчётной схемы и составление уравнений равновесия для элементарного объёма сырья, находящегося на цилиндрическом и коническом участке.
2. Определение влияния вращения дроссельного элемента на движение сырья.
3. Поиск расчётных формул для оценки перепада давления на дроссельно-перемешивающем элементе при его вращении.

**4. Исследование движения сырья через цилиндрический дроссельный элемент, определение влияния вращения поверхности трения, установление расчётных зависимостей**

Решение поставленных задач наиболее удобно будет проводить в несколько этапов. Мы будем рассматривать процесс прохождения сыпучего материала через дроссельный элемент, представляющий из себя цилиндрическую вставку, находящуюся в цилиндрическом корпусе. Цилиндрический и конический участки дроссельного элемента будем рассматривать поочередно.

Первым исследуем цилиндрический участок. Расчётная схема будет иметь вид, показанный на рис. 4.1.

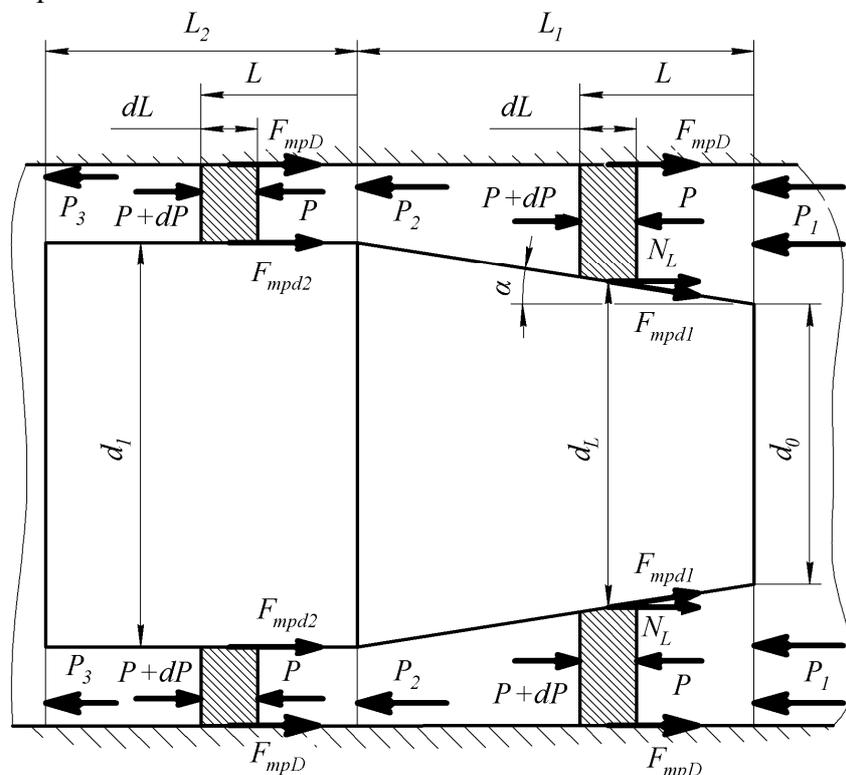


Рисунок 4.1 – Схема цилиндрической вставки

Движущей силой процесса проталкивания сырья через кольцевое сечение является осевое усилие, прикладываемое к материалу в начале участка. Силами, препятствующими движению сырья, являются силы трения, развивающиеся на боковых поверхностях потока материала, контактирующих с корпусом и вставкой.

Для определения изменения давления по длине участка, рассмотрим условия равновесия элементарного участка материала на цилиндрическом участке длиной  $L_2$ .

Примем, что  $P_2$  и  $P_3$  – это соответственно давления на входе в участок и на выходе из него,  $P$  – давление на элементарный участок сырья,  $F_{mpd2}$  – сила трения, возникающая на поверхности вставки,  $F_{mpD}$  – сила трения, возникающая на поверхности кор-

пуса,  $dL$  – ширина елементарного участка,  $dP$  – приращение давления на длине  $dL$ . В данном случае приращение давления отрицательно, поскольку давление максимально в начале участка и минимально в конце. Диаметр корпуса –  $D$ , а диаметр вставки –  $d_1$ , а  $L$  – текущее расстояние от начала вставки до элементарного участка.

Таким образом, сила трения, возникающая на внутренней поверхности корпуса, будет равна:

$$F_{mpD} = \xi \cdot k_{\sigma} \cdot P \cdot \pi \cdot D \cdot dL, \quad (4.1)$$

где  $\xi$  – коэффициент трения,  $k_{\sigma}$  – коэффициент бокового давления.

Коэффициент бокового давления – величина, характерная для сыпучих материалов. Она определяет, какое давление материал оказывает на стенки сосуда в зависимости от приложенного к материалу осевого усилия.

Сила трения для поверхности вставки определяется выражением:

$$F_{mpd2} = \xi \cdot k_{\sigma} \cdot P \cdot \pi \cdot d_1 \cdot dL. \quad (4.2)$$

Предположим, что произведение коэффициента бокового давления на коэффициент трения практически не изменяется по длине участка.

Запишем условие равновесия действующих сил для участка материала длиной  $dL$ :

$$\frac{\pi \cdot (D^2 - d_1^2)}{4} \cdot P = \frac{\pi \cdot (D^2 - d_1^2)}{4} \cdot (P + dP) + F_{mpD} + F_{mpd2}. \quad (4.3)$$

Откуда:

$$-\frac{\pi \cdot (D^2 - d_1^2)}{4} \cdot dP = F_{mpD} + F_{mpd2} = \xi \cdot k_{\sigma} \cdot P \cdot \pi \cdot D \cdot dL + \xi \cdot k_{\sigma} \cdot P \cdot \pi \cdot d_1 \cdot dL. \quad (4.3a)$$

После преобразования получим:

$$-\frac{dP}{P} = 4 \cdot \xi \cdot k_{\sigma} \cdot \frac{1}{D - d_1} \cdot dL. \quad (4.4)$$

Проинтегрируем:

$$-\int_{P_2}^{P_3} \frac{dP}{P} = 4 \cdot \xi \cdot k_{\sigma} \cdot \frac{1}{D - d_1} \cdot \int_0^{L_2} dL. \quad (4.4a)$$

Получим:

$$P_3 = P_2 \cdot \exp\left(-4 \cdot \xi \cdot k_{\sigma} \cdot \frac{L_2}{D - d_1}\right). \quad (4.5)$$

Потери давления составят:

$$\begin{aligned} \Delta P_2 = P_2 - P_3 &= P_2 - P_2 \cdot \exp\left(-4 \cdot \xi \cdot k_{\delta} \cdot \frac{L_2}{D - d_1}\right) = \\ &= P_2 \left(1 - \exp\left(-4 \cdot \xi \cdot k_{\delta} \cdot \frac{L_2}{D - d_1}\right)\right). \end{aligned} \quad (4.5a)$$

Таким образом, мы получили выражение для определения потерь давления на цилиндрическом участке при прохождении через него сыпучего материала. Как видно из уравнения (4.5), величина потерь давления экспоненциально увеличивается при увеличении длины участка.

Следующий этап – это исследование участка с конической частью вставки.

Тут  $L_1$  – длина конического участка;  $P_1$  – давление на входе в участок.

Сила трения для вставки будет определяться по формуле:

$$F_{mpd1} = \xi \cdot k_{\delta} \cdot P \cdot \pi \cdot d_L \cdot \cos(\alpha) \cdot dL, \quad (4.6)$$

где  $d_L$  – переменное значение диаметра конической части вставки, равное:

$$d_L = d_0 + 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg}(\alpha), \quad (4.7)$$

где  $\alpha$  – угол наклона поверхности конической части вставки.

Также возникает сила  $N_L$  – проекция на осевое направление силы нормальной реакции поверхности  $N$  вставки, равная:

$$N_L = k_{\delta} \cdot P \cdot \pi \cdot d_L \cdot \sin(\alpha) \cdot dL. \quad (4.8)$$

Условие равновесия для данной схемы будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{aligned} -\frac{\pi \cdot (D^2 - d_L^2)}{4} \cdot dP &= F_{mpD} + F_{mpd1} + N_L = \xi \cdot k_{\delta} \cdot P \cdot \pi \cdot D \cdot dL + \\ &+ \xi \cdot k_{\delta} \cdot P \cdot \pi \cdot d_L \cdot \cos(\alpha) \cdot dL + k_{\delta} \cdot P \cdot \pi \cdot d_L \cdot \sin(\alpha) \cdot dL. \end{aligned} \quad (4.9)$$

После преобразования и интегрирования аналогично с (4.4a) выражение примет следующий вид:

$$\begin{aligned} -\int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{P} &= 4 \cdot k_{\delta} \int_0^{L_1} \left( \frac{\xi \cdot D + \xi \cdot [d_0 + 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg}(\alpha)] \cdot \cos(\alpha)}{D^2 - [d_0 + 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg}(\alpha)]^2} + \right. \\ &\left. + \frac{[d_0 + 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg}(\alpha)] \cdot \sin(\alpha)}{D^2 - [d_0 + 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg}(\alpha)]^2} \right) dL. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Поскольку характер полученного уравнения схож с уравнением (4.4), потери давления также имеют экспоненциальную зависимость от длины участка. Однако за-

труднение составляет аналитическое решение правой части уравнения, имеющее неприемлемо громоздкий вид. Решение уравнения возможно численными методами.

В случае, если вставка вращается с проскальзыванием относительно материала, это оказывает влияние на осевую составляющую силы трения (см рис. 4.2).

Для упрощения схемы выберем корпус с цилиндрической вставкой в качестве объекта исследования.

Сила кулоновского трения определяется как  $F_{mp\Sigma} = \xi \cdot N$ . В нашем случае суммарная сила трения может быть разложена на две составляющие, одна из которых направлена по оси  $X$ , а вторая – по оси  $Y$ .

Ими являются вектор силы  $\bar{F}_{mpX}$ , который направлен в сторону, противоположную  $\bar{V}_{поступ}$  и вектор  $\bar{F}_{mpY}$ , который направлен противоположно  $\bar{V}_{окр}$ , а векторная сумма  $\bar{F}_{mpX}$  с  $\bar{F}_{mpY}$  и будет являться  $\bar{F}_{mp\Sigma}$ .

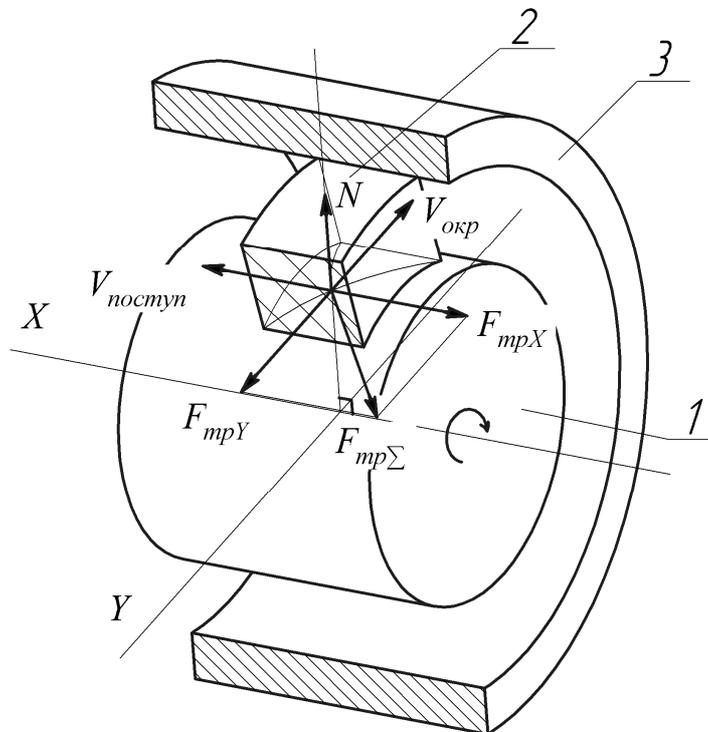


Рисунок 4.2 – Расположение сил при совмещении поступательного движения материала и вращательного движения вставки в корпусе:

1 – вставка; 2 – элементарный участок сырья; 3 – корпус

Тогда отношение  $V_{поступ}$  к  $V_{окр}$  при неизменном по значению векторе  $\bar{F}_{mp\Sigma}$  будет влиять на пространственное положение этого вектора и соответственно на величину его проекций  $F_{mpX}$  и  $F_{mpY}$  следующим образом:

$$\frac{V_{поступ}}{V_{окр}} = \frac{F_{mpX}}{F_{mpY}}. \tag{4.11}$$

Сложение двух взаимно перпендикулярных векторов для вектора  $\bar{F}_{mp\Sigma}$  даёт:

$$F_{mpX}^2 + F_{mpY}^2 = F_{mp\Sigma}^2 \quad (4.12)$$

Зная  $F_{mpX}$ , можно значение найти вектора, направленного по оси  $Y$ :

$$F_{mpY} = \frac{V_{окр}}{V_{поступ}} \cdot F_{mpX} \quad (4.13)$$

Дадим численную оценку соотношения  $\frac{V_{окр}}{V_{поступ}}$ . Для этого возьмём типичные параметры установок:

$D = (80 \dots 150)$  мм;  $d = (75 \dots 145)$  мм;  $\rho = 550$  кг/м<sup>3</sup>;  
 $F = 250; 350$  кг/ч – производительность установки;  
 $n = 450; 550$  об/мин.

Окружную скорость определим по формуле:

$$V_{окр} = D \cdot \frac{n \cdot \pi}{60} \quad (4.14)$$

Для установления поступательной скорости материала используем формулу:

$$V_{поступ} = \frac{4 \cdot F}{\rho \cdot 3600 \cdot \pi (D^2 - d_1^2)} \quad (4.15)$$

Получим следующие соотношения:

- для  $D = 80$  мм;  $d = 75$  мм;  $F = 250$  кг/ч;  $n = 450$  об/мин:  
 $V_{окр} / V_{поступ} = 9,3$
- для  $D = 150$  мм;  $d = 145$  мм;  $F = 350$  кг/ч;  $n = 550$  об/мин:  
 $V_{окр} / V_{поступ} = 27$

Таким образом, мы можем сделать вывод о том, что наличие вращения вставки ведёт к уменьшению осевой составляющей силы трения за счёт отклонения от оси  $X$  к оси  $Y$  суммарного вектора трения, что облегчает движение материала на участке. На основании полученных данных можно говорить о возможности упрощения правой части уравнения (4.9) путём пренебрежения компонентой  $F_{mpdl} = F_{mpX}$  в случае, если вставка вращается внутри корпуса. При упрощении получим из (4.10):

$$-\int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{P} = 4 \cdot k_{\sigma} \int_0^{L_1} \left( \frac{\xi \cdot D + d_L \cdot \sin(\alpha)}{D^2 - d_L^2} \right) dL \quad (4.16)$$

Но, это упрощение является недостаточным для выведения аналитического решения правой части уравнения, поскольку в уравнении (4.16) присутствует компонента

$d_L = d_0 + 2 \cdot L \cdot \operatorname{tg}(\alpha)$ , чрезмерно усложняющая уравнение. Для дополнительного упрощения уравнения принимаем решение рассматривать диаметр конической части втулки как постоянный –  $d_L = \operatorname{const}$  и равный:

$$d_L = d_{cp} = 0,5 \cdot (d_1 + d_0). \quad (4.17)$$

Рассмотрим условие равновесия элементарной области материала, находящейся на участке  $L_1$ . С учётом упрощений  $d_L = d_{cp}$  и  $F_{mpd1} = 0$  из уравнения (4.9) получим:

$$\begin{aligned} -\frac{\pi \cdot (D^2 - d_{cp}^2)}{4} \cdot dP = F_{mpD} + N_L = \xi \cdot k_{\sigma} \cdot P \cdot \pi \cdot D \cdot dL + \\ + k_{\sigma} \cdot P \cdot \pi \cdot d_{cp} \cdot \sin(\alpha) \cdot dL. \end{aligned} \quad (4.18)$$

После преобразования имеем:

$$-\frac{dP}{P} = 4 \cdot k_{\sigma} \frac{\xi \cdot D + d_{cp} \cdot \sin(\alpha)}{D^2 - d_{cp}^2} dL. \quad (4.19)$$

Проинтегрируем:

$$-\int_{P_1}^{P_2} \frac{dP}{P} = 4 \cdot k_{\sigma} \frac{\xi \cdot D + d_{cp} \cdot \sin(\alpha)}{D^2 - d_{cp}^2} \cdot \int_0^{L_1} dL. \quad (4.20)$$

Получим:

$$P_2 = P_1 \cdot \exp \left[ -4 \cdot k_{\sigma} \cdot L_1 \frac{\xi \cdot D + d_{cp} \cdot \sin(\alpha)}{D^2 - d_{cp}^2} \right]. \quad (4.21)$$

Перепад давлений на участке дроссельно-перемешивающего элемента составит:

$$\begin{aligned} \Delta P_1 = P_1 - P_2 = P_1 - P_1 \cdot \exp \left[ -4 \cdot k_{\sigma} \cdot L_1 \frac{\xi \cdot D + d_{cp} \cdot \sin(\alpha)}{D^2 - d_{cp}^2} \right] = \\ = P_1 \left( 1 - \exp \left[ -4 \cdot k_{\sigma} \cdot L_1 \frac{\xi \cdot D + d_{cp} \cdot \sin(\alpha)}{D^2 - d_{cp}^2} \right] \right). \end{aligned} \quad (4.21a)$$

По сравнению с точностью вычислений по уравнению (4.16), замена  $d_L = d_{cp}$  даёт в данном случае малую погрешность (<10 %) и позволяет получить аналитическое решение уравнения.

Аналогично исследуем цилиндрический участок шириной  $L_2$  с учётом, что  $F_{mpd2} = 0$ .

$$-\frac{\pi \cdot (D^2 - d_1^2)}{4} \cdot dP = F_{mpD} = \xi \cdot k_{\delta} \cdot P \cdot \pi \cdot D \cdot dL. \quad (4.22)$$

После преобразования имеем:

$$-\frac{dP}{P} = 4 \cdot k_{\delta} \cdot \xi \frac{D}{D^2 - d_1^2} dL. \quad (4.23)$$

Проинтегрируем:

$$-\int_{P_2}^{P_3} \frac{dP}{P} = 4 \cdot k_{\delta} \cdot \xi \frac{D}{D^2 - d_1^2} \int_0^{L_2} dL. \quad (4.24)$$

Получим:

$$P_3 = P_2 \cdot \exp \left[ -4 \cdot k_{\delta} \cdot \xi \cdot L_2 \frac{D}{D^2 - d_1^2} \right]. \quad (4.25)$$

Определим перепад давлений на участке дроссельно-перемешивающего элемента:

$$\begin{aligned} \Delta P_2 = P_2 - P_3 &= P_2 - P_2 \cdot \exp \left[ -4 \cdot k_{\delta} \cdot \xi \cdot L_2 \frac{D}{D^2 - d_1^2} \right] = \\ &= P_2 \left( 1 - \exp \left[ -4 \cdot k_{\delta} \cdot \xi \cdot L_2 \frac{D}{D^2 - d_1^2} \right] \right). \end{aligned} \quad (4.26)$$

Общий перепад давлений на цилиндрическом дроссельно-перемешивающем элементе составит:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2. \quad (4.27)$$

### **5. Выводы**

1. Получены уравнения, характеризующие перепад давления для цилиндрического и конического участков дроссельно-перемешивающего элемента. Установлено, что зависимость изменения давления по длине дроссельного элемента носит экспоненциальный характер.

2. Установлено, что вращение дроссельно-перемешивающего элемента уменьшает сопротивление трения при движении материала в осевом направлении.

3. После упрощений получена аналитическая зависимость для определения перепада давлений при прохождении сырья через вращающийся цилиндрический дроссельно-перемешивающий элемент.

Литература

1. Современные композиционные материалы / под ред. П. Крока и Л. Броумана; пер. с англ. – М., 1978.
2. Современные технологии получения и переработки полимерных и композиционных материалов : учебное пособие / В.Е. Галыгин, Г.С. Баронин, В.П. Таров, Д.О. Завражин. – Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. – 180 с.
3. Мельникова Л.В. Технология композиционных материалов из древесины : учебник для студентов спец. «Технология деревообработки» / Л.В. Мельникова. – 3-е изд. – М. : МГУЛ, 2007. – 235 с.
4. Булатов И.Г. Разработка процесса прессового гранулирования мелкодисперсных сред на примере минеральных порошков и древесных отходов: Автореф... дис. канд. техн. наук. – Москва, МГУИЭ, 2012. – 22 с.
5. Завинский С.И. Теоретический подход к описанию процесса экструзии композитного органического сырья [Электронный ресурс] // Технологический аудит и резервы производства.– 2013.– № 5/4(13).– URL:<http://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskiy-podhod-k-opisaniyu-protssesa-ekstruzii-kompozitnogo-organicheskogo-syrya> (дата обращения: 06.10.2015).
6. Ламинарные течения в соосных конических каналах : Монография : В 2-х томах / Л.М. Ульев ; Под ред. Л.Л. Товажнянского ; Нац. техн. ун-т "Харьковский политехнический институт".– Харьков : НТУ "ХПИ", 2006.
7. Татарьянц М.С., Завинский С.И., Трошин А.Г. Разработка методики расчёта нагрузок на шнек и энергозатрат шнековых прессов [Электронный ресурс] // Scientific Journal «ScienceRise».– 2015.– №6/2(11).– URL:<http://journals.uran.ua/sciencerise/article/view/44378/41072> (дата обращения: 06.10.2015).

Bibliography (transliterated)

1. Sovremennyye kompozitsionnyye materialy. pod red. P. Kroka i L. Broumana; per. s angl. – M., 1978.
2. Sovremennyye tehnologii polucheniya i pererabotki polimernykh i kompozitsionnykh materialov : uchebnoe posobie. V.E. Galyigin, G.S. Baronin, V.P. Tarov, D.O. Zavrazhin. – Tambov : Izd-vo FGBOU VPO «TGTU», 2012. – 180 p.
3. Melnikova L.V. Tehnologiya kompozitsionnykh materialov iz drevesiny : uchebnik dlya studentov spets. «Tehnologiya derevoobrabotki». L.V. Melnikova. – 3-e izd. – M. : MGUL, 2007. – 235 p.
4. Bulatov I.G. Razrabotka protssesa pressovogo granulirovaniya melkodispersnykh sred na primere mineralnykh poroshkov i drevesnykh othodov: Avtoref... dis. kand. tehn. nauk. – Moskva, MGUIE, 2012. – 22 p.
5. Zavinskiy S.I. Teoreticheskiy podhod k opisaniyu protssesa ekstruzii kompozitnogo organicheskogo syrya [Elektronnyiy resurs]. Tehnologicheskiy audit i rezervy proizvodstva.– 2013.– # 5/4(13).– URL:<http://cyberleninka.ru/article/n/teoreticheskiy-podhod-k-opisaniyu-protssesa-ekstruzii-kompozitnogo-organicheskogo-syrya> (data obrascheniya: 06.10.2015).

6. Laminarnyie techeniya v soosnyih konicheskikh kanalah : Monografiya : V 2-h tomah. L.M. Ulyev; Pod red. L.L. Tovazhnyanskogo ; Nats. tehn. un-t "Harkovskiy poli-tehnicheskiy institut".– Harkov : NTU "HPI", 2006.

7. Tatoryants M.S., Zavinskiy S.I., Troshin A.G. Razrabotka metodiki raschyota na-gruzok na shnek i energozatrat shnekovyih pressov [Elektronnyiy resurs]. Scientific Journal «ScienceRise».– 2015.– #6/2(11).– URL:<http://journals.uran.ua/sciencerise/article/view/44378/41072> (data obrascheniya: 06.10.2015).

УДК 674.8

Татар'янц М.С., Завинський С.І., Трошин О.Г., Михайличенко В.П.

### **ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ РУХУ КОМПОЗИТНОЇ СИРОВИНИ КРІЗЬ ДРОСЕЛЬНО-ПЕРЕМІШУЮЧИЙ ЕЛЕМЕНТ**

Досліджено процес руху композитної сировини крізь дросельно-перемішуючий елемент шнекового екструдеру. Побудована схема навантажень, отримані рівняння рівноваги для елементарного об'єму сировини. Отримана аналітична залежність для визначення перепаду тиску на дросельно-перемішуючому елементі з урахуванням його (елементу) обертання.

Tatariants M.S., Zavinskyi S.I., Troshin A.G, Mikhalichenko V.P.

### **THEORETICAL STUDY OF THE RAW COMPOSITE MATERIAL MOVEMENT THROUGH THROTTLE-MIXING ELEMENT**

The work deals with raw composite material movement through throttle-mixing element of the screw extruder. Scheme of acting forces is drawn and balance equations for infinitesimal material element formed. As the result, analytic equation, which allows to determinate pressure drop on throttle-mixing rotating element, is obtained.

УДК 623.4

Решетило Е.И., Зорькин М.Е.

**СОЗДАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНОЙ БОЕВОЙ МАШИНЫ КЛАССА БТР, БМП**

**Введение.** После второй мировой войны были созданы разнообразные конструкции бронетранспортеров и боевых машин пехоты, отражающие национальные точки зрения на функции подобных машин в собственных военных доктринах и концепциях.

Единственное официальное международное определение различия терминов «бронетранспортер» (БТР) и «боевая машина пехоты» (БМП) было дано в Договоре об обычных вооружённых силах в Европе, подписанного 19 ноября 1990 года в Париже. В договоре определено, что боевая бронированная машина (ББМ), которая вооружена встроенным или штатно установленным оружием калибра менее 20 мм относится к бронетранспортерам, а с установленным оружием калибра не менее 20 мм или пусковой установкой противотанковых ракет относится к разряду БМП.

В современных условиях различие этих терминов фактически исчезло.

**Цель и задача статьи.** Представить свое видение, какими должны быть вновь разрабатываемые боевые машины (БТР, БМП), предназначенные для транспортировки и решения боевых задач пехотного отделения, а также возможности их трансформации в другие виды боевых машин для потребностей армии.

**Основная часть.** Для решения поставленной задачи за основу взяты три принципа подхода к каждому возникающему при конструировании вопросу:

- *Принцип компромиссов и приоритетов при решении поставленных задач.*

Этот принцип должен применяться в первую очередь на начальном этапе проектирования. Например, определение, какие цели из приоритетного ряда целей необходимо поражать (выходом является тип вооружения, калибр, тип боеприпасов) и от каких средств поражения необходимо обеспечить защиту (выходом является толщина броневых листов, их расположение, необходимость применения других материалов и систем), но при этом масса изделия не должна превышать заданную величину. При применении принципа компромиссных решений необходим пересмотр концепции построения боевой машины типа БТР, БМП. Например, в последнее время однозначно прослеживается тенденция иметь повышенную защищенность боевых расчетов, что ведет к росту массы от 13...14 т (БМП-1, БМП-2) до более 30 т («Бредли» М2А3, «Мардер» 1А3), вплоть до 63,5 т (предлагаемая ВАЕ Systems перспективная БМП), а характеристики подвижности стараются сохранить или даже улучшить. При этом блок вооружения практически не изменяется.

- *Модульный принцип проектирования.*

В наиболее общем смысле модульный принцип проектирования заключается в создании того или иного изделия в виде совокупности различных самостоятельных модулей, соединенных между собой. Такими модулями в боевых машинах являются несущая система, кабина, двигатель, отдельные агрегаты трансмиссии, а также элементы систем подвески, управления, торможения и пр.

Преимущество модульного принципа заключается в возможности проведения одновременной работы над многими узлами, что уменьшает время на разработку всей боевой машины. Чтобы сократить объем оригинальной документации и сроки освоения

в производстве, а также облегчить обслуживание машины и уменьшить номенклатуру запасных частей, необходимо стремиться к уменьшению числа модулей.

Иерархический метод построения систем заключается в том, что типовыми элементами замены являются модули первого уровня, которые, в свою очередь, объединяются, составляя более крупные модули второго уровня, и т.д. Таким образом, фактически модули первого уровня являются «строительным материалом» для создания модулей более высоких уровней и системы в целом. При этом все модули должны иметь единую сетку геометрических и присоединительных размеров и обладать свойством совместимости.

- *Принцип модульной трансформации изделий.*

Этот принцип, в техническом исполнении, есть разновидность модульного принципа проектирования, но он затрагивает вопросы боевого применения изделий и их непосредственное техобеспечение при решении тех или иных боевых задач. Например, при незамедлительной переброске войск (наступлении/отступлении, оказании помощи) от ББМ требуется высокая мобильность и возможность преодолевать водные преграды, при обороне – максимальная защита от поражающих средств, а блокпосты требуют индивидуального применения техники и т. д. Для обеспечения этих требований в конструкцию закладывается возможность в короткий срок переоборудования/дооборудования изделий силами боевого расчета с применением минимальных технических средств или спецприспособлений.

При проектировании изделия также следует учитывать то обстоятельство, что если ранее экономические вопросы рассматривались в свете экономической эффективности нового образца, рынков сбыта, окупаемости и т.д., то в современных условиях кроме указанного на передний план выходят финансовые и технические возможности самих разработчиков и производителей выполнить работы за свои средства.

Далее рассмотрим и попытаемся обосновать свое видение построения ББМ с учетом мировых тенденций.

Предлагается разработку перспективной ББМ выполнить с использованием базовой универсальной платформы (БУП), на основе гибридной электромеханической трансмиссии (ГЭМТ), которая обеспечивает наиболее высокий уровень модульного исполнения машины, наиболее высокие технические характеристики и с применением гидропневматической подвески, которая максимально позволит увеличить показатель средней скорости передвижения изделия.

ББМ создается по принципу модульной конструкции, за счет которой возможно создание семейства специальных машин путем замены функционального блока и колесной формулы (6×6, 8×8, 10×10 и так далее) без внесения коренных конструктивных изменений. Также это позволяет во время эксплуатации производить формирование подразделений в зависимости от боевой или тактической обстановки, которая сложилась на определенный момент (создавать преимущественное количество машин необходимого типа – боевые или транспортные, медицинские или другие), заменяя функциональный модуль (рис. 3).

С учетом указанного попытаемся сформировать образ ББМ для пехотного отделения с возможной трансформацией ее в другие виды боевой техники (семейство машин). Рассмотрим общие технические характеристики, предлагаемые к реализации и конструктивные решения, которыми они обеспечиваются.

### **1. Общая компоновка**

Общая компоновка ББМ имеет вид (рис. 1).

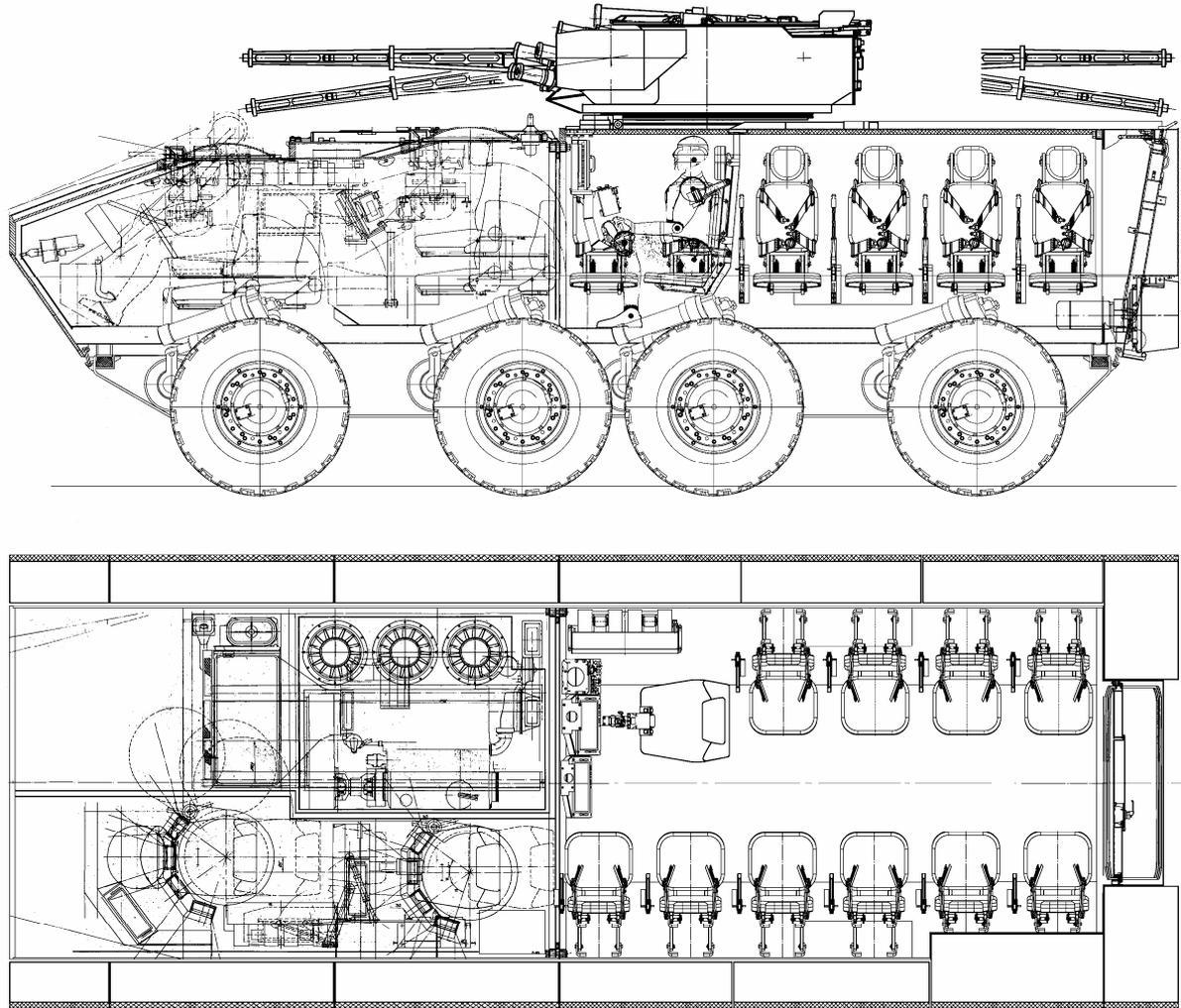


Рисунок 1 – Общая компоновка БМ

Габаритные размеры, мм, не более:

– длина	8000
– ширина (по несъемным элементам)	2950
– высота (по крыше корпуса при клиренсе 440 мм)	2350
– высота максимальная (по БМ при клиренсе 440 мм)	3050

Перспективная колесная БМ представляется в варианте основного исполнения, с возможностью установки боевого модуля с пушечным вооружением, размещением десанта и дополнительного боекомплекта к БМ (рис. 2).

В состав образца БМ с ГЭМТ входят:

- подвижная платформа;
- силовой блок с отделением управления;
- блок функциональный с дистанционно управляемым боевым модулем (БМ);
- комплект ЗИП одиночный.

При этом подвижная платформа и силовой блок с отделением управления образуют БУП.

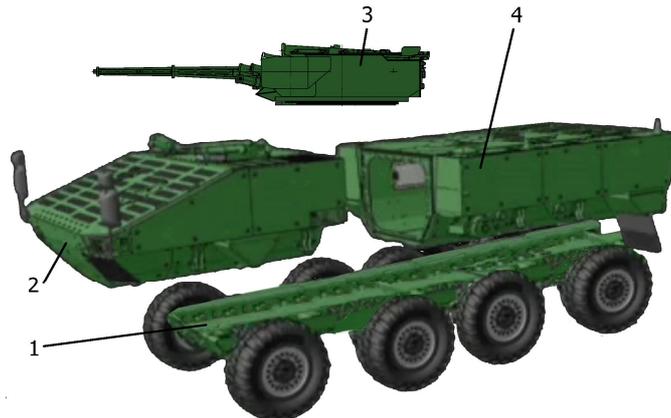


Рисунок 2 – Основные модули БМ

1 – подвижная платформа; 2 – силовой блок с отделением управления; 3 – боевой модуль; 4 – блок функциональный

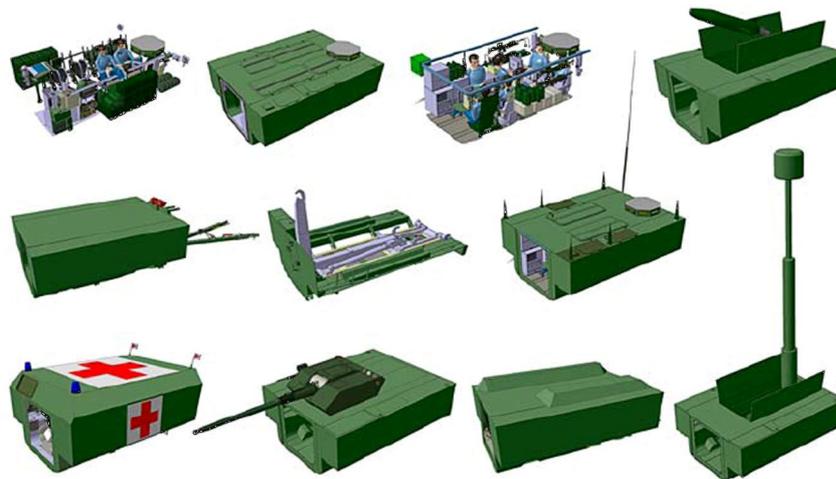


Рисунок 3 – Функциональные модули для создания семейства машин на основе БУП

## **2. Защищенность**

Защищенность БМ складывается из нескольких составляющих:

- информативность о наличии угрозы нападения (обзорность, наличие датчиков и т.д.);
- возможность противодействия (маневрирование, система постановки завес и т.д.);
- непосредственно броневая (баллистическая) и другие виды защиты (динамическая, активная и т.д.).

Развитие первых двух составляющих позволяет снизить массу изделия, но при этом требует определенного профессионализма и взаимодействия экипажа.

Броневая защита основного (базового) варианта должна обеспечивать защиту от бронебойных боеприпасов калибра 7,62 мм автоматов и снайперских винтовок с азимутом 360°, элевацией 0°–30°. Этот параметр выбран с той точки зрения, что остальное оружие большего калибра (12,7 мм, 14,5 мм и т.д.) имеет массу и габариты, которые затрудняют скрытое их применение (специально подготовленные места, станки, машины и т.п.), а ручные гранатометы (РПГ-7) в основном применяются на дистанции 50...100 м. Поэтому они должны своевременно обнаруживаться и уничтожаться боевым расчетом (экипажем) БМ.

Уровень защиты от противотанковых мин с массой ВВ (взрывчатое вещество) 10 кг. При этом в первую очередь преследуется задача не сохранения машины, а сохранение жизни и боеспособности боевого расчета.

Конструкция корпуса БМ обеспечивает использование конструктивных элементов, навесных (встраиваемых) материалов, поглощающих или демпфирующих действие ударной волны при подрыве мины (фугаса), а также использование конструктивных форм основы корпуса подвижной платформы (например, многогранная или V-образная форма), которая изменяет характер силового действия ударной волны на поверхность корпуса при подрыве мины (фугаса) под днищем и колесами.

Применение гидропневматической подвески позволяет увеличивать клиренс при преодолении миноопасных участков.

### **3. Вооружение и система управления огнем (СУО)**

Основное вооружение – пушка калибра 30 мм (3ТМ-1 или 3ТМ-2). В перспективе возможно рассмотрение применения автоматической пушки калибра 57 мм (на основе С 60), которая позволит поражать не только наземные, но и воздушные цели до 8 км. Особенно это актуально для борьбы с вертолетами. Аналогичный вариант пушки уже разработан в России.

Спаренный пулемет калибра 7,62 мм (КТ-7,62). Пусковая установка ПТРК «Барьер». Все виды вооружения отечественного производства и соответствуют решению боевых задач пехотного отделения в соответствии с требованиями боевого устава.

При этом возможны варианты установки спаренного вооружения, т.е. вместо пулемета калибра 7,62 мм устанавливать гранатомет калибра 30 мм (КБА-117) или пулемет калибра 12,7 мм.

Блок вооружения и СУО обеспечивают ведение огня при угле возвышения не менее 60° и возможность эффективной стрельбы как с места, так и при движении машины (наличие двухплоскостной стабилизации линии визирования и вооружения) при различных климатических условиях в разное время суток.

### **4. Установка дополнительных систем**

Установка дополнительных систем, которые расширят зоны видимости и наблюдения для экипажа и приводят к улучшению показателей подвижности и боевого применения вооружения. Это система кругового обзора водителя (экипажа) с выведением изображения на монитор водителя (командира, оператора), ночные приборы наблюдения водителя на базе тепловизионной камеры и т. д.

### **5. Боевой расчет**

Боевой расчет БМ представлен в количестве 13 чел. 3 – экипаж (командир машины, оператор и водитель), 10 – десант. Ранее при организации механизированного (моторизованного) пехотного отделения исходили из компромисса потребности и возможности размещения боевого расчета БМ, что привело к неоднородности состава и боевого применения подразделений в одном роде войск. БТР-60, БТР-70, БТР-80 (1+9/2+8), БМП-1 (2+9), БМП-2, БМП-3 (3+7).

Наиболее эффективное использование комплексного вооружения может достигаться только при экипаже 3 человека: водитель – управление машиной; командир машины – наблюдение, выбор цели, целеуказание; оператор – отработка приоритетной цели. Командир машины и водитель находятся в отделении управления, а оператор и десант – в функциональном блоке.

Десант в 10 человек – это полноценное пехотное отделение. Примером может служить организация пехотного отделения тайской армии на бронетранспортере украинского производства БТР-3Е1 (3+10).

**6. Источники энергии**

**А. Дизельгенераторная установка**

Дизельгенераторная установка представляет собой моноблок, состоящий из дизельного двигателя (мощностью 448 кВт), генератора (или блока генераторов общей мощностью 375 кВт) и систем обеспечения их работы.

Компоновка и конструкция БММ предусматривает установку в моторно-трансмиссионном отделении двигателя типа ЗТД (украинского производства), а также двигателей специального назначения и двигателей транспортных средств общего назначения, в том числе и их модификаций в военном исполнении зарубежного производства с аналогичными характеристиками, как с рядным, так и с V-образным расположением цилиндров.

**Б. Электронный блок накопителей**

Составной частью гибридной электромеханической трансмиссии выполненной по принятой нами схеме является электронный блок накопителей. Накопитель энергии в данном случае играет роль буфера для ДВС и ёмкости для рекуперативного торможения и функции движения БММ с выключенным двигателем.

Накопители энергии представляют собой блок, состоящий из аккумуляторных батарей (АКБ) параллельно соединённых с электрохимическими конденсаторами (ЭХК).

**7. Трансмиссия**

Компоновка и конструкция БММ предусматривает модульное выполнение трансмиссии.

Функциональная схема взаимодействия узлов трансмиссии имеет вид (рис. 4).

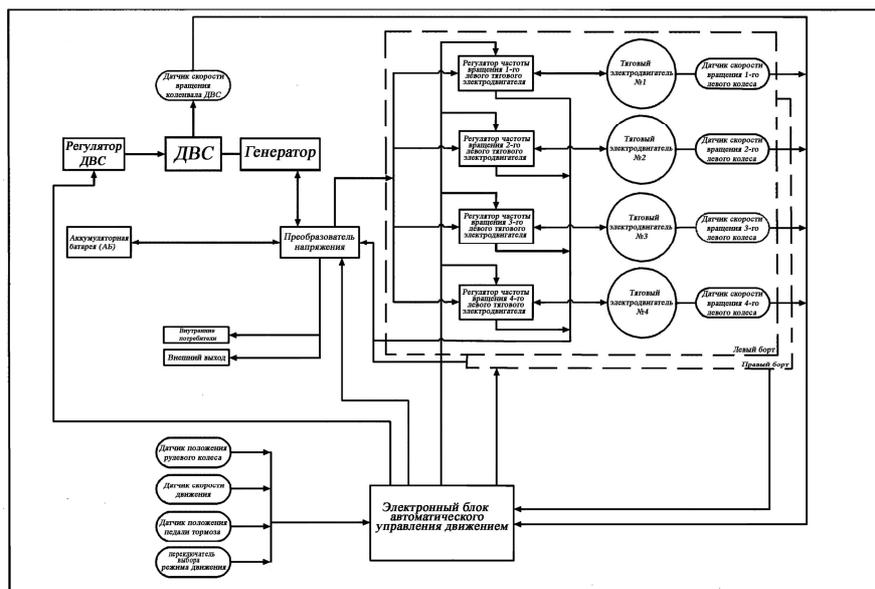


Рисунок 4 – Функциональная схема взаимодействия узлов трансмиссии

Основными элементами трансмиссии является согласующий редуктор между двигателем и генератором, 8 мотор-колес (украинской разработки и изготовления), системы охлаждения и систем управления различного уровня.

Трансмиссия обеспечивает:

- пробег по шоссе с выключенным ДВС при скорости 20 км/ч, – не менее 0,5 км (за счет накопителей энергии);
- минимальный радиус поворота (на грунте)  $V/2$  (вокруг своей оси);
- максимальная скорость движения 110 км/ч;
- среднюю скорость по дорогам с интервалами неровностей 1,5; 2 и 2,5 базы на уровне 50...60 км/ч;
- широкий диапазон бесступенчатого регулирования скорости движения;
- рекуперацию мощности в режиме торможения.

### 8. Подвеска

Подвеска ББМ независимая, балансирная (или рычажная), гидропневматическая управляемая с обеспечением изменения клиренса. Общий ход подвески составляет 350 мм. Подвеска регулируемая и обеспечивает изменение дифферента и угла наклона корпуса ББМ  $\pm 5^\circ$  в продольной плоскости и до  $\pm 8^\circ$  в поперечной плоскости. При этом дорожный просвет составляет:

- при статическом положении подвески, 440 мм (номинальный, без учета выштамповок на днище);
- диапазон изменения, 265...615 мм (при управляемой подвеске).

Жесткость подвески регулируемая и повышается при увеличении скорости движения ББМ.

### 9. Колеса и шины

Колеса оснащаются пневматическими бескамерными шинами с рисунком протектора повышенной проходимости с установкой вставки типа "Runflat" (грузошина) для обеспечения движения ББМ со скоростью до 20 км/ч на дальность до 40 км при отсутствии избыточного давления воздуха в шине.

### 10. Водоходные качества

Водоходные качества машины однозначно сохраняются в базовом варианте с обеспечением скорости на плаву до 10 км/ч. На изделиях, на которых устанавливается дополнительное оборудование или различного рода защита (баллистическая, динамическая, активная и т.д.) при массе достигающей 26 т предлагается водоходный движитель не устанавливать, при этом преодоление мелких водных преград сохранится, но скорость при этом упадет до 2...3 км/ч. При весе до 30 т – сухопутный вариант.

В качестве водоходного движителя используются винты в насадках. Привод винтов электрический.

**Заключение.** Таким образом, создаваемая ББМ, по сравнению с имеющимися на вооружении украинской армии образцами, обеспечивает:

- снижение перегрузок, действующих на водителя, командира и десант в 1,1...5,1 раз, а также увеличение скорости движения в 1,5...2 раза при движении по неровностям высотой до 140 мм на всех скоростных режимах;
- уменьшение уровня тряски на 10÷80 % на всех скоростных режимах;
- увеличение средней скорости движения с полной нагрузкой в 1,5...2 раза;

- увеличение ресурса машины в 2 раза;
- использование ДВС меньшей мощности (до 30 % снижения мощности по сравнению с традиционной схемой) при сохранении силового момента на колесах;
- снижение удельного расхода топлива (на 20÷30 %) за счет работы дизеля в экономичном режиме и использования энергии торможения, что значительно увеличивает эксплуатационный показатель – запас хода;
- увеличение ускорения машины при разгоне на 10÷15 % за счет одновременно использования мощности накопителей энергии и силового генератора;
- движение с одинаковой скоростью вперед и назад (от 0 до 110 км/ч с электронным ограничением скорости заднего хода до необходимого уровня);
- автономное движение на электротяге, с использованием только энергии накопителей;
- разворот машины на месте за счет реверса колес левого и правого борта;
- возможность организации дистанционного управления ББМ или его движение по заданной траектории без участия экипажа;
- может обеспечивать работу в режиме автономной станции электроснабжения внешних потребителей;
- более быстрое восстановление ББМ за счет замены поврежденного модуля.

**Выводы.** На основании приведенного материала можно сделать вывод, что концепция построения ББМ может быть рекомендована для использования при проектировании колесной техники специального назначения. Конструкторский и производственный потенциал Украины позволяет изготовить опытные и серийные образцы с использованием как отечественных, так и импортных комплектующих. Данный класс техники востребован как для нужд украинских силовых структур, так и для внешнего рынка.

#### Литература

1. Проектирование полноприводных колесных машин / (Афанасьев Б. А., Бочаров Н. Ф., Жеглов Л. Ф. и др.). – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э Баумана, 1999. – 488 с.
2. Применение электромеханических трансмиссий для машин класса бронетранспортеров. / Поторока А. В., Решетило Е. И., Гращенко Г. П., Липовец В. В., Евтушенко В. В., Бондарь А. И. // Механика и машиностроение. Научно-технический журнал. – 2012. – № 2 – 264 с.
3. (Электронный ресурс). Режим доступа к материалу: <http://www.teamgcv.com>, 2012. Название с титульного экрана.
4. Hybrid tech heads to battlefield (Электронный ресурс) Режим доступа к материалу: <http://www.foxnews.com/leisure/2012/02/28/hybrid-tech-heads-to-battlefield>, 2012. – Название с титульного экрана.
5. Rickard O. Lindstrom. Getting the most from protected platforms as weapon systems (Электронный ресурс): International Armoured Vehicles CONFERENCE & EXHIBITION London, The Swedish Armoured Fighting Vehicle programmes. 8–9 February 2011. – Название с титульного экрана.

#### Bibliography (transliterated):

1. Proektirovanije polnoprivodnyh koljosnyh mashyn. (Afanas'jev B.A., Bocharov N.F., Zheglov L.F. i dr.). – M.: Izd-vo MGTU im. N. E. Baumana, 1999. – 488 p.

2. Primeneniye elektromehaniicheskikh transmissij dlja mashyn klassa bronetransport-jorov. Potoroka A.V., Reshetilo Ye.I., Graschenkov G.P., Lipovets V.V., Yevtushenko V.V., Bondar' A.I. *Mehanika i mashynostrojenije. Nauchno-tehnicheskij zhurnal.* – 2012. – № 2 – 264 p.

3. (Eljektronnyj resurs). Rezhym dostupa k matjerialu: <http://www.teamgcv.com>, 2012. Nazvanije s titul'nogo ekrana.

4. Hybrid tech heads to battlefield (Eljektronnyj resurs). Rezhym dostupa k matjerialu: <http://www.foxnews.com/leisure/2012/02/28/hybrid-tech-heads-to-battlefield>, 2012. – Nazvanije s titul'nogo ekrana.

5. Rickard O. Lindstrom. Getting the most from protected platforms as weapon systems (Eljektronnyj resurs): International Armoured Vehicles CONFERENCE & EXHIBITION London, The Swedish Armoured Fighting Vehicle programmes. 8–9 February 2011. – Nazvanije s titul'nogo ekrana.

УДК 623.4

Решетіло Є.І., Зорькін М.Є.

### **СТВОРЕННЯ ПЕРСПЕКТИВНОЇ БОЙОВОЇ МАШИНИ КЛАСУ БТР, БМП**

В статті проведено аналіз функціонального призначення, сформульована концепція та вимоги до бойових броньованих машин БТР, БМП, що розробляються вперше, із застосуванням модульного принципу. Представлений варіант виконання БМ на основі гібридної електромеханічної трансмісії.

Reshetilo Ye. I., Zorkin M. Ye.

### **CONSTRUCTION OF ADVANCED COMBAT VEHICLE CLASS APC, IFV**

The article analyzes the functional purpose, formulated the concept and requirements for newly developed armored combat vehicles APC, IFV using the modular principle. Represented embodiment of ACV based on the hybrid electromechanical transmission.

Селихов Ю.А., Коцаренко В.А., Горбунов К.А., Горбунова О.В.

## **ОЦЕНОЧНЫЙ РАСЧЕТ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ СОЛНЕЧНЫХ КОЛЛЕКТОРОВ КАК АЛЬТЕРНАТИВНОГО ИСТОЧНИКА ЭНЕРГИИ**

Эффективность использования тех или иных альтернативных источников энергии напрямую зависит от региона, в котором необходима установка. Качественный мониторинг энергопотенциала позволяет определять наиболее подходящую технологию и рассчитывать ее окупаемость на годы вперед, а так же исключает ошибки связанные с региональными особенностями.

Конечно, первоначальную цену энергонезависимого дома, с экологически чистыми, возобновляемыми источниками энергоснабжения, сегодня нельзя назвать низкой, но по истечении нескольких эксплуатаций альтернативные источники энергии полностью окупают свою стоимость и приносят ощутимую финансовую выгоду в течении многих лет. Не стоит забывать об экологичности альтернативных технологий добычи энергии. Солнечные, ветровые и гелиоустановки не производят вредных выбросов в атмосферу, не загрязняют воду и безопасны для человека.

Нехватка ресурсов в удаленных регионах, в совокупности с быстрыми темпами развития технологии привело к ситуации, когда производство солнечных батарей быстро набирает обороты, а стоимость конечных изделий с каждым годом становится все более доступной для потребителей со средним уровнем доходов.

В данном исследовании предлагается провести анализ, целью которого будет ответ на вопрос – сможет ли система солнечных коллекторов полностью заменить газовую систему отопления жилого дома, или новая установка сможет быть использована только как вспомогательная система, работающая в комплексе с электродкотлом.

Анализ литературных источников [1–2] показал, что примеры использования солнечных коллекторов как единственного источника тепла в мировой практике известны. Разработаны и реализованы такие проекты в Германии. Работоспособность подобной системы базируется на 3-х основных компонентах:

1. Высокие требования, предъявляемые к энергосбережению здания (использование строительных материалов с минимальной теплопроводимостью);
2. Установка большого количества коллекторов, занимающих всю поверхность кровли;
3. Наличие бака-теплоаккумулятора на 30–35 м<sup>3</sup>, установленного непосредственно в доме.

В течение года тепло накапливается в баке-аккумуляторе, а в зимний период расходуется по необходимости. [3]

Однако, использование солнечных коллекторов в условиях нашей климатической зоны как единственного источника тепловой энергии для отопления дома практически не представляется возможным, т.к. такой проект будет неоправданно дорог. Это связано, в первую очередь, с качеством инсоляции: короткий день, низкое положение солнца над горизонтом, облачность. В зимний период года исключения могут составлять морозные дни с ярким солнцем, когда коллекторы дают значимую выработку тепла. За счет отражения от снега можно получить выработку тепла, сравнимую с летней. Но такая погода обычно стоит за зиму не более 15 дней. В оставшиеся дни зимнего пе-

риода использование коллекторов энергетически не оправдано. Поэтому, как правило, в зимнее время коллектора могут работать как дополнительный источник тепловой энергии для предварительного подогрева воды с последующим догревом от основного источника (электрический тэн, твердотопливный котел, тепловой насос) [4].

При использовании солнечных коллекторов (СК) в системе горячего водоснабжения необходимо правильно определить их количество или площадь: от этого зависит производительность. Расчет солнечного коллектора любого типа базируется на потребностях, которые известны потребителем заранее.

В качестве примера проведем оценочный предварительный расчет коллекторов плоского и вакуумного типов.

### Расчет солнечного коллектора плоского типа

При выборе данного типа коллектора были проанализированы все его преимущества в сравнении с вакуумным типом, а именно:

1. "трубы в виде термоса" имеют плохой оптический КПД (коэффициент полезного действия);

2. трубы могут потускнеть;

3. трубы очень восприимчивы к граду.

Схема установки системы солнечного коллектора представлена на рисунке 1.

Практика показывает, что на квадратный метр поверхности, установленной перпендикулярно ярким солнечным лучам, приходится в среднем 900 Вт тепловой энергии (при безоблачном небе). Расчет плоского типа коллектора будем производить на основе модели площадью 1 м<sup>2</sup> с возможностью в дальнейшем перевести результаты расчетов на нашу площадь. Лицевая сторона – матовая, черная (обладает близким к 100 % поглощением тепловой энергии). Тыльная сторона утеплена 10 см слоем пенопласта.

В качестве объекта исследования, в котором необходимо установить такую систему был выбран частный дом, площадью 100 м<sup>2</sup>, в котором отсутствует система газораспределения.

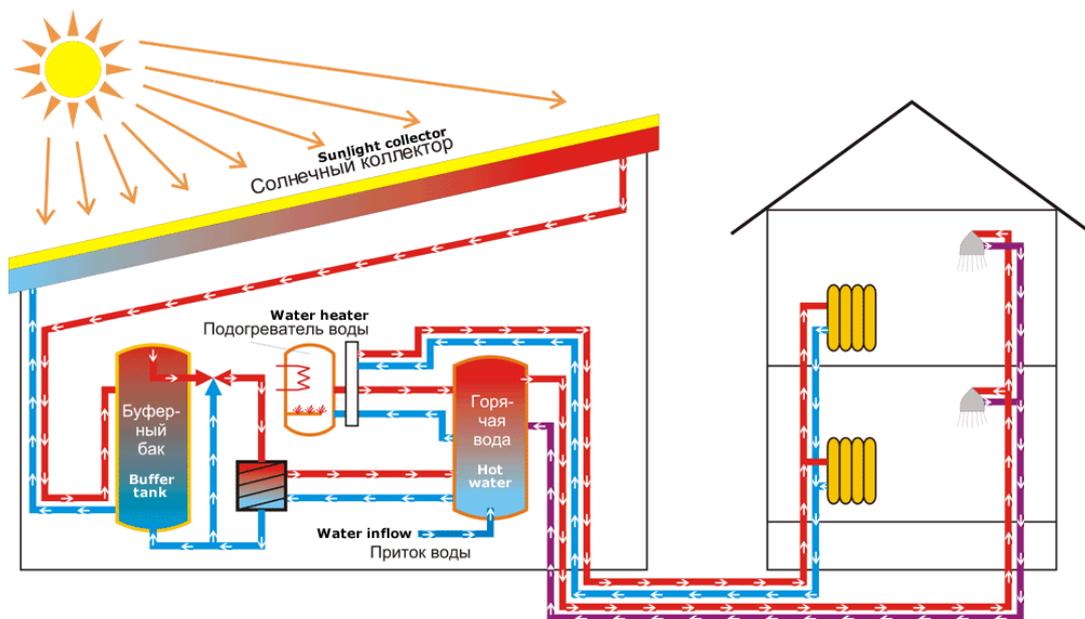


Рисунок 1 – Схема установки системы солнечного коллектора

Задача сводится к расчету тепловых потерь, которые присутствуют на обратной, теневой стороне. Коэффициент теплоизоляции пенополистирола –  $0,05 \frac{\text{Вт}}{\text{м}} \cdot \text{град}$ . Зная толщину и предположив, что разница температур на противоположных сторонах материала – в пределах 25 градусов, рассчитаем теплопотери:

$$Q = \frac{0,05}{0,1} \cdot 25 = 12,5 \text{ Вт}.$$

Такие же приблизительно потери ожидаются со стороны торцов и труб, то есть суммарное количество составит 25 Вт. Безоблачным небо бывает редко, кроме того, следует учитывать влияние налета грязи на коллекторе. Поэтому снизим количество тепловой энергии, приходящейся на  $1 \text{ м}^2$ , до 800 Вт. Вода, используемая в качестве теплоносителя в плоских СК, обладает теплоемкостью, равной  $4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{град}$  или  $1,16 \frac{\text{Вт}}{\text{кг}} \cdot \text{град}$ . Это означает, что для того, чтобы повысить температуру одного литра воды на один градус, потребуется затратить  $q = 1,16 \text{ Вт}$  энергии.

Учитывая эти расчеты, получаем следующую величину  $L$  для нашей модели солнечного коллектора  $1 \text{ м}^2$  площади:

$$L = \frac{800}{1,16} = 689,65 \frac{\text{кг}}{\text{град}},$$

где  $L$  – количество воды, которое можно нагреть в коллекторе (модель площадью  $1 \text{ м}^2$ ) в течение часа.

Примем эту характеристику с запасом, т.е.  $L = 700 \frac{\text{кг}}{\text{град}}$ . При этом не учитываются потери тепла с лицевой стороны, которые будут возрастать по мере разогрева. Эти потери будут ограничивать разогрев теплоносителя в солнечном коллекторе в пределах 70–90 градусов. В связи с этим, величина  $L = 700 \frac{\text{кг}}{\text{град}}$  может быть применена к низким температурам (от 10 до 60 градусов). Расчет солнечного коллектора показывает, что система площадью  $1 \text{ м}^2$  способна нагреть 10 литров воды на 70 градусов, что вполне достаточно для обеспечения дома горячей водой. Можно уменьшить время нагревания воды за счет уменьшения объема солнечного коллектора при сохранении его площади. Если же количество проживающих в доме требует большего объема воды – следует применить несколько коллекторов такой площади, которые соединяют в одну систему.

Для того, чтобы солнечный свет воздействовал на радиатор максимально эффективно, коллектор необходимо ориентировать под углом к линии горизонта, равным широте местности. В среднем, для обеспечения жизнедеятельности одного человека необходимо 100 л горячей воды. Учитывая, что вода до подогрева имеет температуру около  $10 \text{ }^\circ\text{C}$ , разница температур составляет  $\Delta T = 70 - 10 = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Количество тепла для подогрева воды рассчитывается по выражению:

$$W = q \cdot V \cdot \Delta T = 1,16 \times 100 \times 60 = 6,96 \text{ кВт енергии.}$$

Разделив  $W$  на количество солнечной энергии, приходящейся на  $1 \text{ м}^2$  поверхности в данной местности (среднемесячное значение для Восточного региона Украины составляет  $w = 3,26 \text{ кВт/м}^2$ ), получим площадь коллектора.

$$F = \frac{W}{w} = \frac{6,96}{3,26} = 2,1 \text{ м}^2.$$

Таким образом, улучшения эффективности водонагревательной системы такого типа возможно достичь методом уменьшения объема и одновременном увеличении площади.

### Расчет солнечного коллектора вакуумного типа

Проектирование системы должно проводиться с учетом:

- особенностей климата в данной местности;
- объема отапливаемого помещения и этажности здания;
- количества проживающих (работающих) людей;
- типа установленных отопительных приборов;
- коэффициента теплопроводности стен (определяется исходя из толщины и материала);
- места размещения теплообменника и т.п.

Проектные работы выполняются в два этапа. Первый предполагает расчет солнечного коллектора для отопления, а именно определение их количества, необходимого для отопления. Второй этап – привязка полученных результатов к существующей системе отопления. На первом этапе определяется количество энергии, которое вырабатывается коллектором за 1 день. Для этого следует использовать данные о среднемесячном уровне солнечного излучения (сведения из Гидрометцентра) в данной местности. Умножив это значение на площадь коллектора и его КПД (примем равным 0,8), получим:

$$E_k = E_c \cdot S_p \cdot 0,8 \text{ (кВт/день).}$$

Затем определяем количество расходуемой воды ( $V_{\text{дн}}$ , л.), которая нагреется коллектором в течение дня. Это зависит от параметров отопительной системы. Как было указано выше, для повышения температуры 1 л воды на 1 градус требуется затратить 1,16 Вт мощности. Разделив числовое значение количества вырабатываемой энергии за день на теплоемкость воды, получим температуру, до которой солнечный коллектор данной модели может нагреть теплоноситель.

$$T_k = E_k / (V_{\text{дн}} \times c), \text{ } ^\circ\text{C}$$

Если расчеты показывают, что полученная температура является недостаточно высокой, для ее увеличения необходимо изменить площадь СК: установить дополнительные вакуумные трубки или панели.

Выводы

В результате проведенных предварительных оценочных расчетов установлено, что систему солнечных коллекторов для данного конкретного случая целесообразно устанавливать только как второстепенный (дополнительный) источник подогрева воды, т.к. велико значение затрачиваемой при этом энергии. Для использования этого вида альтернативной энергетики в качестве основного и единственного источника необходимо либо уменьшать полезную площадь отапливаемого помещения, либо увеличивать полезную площадь теплопередачи.

Литература

1. [http://allterra.biz/?page\\_id=69](http://allterra.biz/?page_id=69).
2. Даффи Дж. Тепловые процессы с использованием солнечной энергии / Даффи Дж., Бекман У.А. – М: Мир, 1977.– 420 с.
3. Байрамов Р.Б. Солнечные водонагревательные установки / Байрамов Р.Б., Ушакова А.Д. – Ашхабад, 1987. – 162 с.
4. Концепция государственной энергетической политики Украины на период до 2020 г. // Информационное приложение. – 2001. –№ 10, 8 с.

УДК 697.6

Селихов Ю.А., Коцаренка В.А., Горбунов К.А., Горбунова О.В.

**ОЦІНЮВАЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ ЯК АЛЬТЕРНАТИВНОГО ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ**

У статті проведена оцінка доцільності використання системи сонячних колекторів у Східному регіоні України. Проведено оціночні розрахунки площі таких пристроїв з метою визначення можливості використовувати їх як основне джерело теплової енергії.

Selikhov Y.A., Kotsarenko V.A., Gorbunov K.A., Gorbunova O.V.

**ESTIMATING THE POSSIBLE USE OF SOLAR COLLECTORS AS ALTERNATIVE ENERGY**

The article contains assessment of the appropriateness of the use of solar collectors in the Eastern region of Ukraine. Estimated calculations of the solar collectors surface area were carried out in order to determine the feasibility of using them as the main source of thermal energy.

УДК 536.248.2

Павленко А.М., Усенко Б.О., Кошлак Г.В.

## ТЕПЛОФІЗИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ОТРИМАННЯ ОБ'ЄМНИХ АМОРФНИХ СТРУКТУР

**Вступ.** Процес формування об'ємного шару з аморфною структурою має ряд труднощів, так як охолодження об'ємного масиву розплавленого металу, на відміну від тонких плівок є процесом, який відрізняється істотною інтенсивністю енергообмінних процесів. Для отримання об'ємних аморфних структур нами була розроблена експериментальна лабораторна установка, на якій досліджували процес отримання об'ємних аморфних структур методом розливання в мідну охолоджувану форму з подачею охолоджених часток (інокуляторів). Сутність технології лиття розплаву в охолоджувану форму з подачею охолоджених часток (інокуляторів) полягає в реалізації внутрішнього тепловідведення та утворенні в розплаві додаткових активних центрів охолодження. Вплив інокуляторів проявляється у збільшенні швидкості та розвитку переважно об'ємного твердіння. Дана технологія відрізняється в основному реалізацією внутрішнього тепловідведення за допомогою локальних теплостоків (інокуляторів). Розробка експериментальних технологій процесу лиття в охолоджувану форму з додаванням інокуляторів вимагає великих витрат часу і матеріальних ресурсів, скоротити які дозволяє застосування методів математичного моделювання та оптимізації. Математичне моделювання процесів тепломасообміну інокуляторів в розплавах дозволить виявити особливості технологічного процесу, та встановити вплив інокуляторів на ступінь аморфізації розплаву.

### Теоретична частина

Розрахунок процесів плавлення частинки металу (інокулятора) в одномірній постановці задачі

### Фізична постановка задачі

Розглянемо процес плавлення твердого інокулятора, що має температуру плавлення  $t_L^T$ , повністю зануреного в розплав металу із заданою температурою  $t_p$ . У реальних умовах початкова температура інокулятора  $t_0$  завжди менше температури затвердіння металу  $t_S^P$  і тому, спочатку на його поверхні утворюється оболонка твердого металу. Подальший хід розплавлення залежить від співвідношення між значеннями температур  $t_L^T$ ,  $t_S^P$ ,  $t_p$  [1]. У I період при зануренні інокулятора в розплав на його поверхні намерзає оболонка твердого металу. Тепло, яке надходить від розплаву шляхом конвекції і затвердіння металу на поверхні, витрачається на прогрівання інокулятора і плавлення оболонки розплаву. Закінчення періоду визначається моментом повного розплавлення оболонки. У II період твердий інокулятор прогрівається до температури плавлення  $t_L^T$  та безпосередньо контактує з рідким розплавом. У III періоді інокулятора починає плавиться, а рідка фаза тіла розчиняється в розплаві.

**Твердіння і плавлення оболонки металевого розплаву на поверхні частинки (інокулятора)**

**Математична модель**

На поверхні інокулятора відбувається намерзання оболонки твердого металу з подальшим розплавленням цієї оболонки. Даний період плавлення описується системою рівнянь теплопровідності для двошарового тіла, яка включає рівняння для матеріалу тіла ( $0 \leq r < R_i$ ) та для оболонки розплаву ( $R_i \leq r < Z_m$ ) при  $\tau > \tau_1 + \tau_2$ :

$$\begin{cases} c_i(t)\rho_i(t)\frac{\partial t_i(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda_i(t)\frac{\partial t_i(r,\tau)}{\partial r}\right], 0 \leq r < R_i; \\ c_m(t)\rho_m(t)\frac{\partial t_m(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda_m(t)\frac{\partial t_m(r,\tau)}{\partial r}\right], R_i \leq r < Z_m. \end{cases} \quad (1)$$

Граничні умови при  $\tau > \tau_1 + \tau_2$ :

на вісі симетрії тіла ( $r = 0$ ) задана умова симетрії [1]:

$$\frac{\partial t_i(0,\tau)}{\partial r} = 0, \quad (2)$$

на межі розділу матеріалу інокулятора і оболонки розплаву ( $r = R_i$ ) задані граничні умови IV роду:

$$\lambda_i(t)\frac{\partial t_i(R_i,\tau)}{\partial r} = \lambda_m(t)\frac{\partial t_m(R_m,\tau)}{\partial r}, t_i(R_i,\tau) = t_m(R_i,\tau), \quad (3)$$

умова теплообміну на межі намерзла оболонка розплаву–розплав ( $r = Z_m$ ):

$$\begin{aligned} -\rho_m(t)Q_m\frac{dZ_m(\tau)}{d\tau} &= \alpha_m(t_p(\tau)-t_V) - \lambda_m(t)\frac{\partial t_m(Z_m(\tau),\tau)}{\partial r}, \\ t(z(\tau),\tau) &= t_L, \quad 0 \leq z(\tau) \leq z_0, \quad \tau > \tau_2, \quad Z_m(\tau) > R_i, \quad \tau > \tau_1 + \tau_2. \end{aligned} \quad (4)$$

Початкові умови:

$$\begin{cases} t_i(r,\tau_1) = \phi_i(r,\tau_1), 0 \leq r < R_i; \\ Z_m(\tau_1 + \tau_2) = R_i, \end{cases} \quad (5)$$

де  $\phi_i(r,\tau_1 + \tau_2)$ , є рішенням задачі теплопровідності для матеріалу інокулятора, при  $\tau = \tau_1 + \tau_2$ .

Період 3 закінчується, коли повністю розплавиться оболонка розплаву, намерзла на поверхні тіла. Тривалість третього періоду –  $\tau_3$ .

### Плавлення частинки металу

#### Математична модель

Процес плавлення матеріалу інокулятора починається після прогрівання його поверхні до температури плавлення. Таким чином, вирішується задача теплопровідності для тіла з граничними умовами III роду на зовнішній межі ( $r = Z_i$ ) для розрахункової області. Прогрівання поверхні тіла описується рівнянням теплопровідності для матеріалу інокулятора при  $\tau > \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$ :

$$c_i(t)\rho_i(t)\frac{\partial t_i(r,\tau)}{\partial \tau} = \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left[r\lambda_i(t)\frac{\partial t_i(r,\tau)}{\partial r}\right], 0 \leq r < Z_i \quad (6)$$

Граничні умови при  $\tau > \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$ :

на вісі симетрії інокулятора ( $r = 0$ ) задано умову симетрії:

$$\frac{\partial t_i(0,\tau)}{\partial r} = 0, \quad (7)$$

умова теплообміну на межі поверхня інокулятора–розплав ( $r = Z_k$ ):

$$\lambda_i(t)\frac{\partial t_i(Z_i,\tau)}{\partial r} = \alpha_m [t_p(\tau) - t_i(Z_i,\tau)], \quad (8)$$

Початкові умови:

$$\begin{cases} t_i(r, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3) = \phi_i(r, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3), 0 \leq r < Z_i; \\ Z_i(\tau_1 + \tau_2 + \tau_3) = R_i, \end{cases} \quad (9)$$

де  $\phi_i(r, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3)$  є рішенням задачі теплопровідності для матеріалу інокулятора, описаної в періоді 3, при  $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$ . Тривалість періоду прогрівання поверхні тіла до температури плавлення –  $\tau_4^n$ .

Після прогрівання поверхні тіла починається процес його плавлення, який описується рівнянням теплопровідності для матеріалу злитка (6) при  $\tau > \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4^n$ .

Умова теплообміну на межі поверхня тіла–розплав ( $r = Z_i$ ):

$$-\rho_i(t)Q_i\frac{dZ_i(\tau)}{d\tau} = \alpha_m (t_p(\tau) - t_L^i) - \lambda_i(t)\frac{\partial t_i(Z_i(\tau),\tau)}{\partial r},$$

$$t_i(Z_i(\tau), \tau) = t_L^i, 0 \leq Z_i < R_i, \tau > \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4^n. \quad (10)$$

Початкові умови:

$$t_i(r, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4^n) = \phi_i(r, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4^n), 0 \leq r < Z_i, \quad (11)$$

де  $\phi_i(r, \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4^n)$ , є рішенням задачі теплопровідності для матеріалу інокулятора, описаної в періоді прогрівання поверхні матеріалу інокулятора до температури плавлення при  $\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4^n$ . Тривалість періоду плавлення матеріалу тіла –  $\tau_4^n$ .

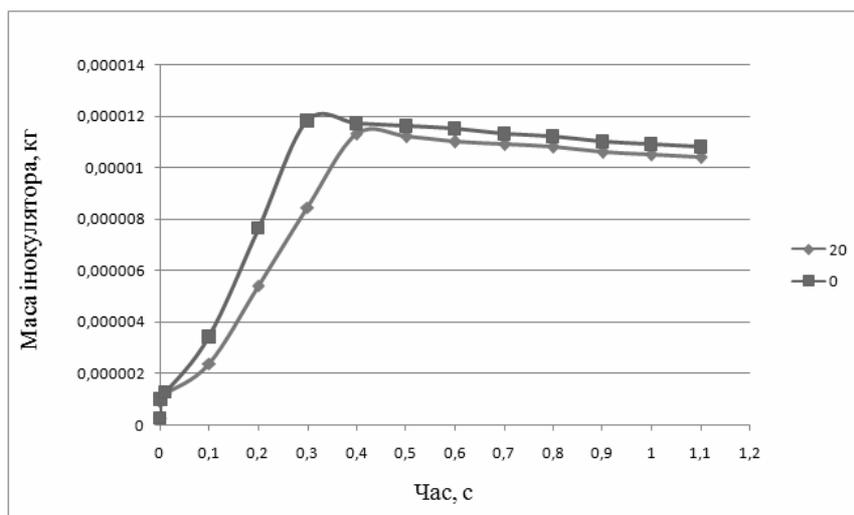
Період 4 вважається закінченим за умови повного розплавлення матеріалу інокулятора. Тривалість четвертого періоду –  $\tau_4 = \tau_4^n + \tau_4^{nn}$ .

Розрахункова модель була виконана із застосуванням мови програмування BASIC, отримані розрахунки дозволили визначити вплив інокуляторів на степінь аморфізації структури. Результати розрахунку у вигляді графіків приведені на рис. 1–2.

В якості модельного сплаву був обраний сплав, який має гарну схильністю до аморфізації, внаслідок вмісту в ньому елементів що легко аморфізуються, таких як Zr, В, Р, Si, що є відомими аморфізаторами [2–3]. В табл. 1 наведені теплофізичні властивості досліджуваного сплаву.

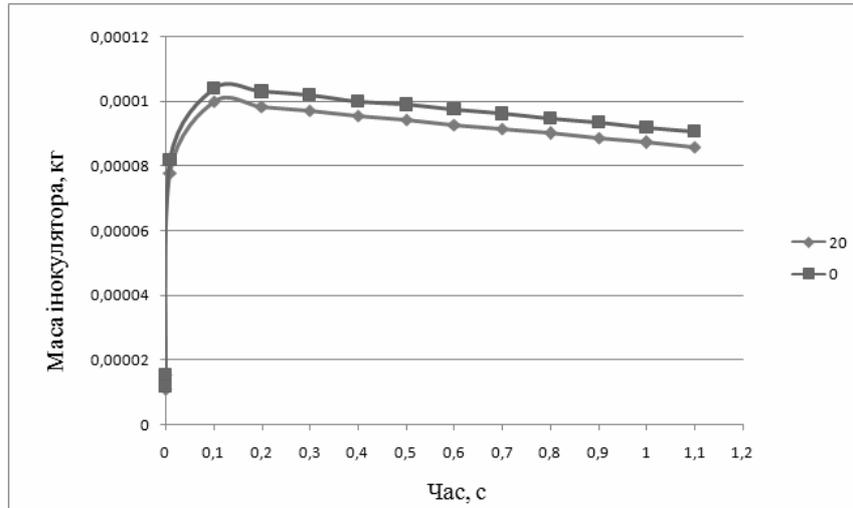
Таблиця 1 – Теплофізичні властивості досліджуваного сплаву

Сплав	Температура плавлення, °С	Температура переходу в аморфний стан, К	Густина сплаву, кг/м <sup>3</sup>	Теплоємність сплаву, Дж/(кг·К)	Коефіцієнт теплопровідності, Вт/м·К
Cu <sub>45</sub> Ti <sub>35</sub> Zr <sub>20</sub>	1090	410	6900	513,9	175



0–20 – початкова температура інокулятора відповідно 0°C та 20°C

Рисунок 1 – Графік зміни маси інокулятора зі сплаву Cu<sub>45</sub>Ti<sub>35</sub>Zr<sub>20</sub> в процесі плавлення в рідкому розплаві при початковому діаметрі інокулятора 1 мм



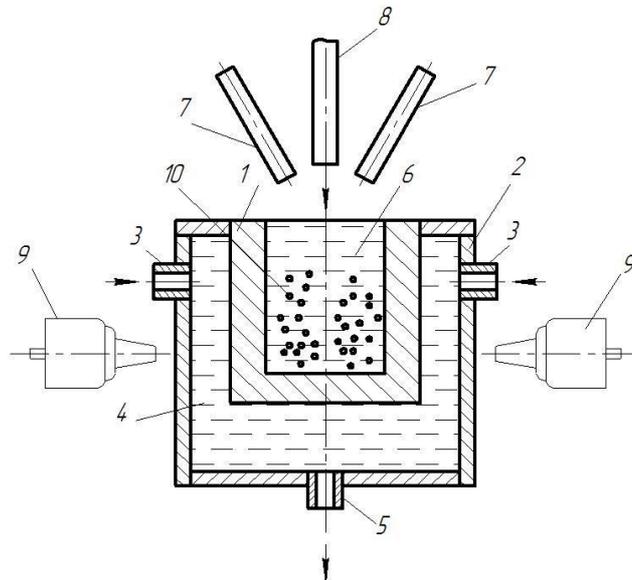
0–20 – початкова температура інокулятора відповідно 0°C та 20°C

Рисунок 2 – Графік зміни маси інокулятора зі сплаву  $\text{Cu}_{45}\text{Ti}_{35}\text{Zr}_{20}$  в процесі плавлення в рідкому розплаві при початковому діаметрі інокулятора 2 мм

### Експериментальна частина

Для вивчення закономірностей формування масивних аморфних структур методом лиття в охолоджувану форму в заводських умовах була розроблена та модифікована установка рис. 3, на якій проводили експериментальні дослідження.

Сутність технології лиття розплаву в охолоджувану форму з подачею охолоджених часток (інокуляторів) полягає в реалізації внутрішнього тепловідведення та утворенні в розплаві додаткових активних центрів охолодження. Вплив інокуляторів проявляється у збільшенні швидкості та розвитку переважно об'ємного затвердіння..

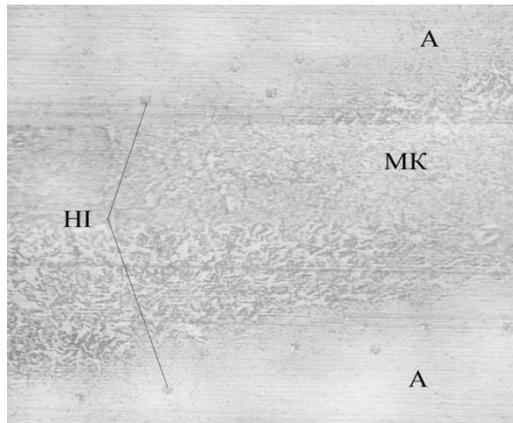


1 – охолоджувана форма, 2 – форма, що обмежує процес, 3 – отвори для подачі охолоджуючої рідини, 4 – вода, 5 – отвір для відведення води, 6 – розплав, 7 – подача охолоджених часток (інокуляторів), 8 – подача розплаву металу, 9 – ультразвуковий випромінювач, 10 – охолоджені частки металу (інокулятори)

Рисунок 3 – Схема лиття металу в охолоджувану форму

У момент контакту твердої частинки інокулятора з рідким металом в розплаві створюється локальне термічне переохолодження навіть у разі значних перегрівів всього обсягу розплаву.

Механічні коливання високої інтенсивності, що створюються випромінювачем поз. 9, індукують об'ємні хвилі, які, проходячи крізь стінки конструкції, що обмежує процес поз. 2 та мідну охолоджувану форму поз.1, впливають на розплав, що твердіє. Металофізичні дослідження структури отриманих злитків показані на рис. 4



А – аморфна структура, МК – мікрокристалічна структура  
НІ – не розплавлені інокулятори

Рисунок 4 – Аморфно-мікрокристалічна структура литого металу з вмістом інокуляторів 20...30 % по масі

Для визначення впливу параметрів режиму лиття металу в охолоджувану форму на ступінь аморфізації масивних аморфних структур використовували теорію планування експерименту, обробка експериментальних даних була виконана за методикою планування експерименту другого порядку з ядром  $2^4$ . Графіки обробки експериментальних даних приведені на рис. 5–6.

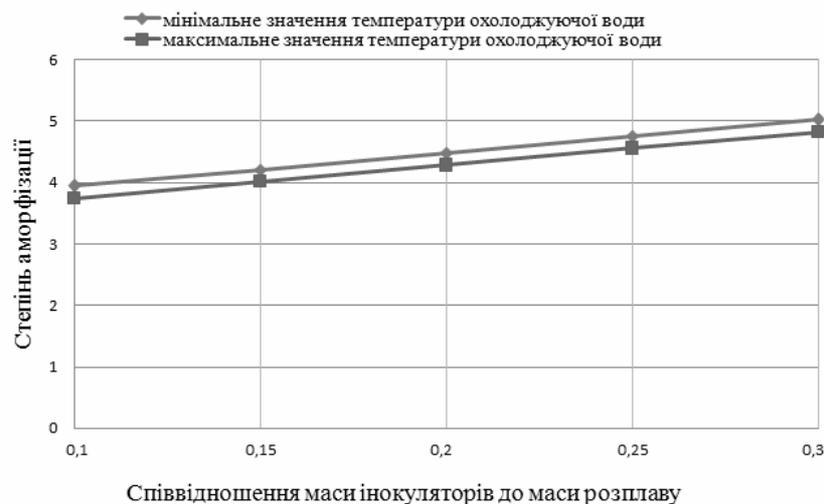


Рисунок 5 – Графік залежності ступеня аморфізації від співвідношення маси інокуляторів до маси розплаву при мінімальному та максимальному значенні температури охолоджуючої води

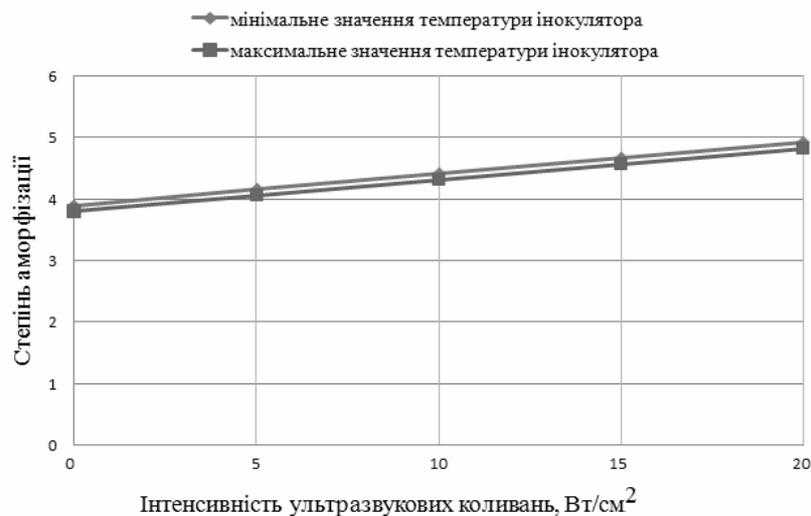


Рисунок 6 – Графік залежності ступеня аморфізації від інтенсивності ультразвукових коливань при мінімальному та максимальному значенні температури інокулятора

Аналіз графіків показує, що найбільше значення для отримання аморфної структури має співвідношення інокуляторів до маси розплаву (фактор  $x_1$ ).

Інокулятори в розплаві відбирають тепло на власне нагрівання та розплавлення, в результаті знижується температура розплаву. Ефект охолодження який вносять інокулятори призводить у результаті до зростання швидкості затвердіння. Зі збільшенням співвідношення маси інокуляторів до маси розплаву швидкість затвердіння зростає.

Інтенсивність ультразвукових коливань, фактор ( $x_2$ ) надає позитивний вплив на формування аморфної структури. У процесі затвердіння розплав металу піддається ультразвуковому впливу, що в свою чергу не дає утворитися кристалічній структурі металу поблизу охолоджуваної стінки форми та межі з охолоджуючим середовищем, а так само призводить до утворення мікрокристалічної структури металу в центральній частині розплаву.

При впливі ультразвукових коливань в процесі затвердіння злитка поліпшується структура і механічні властивості металу. Зі збільшенням інтенсивності ультразвукових коливань в розплаві виникає перемішування, і інтенсифікуються процеси теплообміну, температура в об'ємі розплаву декілька вирівнюється і це призводить до деякого прискорення зняття перегрівання.

## Висновки

1. Додавання інокуляторів призводить до реалізації внутрішнього тепловідведення та утворення в розплаві додаткових активних центрів кристалізації.

2. Вплив інокуляторів проявляється у збільшенні швидкості та розвитку переважно об'ємного затвердіння. Дана технологія відрізняється в основному реалізацією внутрішнього тепловідведення за допомогою локальних теплостоків.

3. Розплав металу з введеними охолодженими частками (інокуляторами) характеризується переохолодженим станом по всьому об'єму злитка, що твердіє. Інокулятори не тільки знімають перегрів, а й переохолоджують розплав.

4. У момент контакту твердої частинки інокулятора з рідким металом в розплаві створюється локальне термічне переохолодження навіть у разі значних перегрівів всього обсягу розплаву.

Література

1. Pavlenko A.M., Usenko B.O., Koshlak H.V. Analysis of thermal peculiarities of alloying with special properties, Metallurgical and Mining Industry, 2014, No2, p.p. 15–20.
2. Pavlenko A.M., Usenko B.O., Koshlak H.V. Mathematical modeling of the casting process in Comsol 3.5a package, Metallurgical and Mining Industry, 2015, No1, p.p. 132–140.
3. Anatoliy Pavlenko, Bohdan Usenko, Investigation thermophysical processes obtaining of massive amorphous structure, The special aspects energy and resource saving, Oradea University Press, 2015, pp. 235–274.

УДК 536.248.2

Павленко А.М., Усенко Б.О., Кошлак А.В.

**ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОЛУЧЕНИЯ ОБЪЕМНЫХ  
АМОРФНЫХ СТРУКТУР**

В статье приведены результаты исследования теплофизических особенностей получения объемных аморфных структур в металлах и сплавах. Рассмотрены особенности процессов тепломассообмена при образовании в расплаве дополнительных активных центров охлаждения, локальных теплостоков для создания внутреннего теплоотвода. Построена математическая модель плавления инокуляторов в расплавах для оптимизации процесса получения массивных аморфных структур, которая позволяет сократить время экспериментальных исследований и материальные ресурсы.

Pavlenko A., Usenko B., Koshlak A.

**THE THERMOPHYSICAL PECULIARITIES OBTAINING OF VOLUMETRIC  
AMORPHOUS STRUCTURES**

The article presents the results of research of thermophysical peculiarities obtaining volumetric amorphous structures in metals and alloys. This technology differs mainly the realization internal heat removal by means of local heat sink (inoculator). The peculiarities of processes of heat and mass transfer during the formation of in the melt additional active cooling centers, local heat sink to generate internal heat removal. A mathematical model of melting inoculator in melts for optimizing the process of obtaining massive amorphous structures, which allows to reduce time of experimental research and material resources to create massive amorphous structures. Mathematical modeling of processes heat and mass transfer inoculator in melts allows you to identify peculiarities of the technological process, and establish influence inoculator on the degree of amorphization melt. The results of physical experiments are compared with the results of the calculation. The results can be used to analyze the physical regularities and informed choice of technological modes of formation of massive amorphous structures in different metals and alloys.

The results provide an effective assessment of the intensity of heat transfer during the casting process, which makes it possible to estimate and predict the ability of alloys to the amorphization of the structure.

«ИНТЕГРИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Ежеквартальный научно-практический журнал

Редколлегией к опубликованию принимаются статьи по следующим научным направлениям:

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

а также другим направлениям, на стыке различных отраслей знаний.

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

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

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

**ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ:**

Размер бумаги А4 (210×297 мм); левое и правое поля – 25 мм, верхнее и нижнее – 30 мм; рекомендуемый шрифт Times New Roman Сут; размер шрифта – 12; межстрочный интервал – 1.

**ПОРЯДОК РАЗМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛА:**

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

**РЕДКОЛЛЕГИИ**

Украина, 61002,  
Харьков-2, ул. Фрунзе, 21,  
НТУ «ХПИ», редколлегия журнала  
«Интегрированные технологии и энергосбережение»,  
секретарю редколлегии Горбунову К.А.  
Тел. (057) 707-69-58.  
(057) 707-61-99  
Email: [sita\\_gor@mail.ru](mailto:sita_gor@mail.ru)

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

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

**ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 22786**