

## ИТЭ №1, 2014

### **ЕНЕРГЕТИКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

<i>Маляренко В. А., Колотило И. Д., Щербак И. Е.</i> Потребители-регуляторы как эффективное направление регулирования графика нагрузки электрических сетей	3
<i>Шевелев А. А., Тарасенко А. Н., Павлова В. Г., Барвинок В. С., Павлюченко А. М.</i> Метод численного анализа теплового состояния мембранных поверхностей нагрева	15
<i>Топоров В. Г., Шеїна З. В., Скрильник К. Ю., Сафта А. В.</i> Імовірність перерозподілу мас рідини в порожнині трубопроводу	21

### **МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПРОМИСЛОВОГО ОБЛАДНАННЯ**

<i>Білецький Е. В., Толчинський Ю. А.</i> Експериментальний пристрій для вимірювання гідравлічних характеристик течії неньютонівських рідин у каналах	27
<i>Бобух А. А., Литвиненко И. И., Беспалов К. И.</i> Алгоритм управления процессом регенерации аммиака в отделении дистилляции производства соды	35
<i>Братах М. І., Рузіна І. М., Сіроус В. С., Криволапчук І. П.</i> Методика розрахунку умов виникнення гідродудару	40
<i>Кобец Е. В., Загребельная Л. И.</i> Нестационарная математическая модель регулирующего кавитационного устройства	45
<i>Коляденко В. А., Соболева А. В., Кузнецова Т. О., Недільський Д. В.</i> Розрахунок параметрів руху очисного поршня	52
<i>Подустов М. А., Бобух А. А., Ковалёв Д. А.</i> Алгоритм псевдооптимального управления динамическими системами	57
<i>Рассоха А. Н.</i> Реологические свойства растворов фурано-эпоксидных реакционноспособных олигомеров	63

### **ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**

<i>Шапорев В. П., Шестопалов А. В.</i> Синтез частиц титана алюминия анизотропной формы при протекании твердофазных реакций в системе гидроксид алюминия–диоксид титана	73
<i>Атаманов Ю. Л., Крутиков Г. А., Стрижак М. Г.</i> Анализ энергетических характеристик ударных пневмоагрегатов со встроенным резервуаром	82
<i>Вурье Б. А., Гордюхин А. А.</i> Синтез многорежимных гидропневмоагрегатов	92

*Оксенич Н. В., Долженко И. Ю., Комар Ю. Е., Мельник С. А., Беличенко А. В.*  
Анализ принципов формирования облика комплексов основного вооружения танков 99

### **СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ТА ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ**

*Киприч К. К., Ковалив В. И., Малахов В. А.*  
Анализ динамики рынка легкобронированной техники развивающихся стран 106

*Киприч К. К., Ковалив В. И., Малахов В. А.*  
Анализ тенденций изменения оборонных расходов стран Азиатско-Тихоокеанского региона 113

УДК 621.311

Маляренко В.А., Колотило И.Д., Щербак И.Е.

## ПОТРЕБИТЕЛИ-РЕГУЛЯТОРЫ КАК ЭФФЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РЕГУЛИРОВАНИЯ ГРАФИКА НАГРУЗКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Как известно, электроэнергия в силу целого ряда экономических и экологических факторов всё дороже обходится человечеству, что не позволяет иметь ее чрезмерные резервы как условия избыточного предложения. Поэтому задача оптимизации работы электросетей и энергосистемы становится все более актуальной.

Экономическая эффективность энергосистемы во многом определяется характером графика электрической нагрузки (ГЭН), выравнивание которого не может быть самопроизвольным случайным процессом. Оно требует проведения целенаправленных мероприятий с соответствующим материальным и финансовым обеспечением. Принимать участие в этом процессе должны все участники: государство, энергосистема, потребители [1].

Для выравнивания ГЭН энергосистемы весьма эффективно использование потребителей-регуляторов. Потребитель-регулятор (ПР) нагрузки – это потребитель электрической энергии, режим работы которого предусматривает возможность ограничения электропотребления в часы максимума для выравнивания ГЭН энергетической системы или электростанции и увеличения нагрузки в часы минимума.

Потребители-регуляторы условно можно разделить на две основные группы: ПР, которые являются частью энергосистемы и реализуют совмещенную функцию производства – потребления электроэнергии, это различные аккумулирующие электростанции (ГАЭС, парогазовые (ПГУ) и газотурбинные (ГТУ) установки, воздушно-аккумулирующие газотурбинные электростанции (ВАГТЭ)) и массовая группа ПР, которые используют электроэнергию в собственных целях (технологии кабельного электротеплоаккумуляционного обогрева, автоматизированные системы нагрева воды электроэнергией).

Главное достоинство аккумулирующих электростанций состоит в потреблении электроэнергии в часы минимальной нагрузки и обеспечение энергией в часы максимальной нагрузки энергосистемы. За счёт этого достигается уменьшение ночного провала, снижается неравномерность ГЭН, отпадает необходимость разгрузки или остановки крупных энергоблоков электростанций. Наиболее широкое применение получили ГАЭС, КПД которых составляет 75–80 %.

Электрические станции расположены около больших городов – крупных потребителей электрической энергии. ПР, расположенные в этих городах, позволят не останавливать блоки этих электростанций в период провала графика нагрузки, что существенно скажется на эффективности энергосистемы.

Способ выравнивания графика нагрузки энергосистемы с помощью ПР является одним из наиболее распространённых способов в разных энергосистемах [4].

К ПР могут относиться установки нагрева воды на горячее водоснабжение электроэнергией с накопительными емкостями и возможностью использования электроэнергии в период провала нагрузки энергосистемы. При переходе от централизованного горячего водоснабжения на установки нагрева воды электроэнергией и на квартирные электробойлера, таких установок может быть великое множество, а их суммарная мощность может достигать большой величины. Только для г. Харькова суммарная мак-

симальная мощность нагрева в ночной период составит 600–700 МВт. Это мощный потребитель – регулятор энергосистемы. Для сравнения, мощность ГАЭС Украины при закачке колеблется от 500 до 1000 МВт.

Объединив ПР в единую систему управления, можно применять их в схемах регулирования частоты и межрегиональных перетоков мощности в энергосистеме. Изменение их нагрузки с применением тиристорных регуляторов мощности происходит за доли секунды. Управлять ПР можно в ручном режиме с диспетчерского пункта энергосистемы и в автоматическом режиме на местном уровне.

Экономическая эффективность электрических сетей определяется не только потерями электрической энергии в сетях и затратами на их обслуживание, но и эффективностью использования установленных электрических мощностей, т.е. от уровня загрузки силовых трансформаторов (Т).

Исходя из требований надежности электроснабжения, начиная от городских электрических сетей и заканчивая районными и магистральными сетями, электрические системы имеют как минимум двойное резервирование. На трансформаторных подстанциях (ТП) и подстанциях системы (ПС) устанавливают по два трансформатора, две системы сборных шин, не менее двух питающих электрических линий. Делается это для того, чтобы после аварии всю нагрузку можно было перевести на один трансформатор или на одну линию электропитания. На большинстве подстанций нагрузка трансформатора изменяется и в течение продолжительного времени остается ниже номинальной. Значительная часть трансформаторов выбирается с учетом послеаварийного режима, и поэтому нормально они остаются недогруженными.

Выборочный анализ загрузки трансформаторов ТП в городских распределительных сетях г. Харькова показал, что коэффициент использования мощностей  $K_{исп}$  ТП не превышает 0,4 в среднем 0,2–0,3, т.е. резерв неиспользуемой мощности с учетом технически допустимой загрузки трансформатора  $S_{доп}$  превышает 50–60 %.

Аналогичный анализ загрузки трансформаторов ТП (6–10 кВ) и ПС (220–110–35 кВ) проведенный компанией ЗАО ПФК «СКАФ» в г. Москва показал – в максимуме загрузка трансформаторов ТП 33–38 %, загрузка трансформаторов ПС 39–44 % [5]. С учетом неравномерности суточного ГЭН, результаты анализа загруженности городских сетей в двух случаях совпадают. В летний период коэффициент использования мощности снижается порядка на 20–30 %.

В результате анализа ЗАО ПФК «СКАФ», принято считать, что в нормальных условиях эксплуатации допустимую нагрузку силовых трансформаторов в действующей электрической сети 220–110–35–10(6) кВ в максимуме можно принять на уровне 50 % от номинальной мощности и считать её обобщённым нормативным показателем нормальной загрузки электрической сети. Этот показатель необходимо вводить для учёта степени использования мощности сети при установлении тарифов на передачу электроэнергии. С учетом этого показателя предлагается вводить повышающий (понижающий) коэффициент  $K_{тар.}$  к тарифам на передачу электроэнергии. При загруженности сети  $K_{исп}=0,5$  принять  $K_{тар.}=1$  и изменять в сторону увеличения до  $K_{тар.}=1,03$  при  $K_{исп}=0,61–0,65$ , в сторону уменьшения до  $K_{тар.}=0,97$  при  $K_{исп}=0,34$  и меньше. Введение к тарифам повышающих (понижающих) коэффициентов будет стимулировать предприятия электросетей к более эффективному и экономичному использованию основных фондов.

Настоящая статья посвящена способу загрузки электрических мощностей городской электросети, которая состоит из множества понижающих трансформаторов, до максимально допустимой величины. При этом допустимая нагрузка определяется но-

минальной мощностью трансформаторов  $S_{T.ном}$ , условиями их эксплуатации, техническим состоянием трансформаторов и электрических сетей.

На рис. 1 представлен график нагрузки трансформатора в течение суток и резерв неиспользованной мощности при  $K_3=0,8$ , когда  $S_{доп} = 320$  кВА.

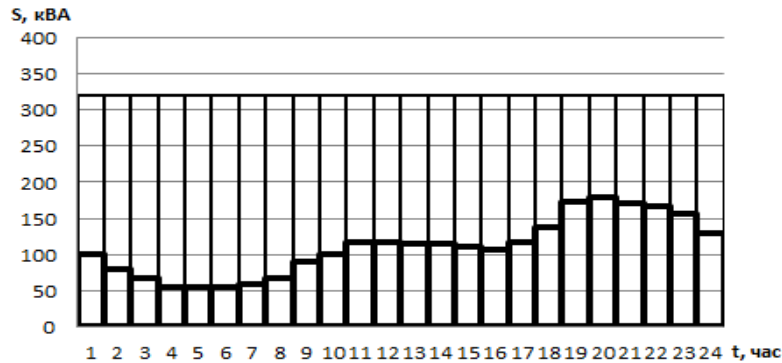


Рисунок 1 – График нагрузки трансформатора городской ТП и резерва его использования

Электрическая нагрузка трансформатора в течение времени меняется от минимальной до максимальной и характеризуется коэффициентом неравномерности. Коэффициент неравномерности графика нагрузки:

$$\alpha = P_{\min} / P_{\max}, \quad (1)$$

где  $P_{\min}$  – минимальное значение потребления за сутки;  $P_{\max}$  – максимальное значение потребления за сутки

В энергосистеме Украины за последние 3 года величина коэффициента неравномерности находилась в пределах 0,68–0,78. В городских электрических сетях величина коэффициента неравномерности колеблется в пределах  $K_n = 0,3–0,5$ .

Для использования резервной мощности трансформатора в соответствии с рис. 1, нагрузка должна быть управляемой, иметь возможность отключения, включения. Перечисленным требованиям может отвечать нагрузка, которая способна аккумулировать электроэнергию во время провала нагрузок, а затем в нужный момент раздавать ее потребителям. Это может быть нагрузка промышленных предприятий, где технологические особенности производства позволяют снижать или увеличивать нагрузку на некоторое время, переносить с одного времени на другое (печи сопротивления, электронагреватели, цементное производство и др.). К такой нагрузке можно отнести электроустановки для нагрева воды в системах горячего водоснабжения с баками – аккумуляторами, где вода в баках нагревается преимущественно в ночное время дешёвой электроэнергией, а затем раздаётся потребителям [2, 3]. Для этого на ТП управляемая нагрузка  $I_{н1}, I_{н2} \dots I_{нN}$  выделяется в отдельную группу. Если это установки для нагрева воды на горячее водоснабжение жилых многоквартирных домов, где имеется резервный кабель, то они могут подключаться к ТП по резервному кабелю.

На рис. 2 представлена схема управления мощностью нагрева воды электроэнергией на горячее водоснабжение многоквартирного дома, состоящей из устройства управления нагрузкой по току трансформатора 1, которая защищена патентом Украины [7], позонного программируемого электросчетчика с управляемой нагрузкой 2, тиристорного регулятора мощности ТРМ 3 и электроводонагревателя 4 установки.

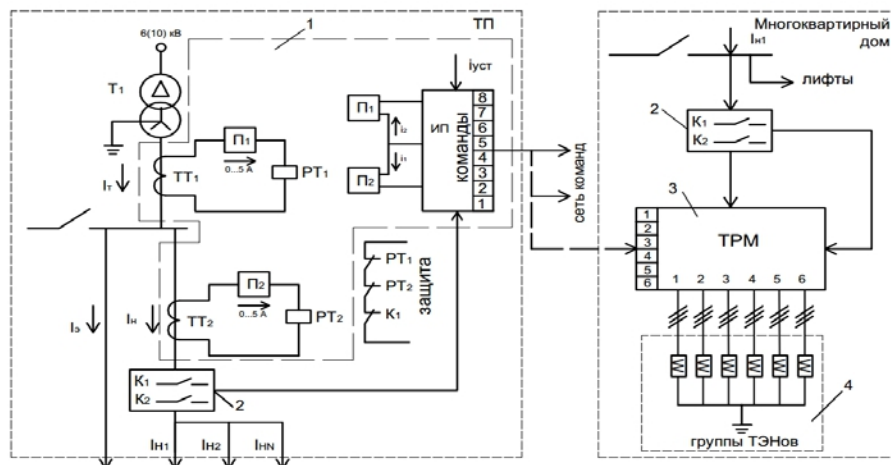


Рисунок 2 – Схема управления мощностью нагрева воды электроэнергией на горячее водоснабжение для многоквартирного дома

Устройство 1 состоит из измерительного преобразователя  $\Pi_1$ , включённого в цепь измерения нагрузки трансформатора, измерительного преобразователя  $\Pi_2$ , включённого в цепь измерения управляемой нагрузки, и измерителя – преобразователя (ИП). Преобразователь  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  предназначены для преобразования переменного тока (0...1) А, (0...5) А в цепи измерительных трансформаторов тока ТТ<sub>1</sub> и ТТ<sub>2</sub> без постоянной составляющей в универсальный стандартный сигнал постоянного тока 0(4)–20 мА, 0–10 мА, 2–10 мА, 0–10 В, 0–5 В или 1–5 В.

Сигналы преобразователя  $\Pi_1$ , пропорционального току нагрузки трансформатора

$$I_T = I_3 + I_N = I_3 + I_{N1} + I_{N2} + I_{NN}; \quad (2)$$

$$i_1 = k_{\Pi 1} k_{T1} I_T = k_{\Pi 1} k_{T1} (I_3 + I_N) \quad (3)$$

и преобразователя  $\Pi_2$ , пропорционального току управляемой нагрузки  $I_N$ ,

$$i_2 = k_{\Pi 2} k_{T2} I_N \quad (4)$$

вычитаются

$$\Delta i = i_1 - i_2 = k_{\Pi 1} k_{T1} (I_3 + I_N) - k_{\Pi 2} k_{T2} I_N, \quad (5)$$

где  $k_{\Pi 1}$ ,  $k_{\Pi 2}$  – коэффициенты преобразования измеряемого тока в выходной сигнал преобразователя  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$ ;  $k_{T1}$ ,  $k_{T2}$  – коэффициенты трансформации измерительного трансформаторов тока ТТ<sub>1</sub>, ТТ<sub>2</sub>.

При равных коэффициентах  $k_{\Pi 1} = k_{\Pi 2} = k_{\Pi}$ ,  $k_{T1} = k_{T2} = k_T$  и  $k = k_{\Pi} k_T$  на вход многоканального измерителя-преобразователя ИП поступает сигнал пропорциональный току электрической нагрузки  $I_3$  трансформатора ТТ<sub>1</sub>.

$$i_{вх} = \Delta i = k_{\Pi} k_T I_3 = k I_3. \quad (6)$$

В измерителе – преобразователе ИП разность уставки  $i_{уст}$ , соответствующей допустимой нагрузке трансформатора  $I_{доп}$ , и входного сигнала  $i_{вх} = k I_3$  преобразуется в дискретные команды управления нагрузкой.

На рис. 3а представлена характеристика 8-ми канального измерителя-преобразователя ИП. На рис. 3б приведен график изменения тока управляемой нагрузки  $I_n$  в соответствии с командой измерителя-преобразователя ИП.

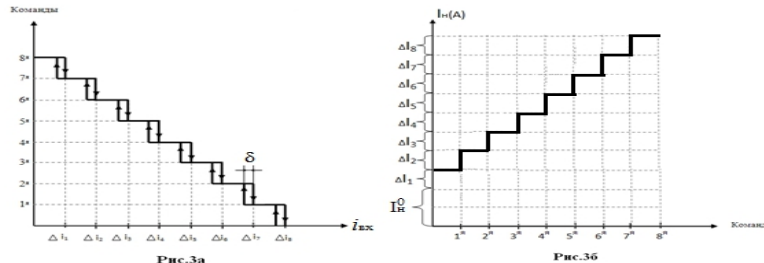


Рисунок 3

а) характеристика 8-ми канального измерителя-преобразователя; б) зависимость изменения тока нагрузки по командам измерителя-преобразователя

Величина ступени  $\Delta i_n$ , изменения тока электрической нагрузки трансформатора  $\Delta i_n = k (I_3^n - I_3^{n-1})$ , величина ступени  $\Delta I_n$ , изменения тока управляемой нагрузки

$$\Delta I_n = I_n^n - I_n^{n-1} \quad (7)$$

команды n, нерегулируемая величина  $I_n^0$  управляемой нагрузки  $I_n$ , величина гистерезиса  $\delta$  характеристики измерителя-преобразователя ИП рассчитываются и устанавливаются в процессе наладки системы.

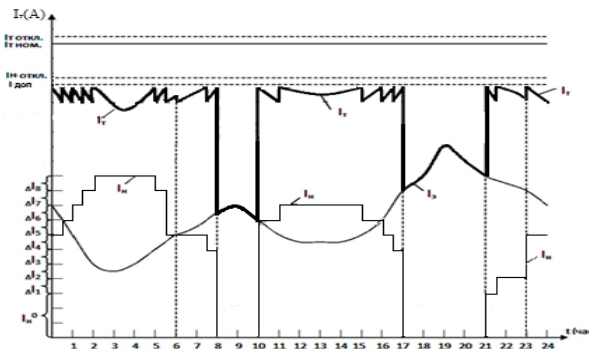


Рисунок 4 – Суммарный график нагрузки трансформатора

На рис. 4, в качестве примера, представлен график загрузки трансформатора  $I_T = I_3 + I_n$  до установленной допустимой нагрузки трансформатора  $I_{доп}$ , где в пиковый период с 8<sup>00</sup> до 10<sup>00</sup> и с 17<sup>00</sup> до 21<sup>00</sup> подача электрической мощности управляемой нагрузке системой запрещена. График изменения тока управляемой нагрузки  $I_n$  является зеркальным отображением графика нагрузки  $I_n = I_{доп} - I_3$ . Допустимый ток  $I_{доп}$  трансформатора Т1 может устанавливаться по зонам: в пиковый период –  $I_{доп}^п$ , в дневное время –  $I_{доп}^д$  и ночной период –  $I_{доп}^н$ .

Программируемый многотарифный электросчетчик 2, установленный на ТП и у потребителя считает потребление электроэнергии в течение суток, недель, года, выдает команду на включение и отключение управляемой нагрузки, устанавливает значение по зонам выбранных установок измерителя-преобразователя ИП.

Схема управления мощностью регулируемой нагрузки предусматривает защиту трансформатора от перегрузок (реле РТ<sub>1</sub>), защиту от превышения разрешённой мощности управляемой нагрузки (реле РТ<sub>2</sub>). Токовое реле РТ<sub>1</sub> срабатывает при достижении тока нагрузки трансформатора до величины  $I_{T \cdot \text{откл}}$ . В первую очередь по времени отключается управляемая нагрузка  $I_n$ . Если это не дало результата, трансформатор отключается от сети. Токовое реле РТ<sub>2</sub> отключает от сети управляемую нагрузку при достижении тока  $I_n$  до величины тока  $I_{n \text{откл}}$  (на рис.2 схема защиты не показана).

В зависимости от поступившей команды на вход тиристорного регулятора мощности ТРМ 3, последний управляет мощностью нагрева электронагревателя 4 установки.

Способ передачи команд от ТП до потребителей осуществляется: по проводной связи, по силовому кабелю, по телефонной, мобильной связи и радиосвязи. Количество выбранных команд из сети, зависит от количества входов и выходов ТРМ. В данной схеме рис. 2 использовано шесть команд.

ТРМ 3 представляет многоканальный с синхронизацией регулятор мощности. Принцип работы регулятора мощности с управлением методом пропуска числа периодов синусоиды представлен в таблице 1 и таблице 2, круговой диаграммой рис. 5а, графиками рис. 5б и таблицей 3. Метод пропуска числа периодов синусоиды – тиристоры включены и выключены в течение некоторого целого числа периодов.

Трубчатые электронагреватели ТЭНы 4 собираются в группы с равной трехфазной нагрузкой. На схеме нагреватели установки общей мощностью  $P_y=120$  кВт разбиты на 6 групп мощностью  $P_{гр}=20$  кВт (см. табл. 1). Выше представлена работа ТРМ при поступлении команды 4, и команды 6, где единицам соответствует число открытых периодов, нулям закрытых. Переход от открытых периодов к закрытым периодам происходит в момент прохождения синусоиды через ноль.

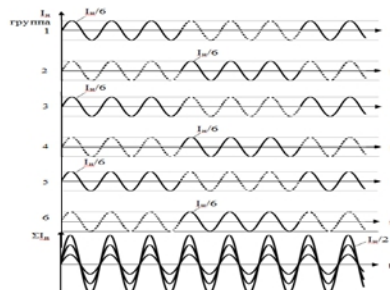
Таблица 1

Команда	Мощность, кВт	Период	
		Откр.	Закр.
1	120	6	0
2	100	5	1
3	80	4	2
4	60	3	3
5	40	2	4
6	20	1	5

Группы	Команда 4	Команда 6
1	11000111000111000	100000100000100000
2	000111000111000111	010000010000010000
3	111000111000111000	001000001000001000
4	000111000111000111	000100000100000100
5	111000111000111000	000010000010000010
6	000111000111000111	000001000001000001
Откр	333333333333333333	111111111111111111



а)



б)

Рисунок 5 – Принцип работы регулятора мощности с управлением методом пропуска числа периодов синусоиды а) круговая диаграмма, б) график числа периодов в работе



Переход от одной группы нагрузки к следующей происходит по кругу как показано на диаграмме рис. 5а. На рис. 5б показан ток в каждой группе и суммарный ток нагрузки за один цикл круговой диаграммы при поступлении команды 4. Ток нагрузки равен суммарному току включённых тиристоров по группам

$$I_n = I_{Гр1} + I_{Гр3} + I_{Гр5} = I_{max}/6 + I_{max}/6 + I_{max}/6 = I_{max}/2. \quad (8)$$

Для второй половины графика

$$I_n = I_{Гр2} + I_{Гр4} + I_{Гр6} = I_{max}/6 + I_{max}/6 + I_{max}/6 = I_{max}/2. \quad (9)$$

В таблице 2 представлена работа ТРМ при команде на включение и отключении при 100 % мощности нагрузки раной  $P_n = 120$  кВт.

Таблица 2

Группа	Команда «Включить»	Команда «Отключить»
1	11111111111111111111111111111111	11111000000000000000000000000000
2	00000011111111111111111111111111	11111111111000000000000000000000
3	00000000000111111111111111111111	11111111111111110000000000000000
4	0000000000000000000011111111111111	11111111111111111111000000000000
5	000000000000000000000000001111111111	11111111111111111111111100000000
6	000000000000000000000000000000111111	1111111111111111111111111111000000
Откр.	1111112222233333444445555566666	666665555544444333332222211111000000

Внизу таблицы 2 показано число одновременно открытых периодов синусоиды по всем группам.

Применение тиристорного многоканального регулятора мощности позволяет практически плавно управлять мощностью нагрева, плавно подключаться и отключаться от электрической сети. Предложенный способ управления мощностью потребителей не окажет отрицательного влияния на питающую электросеть.

Преимущества метода пропусками:

- не вносятся импульсные помехи в сеть. Поскольку включение тиристоров происходит в момент перехода сетевого напряжения через ноль, ток в нагрузке нарастает плавно, не вызывая электромагнитных помех;
- не вносятся в сеть нелинейные искажения, поскольку нагрузка питается синусоидальным напряжением;
- нет потребления реактивного тока при чисто активной нагрузке.

Перечисленные преимущества является одним из основных требований электросети к таким потребителям.

На рис. 6 а) представлена система управления мощностью нагрева установки воды на горячее водоснабжения по току потребления электроэнергии на электробытовые нужды многоквартирного дома запитанного по двум кабельным линиям. Установка электрического нагрева воды подключается к резервному кабелю. На вход измерителя – преобразователя ИП поступает сигнал пропорциональный току электрической нагрузки дома  $i_{вх} = k I_3$ .

На рис. 6б представлена система управления мощностью нагрева установки воды на горячее водоснабжение многоквартирного дома, запитанного одной кабельной линией. На вход измерителя – преобразователя ИП поступает разность токов  $i_{вх} = \Delta i = k(I_d - I_n) = kI_3$ .

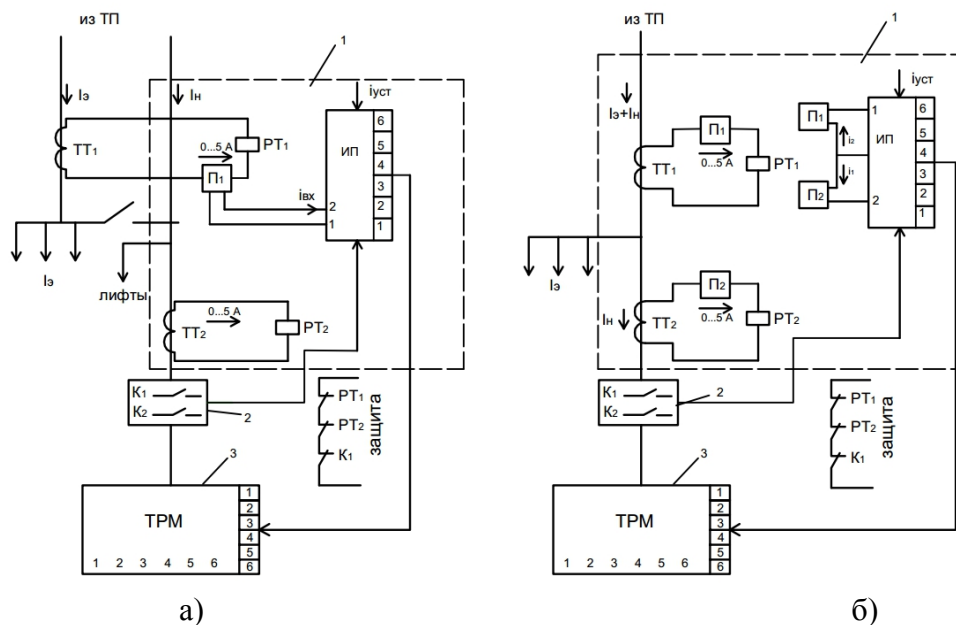


Рисунок 6 – Система управления мощностью нагрева воды

Установка измерителя-преобразователя ИП в схемах соответствует разрешённой нагрузке дома  $i_{уст} = k I_{д.раз}$ . Системы управления мощностью регулируемой нагрузки, представленные на рис.6, работают аналогично системе, представленной на рис. 2.

На рис. 7 показана упрощённая схема регулирования температуры воды на выходе электробойлера. Сигнал с датчика температуры ТС, установленного на трубопроводе горячей воды (Т.Г.В.) на выходе электробойлера, поступает на вход регулятора температуры РТ, который управляет исполнительным механизмом ИМ регулирующего клапана РК. При изменении температуры воды на выходе электробойлера, регулятор РТ изменяет расход холодной воды поступающей в электробойлер из трубопровода холодной воды (Т.Х.В.). При изменении мощности ТЭНов тиристорным регулятором мощности ТРМ, исполнительный механизм переводит регулирующий клапан в другую точку рабочей характеристики.

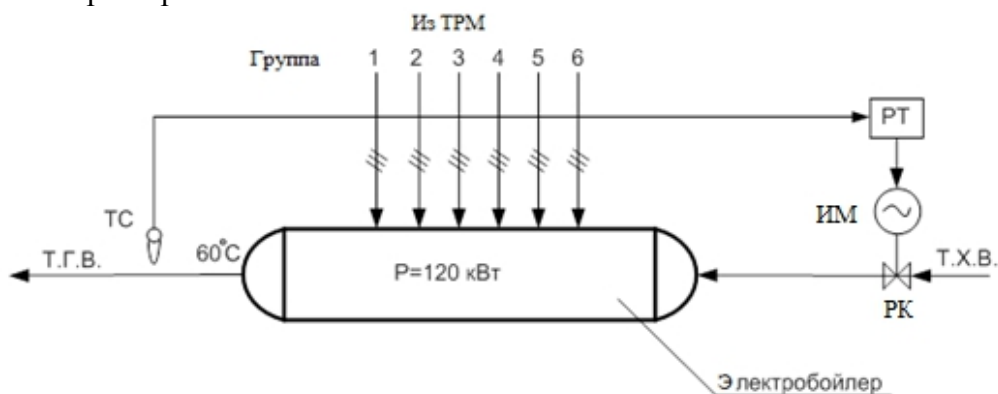


Рисунок 7 – Схема регулирования температуры воды на выходе электробойлера

В настоящее время многие города и посёлки отключили систему централизованного горячего водоснабжения и перешли на нагрев воды в квартирных электробойлерах. Так как пиковое потребление воды горячего водоснабжения практически совпадает

по времени с пиковый нагрузкой в электрических сетях, то это привело к перегрузке внутримодовой электрической сети, кабельных линий, трансформаторных подстанций.

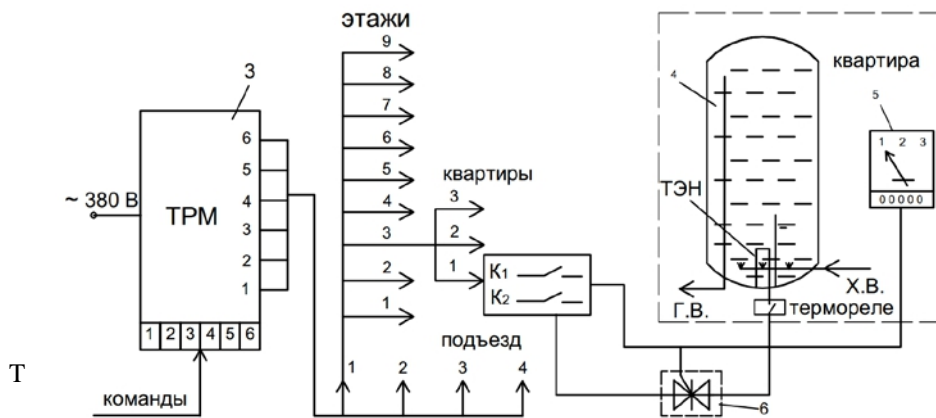


Рисунок 8 – Схема управления мощностью электроннагревателей квартирных электробойлеров

Предложенная на рис. 8 схема управления мощностью квартирных электробойлеров позволит избежать перечисленных проблем, уменьшить потребление электроэнергии в пиковый период и перенести нагрев воды в ночное время дешёвой электроэнергией. Для этого квартирные электробойлера получают питание в доме от отдельной сети, формируются в группы равные по мощности и подключаются к тиристорному регулятору мощности ТРМ. Электробойлер 4 через коммутирующее устройство 6 подключаются к программному трёхзонному или двухзонному однофазному электросчетчику 2 с управляемой нагрузкой. Электросчетчики и коммутирующие устройства могут размещаться на лестничной площадке или на первом этаже подъезда. В квартиру, где установлен электробойлер, устанавливается выносной пульт 5 управления режимами нагрева электробойлера 4.

Мощностью нагрева электробойлеров управляют аналогично установке, представленной на рис. 2.

По решению потребителя с помощью пульта электробойлер может переключаться в один из трех или двух режимов, из которых один «Эконом». В этом режиме вода нагревается в ночной период дешевой электроэнергией. Второй режим допускает включение электробойлера в ночной и полупиковый период и запрещает включение в пиковый период. Третий режим – режим обычного квартирного электробойлера, только с той разницей, что мощность нагрева управляется, а стоимость электроэнергии зависит от времени включения электробойлера. Дешевая электроэнергия в ночной период будет стимулировать потребителя переключать электробойлер в «Эконом» режим.

При неравномерном распределении нагрузки по группам, связанным с включением или отключением регуляторами температуры электробойлера, возможно появление субгармонической составляющей тока, т.е. составляющие частот не кратных сетевой (50 Гц).

Влияние субгармонических составляющих на электрическую сеть исследовано недостаточно. Не существует также эффективных методов учета субгармонических составляющих. Считается, что негативное влияние субгармонической составляющей в сравнении с высшими гармоническими составляющими выражено слабее, однако и в этом случае имеет место существенное ухудшение характеристик электропотребителя и его влияния на электрическую сеть. Наличие субгармонических составляющих, частот ниже сетевой частоты может привести к колебаниям напряжения. В большинстве

случаев субгармонические колебания можно рассматривать как периодические изменения нагрузки. Эффективные средства фильтрации субгармонических составляющих низкой частоты до настоящего времени не разработаны [6].

В последнее время электроснабжающие организации всё чаще устанавливают у потребителя приборы ограничения мощности ПЗР. В том числе это относится и к многоквартирным домам, где ПЗР устанавливается как на вводе дома, так и по квартирам. Функции этих ограничителей могут быть самые разнообразные. Основная функция, которая присуща всем ПЗР – ограничить потребление мощности свыше расчётной. С технической стороны ограничение мощности не позволяет выйти за пределы допустимой нагрузки трансформатора или кабельной линии, от которой они запитаны. Однако отключение потребителей превысивших расчётную величину тогда, когда в этом нет необходимости, снижает экономическую эффективность электросети, создаёт не оправданные неудобства для потребителя. Для того чтобы избежать подобных ситуаций, необходимо управлять ПЗР. Когда нагрузка трансформатора или кабельной линии, от которого они запитаны, не превышает допустимой нагрузки, ПЗР не должен отключать потребителя от сети.

На рис. 9 представлена схема управления ПЗР по допустимой нагрузке трансформатора ТП и кабельной линии питания многоквартирного дома.

Квартирные ПЗР подключены к управляющему устройству УУ<sub>2</sub> дома, а по линии связи к управляющему устройству УУ<sub>1</sub> трансформатора ТП. При превышении потребителем расчётной нагрузки, ПЗР отключит его от сети только в том случае, если поступит команда с управляющего устройства УУ<sub>1</sub> или УУ<sub>2</sub>, т.е. тогда когда будет превышена допустимая нагрузка трансформатора и сработает токовое реле РТ<sub>1</sub> или реле РТ<sub>2</sub>, настроенного на максимальную допустимую пропускную способность кабельной линии питания дома.

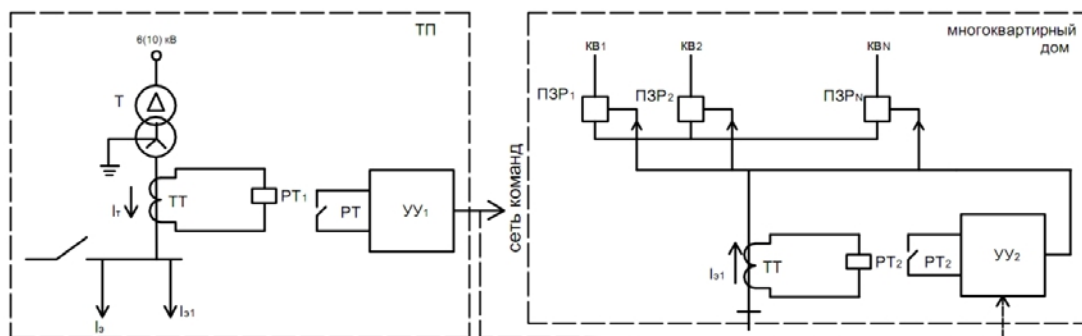


Рисунок 9 – Схема управления ПЗР многоквартирного дома по допустимой нагрузке трансформатора на ТП

Устройство управления УУ<sub>2</sub> определяет очередность срабатывания ограничителей мощности ПЗР потребителей, превысивших разрешённую мощность, и хранит их в памяти. При поступлении команды на отключение со стороны управляющего устройства УУ<sub>2</sub> или УУ<sub>1</sub>, ПЗР начнёт отключать потребителей первыми по очереди до того момента, пока не уменьшится нагрузка ниже установленных допустимых величин.

Приведенные примеры управления мощностью нагрузки потребителей в электрических сетях, показывают возможность активного влияния потребителей на работу электрической сети. По сути, выше изложенное относится к интеллектуальным сетям (Smart grid), за которыми будущее развития электроэнергетики.

**Выводы.** Привлечение потребителей – регуляторов, выполненных в виде преобразователей электрической энергии в тепловую энергию, обеспечит работу энергоблоков электростанций в условиях равномерной наиболее эффективной мощности.

Способ управления процессами отпуска электрической энергии с возможностью регулирования мощности потребления, позволит повысить экономичность передачи и распределения электроэнергии, отказаться от избыточных инвестиционных проектов, обеспечить экономию инвестиционных ресурсов.

#### Литература

1. Гуртовцев А., Забелло Е. Выравнивание графика электрической нагрузки энергосистемы [Электронный ресурс]: – Режим доступа: [http://www.energetika.by/arch/~page\\_m21=10~news\\_m21=169](http://www.energetika.by/arch/~page_m21=10~news_m21=169).
2. Колотило И.Д. От газа к электроэнергии [Текст] / И.Д. Колотило // Житлово-комунальне господарство України. – 2009. – №4. – С. 20–22.
3. Колотило И.Д. Электроэнергия – альтернатива газу [Текст] / И.Д. Колотило // Житлово-комунальне господарство України. – 2010. – №7. – С. 24–27.
4. Маляренко В.А., Щербак И.Е., Колотило И.Д. Электрическая энергия как источник диверсификации топлива в системах горячего водоснабжения ЖКХ [Текст] / В.А. Маляренко, И.Е. Щербак, И.Д. Колотило // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2013. – №5. – С. 19–23.
5. Овсейчук В. Тарифы на электроэнергию. Учет степени использования мощности электрической сети [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2009/58/04.php>.
6. Погребинский М.Я. Разработка способов и систем регулирования температуры электропечей сопротивления с улучшенными энергетическими показателями [Текст].
7. Спосіб регулювання навантаження трансформатора в мережевих трансформаторних підстанціях: пат. 75207 Україна: МПК51 Н 02 J 3/14, Н 02 J 3/28/ В.А. Маляренко, І.Д. Колотило, І.Є. Щербак; заявник і патентовласник Харківська національна академія міського господарства. – № у 2012 05527; заявка 07.05.2012; публікація 26.11.2012, Бюл. №22. – 4 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Gurtovtsev A., Zabello E. Vyiravnivanie grafika elektricheskoy nagruzki energosistemyi [Elektronnyiy resurs]: – Rezhim dostupa: [http://www.energetika.by/arch/~page\\_m21=10~news\\_m21=169](http://www.energetika.by/arch/~page_m21=10~news_m21=169).
2. Kolotilo I.D. Ot gaza k elektroenergii [Tekst] I.D. Kolotilo Zhitlovo-komunalne gospodarstvo Ukrayini. – 2009. – #4. – P. 20–22.
3. Kolotilo I.D. Elektroenergiya – alternativa gazu [Tekst] I.D. Kolotilo Zhitlovo-komunalne gospodarstvo Ukrayini. – 2010. – #7. – P. 24–27.
4. Malyarenko V.A., Scherbak I.E., Kolotilo I.D. Elektricheskaya energiya kak istochnik diversifikatsii topliva v sistemah goryachego vodosnabzheniya ZhKH [Tekst] V.A. Malyarenko, I.E. Scherbak, I.D. Kolotilo Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit. 2013. – #5. – P. 19–23.

5. Ovseychuk V. Tarifyi na elektroenergiyu. Uchet stepeni ispolzovaniya moschnosti elektricheskoy seti [Elektronnyy resurs]: – Rezhim dostupa: <http://www.news.elteh.ru/arh/2009/58/04.php>.

6. Pogrebinskiy M.Ya. Razrabotka sposobov i sistem regulirovaniya temperatury i elektrophechey soprotivleniya s uluchshennyimi energeticheskimi pokazatelyami [Tekst].

7. Sposib reguluyannya navantazhennya transformatora v merezhevih transformatornih pidstantsiyah: pat. 75207 UkraYina: MPK51 H 02 J 3/14, H 02 J 3/28/ V.A. Malyarenko, I.D. Kolotilo, I.E. Scherbak; zayavnik i patentovlasnik Harkivska natsionalna akademiya miskogo gospodarstva. – # u 2012 05527; zayavka 07.05.2012; publikatsiya 26.11.2012, Vyul. #22. – 4 p.

УДК 621.311

Маляренко В.А., Колотило І.Д., Щербак І.Є.

### **СПОЖИВАЧІ-РЕГУЛЯТОРИ ЯК ЕФЕКТИВНИЙ НАПРЯМОК РЕГУЛЮВАННЯ ГРАФІКА НАВАНТАЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ**

У статті розглянуто вирівнювання графіку електричного навантаження за допомогою споживачів-регуляторів. Запропоновано потужністю споживачів-регуляторів керувати тиристорним регулятором потужності з урахуванням завантаження трансформаторної підстанції. В якості споживачів-регуляторів використовуються установки нагріву води на гаряче водопостачання.

Malyarenko V.A., Kolotilo I.D., Shcherbak I.E.

### **CONSUMERS REGULATOR AS EFFECTIVE DIRECTION OF REGULATION OF LOAD CURVE OF ELECTRICAL NETWORKS**

The article deals with the smoothing of curve of electric load by using consumer-regulators. It was suggested to control a power consumer regulators by thyristor power controller with due regard for loading transformer substation. The installations of heating water for hot water-works are used as consumer-regulators.

УДК 621.184.4

Шевелев А.А., Тарасенко А.Н., Павлова В.Г., Барвинок В.С., Павлюченко А.М.

### МЕТОД ЧИСЛЕННОГО АНАЛИЗА ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ МЕМБРАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА

**Введение.** В настоящее время в котлостроении достаточно широкое использование получили мембранные конвективные поверхности нагрева (рис 1). По своим массогабаритным показателям, стойкости к загрязнениям и низкотемпературной коррозии, а так же золовому износу эти поверхности не уступают и даже превосходят гладкотрубные [1]

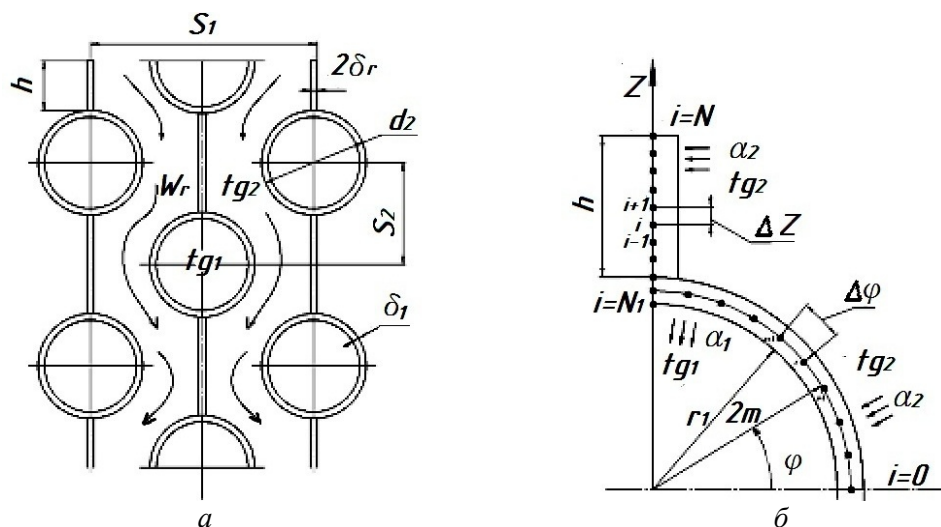


Рисунок 1 – Схема мембранных труб

а) форма матрицы мембранной поверхности нагрева; б) к разработке ММ

Однако полное использование достоинств мембранных поверхностей ограничено отсутствием надежных методик определения их теплового состояния. Существующие методики, основаны на классической теории теплопроводности ребристых поверхностей, которые не позволяют рассматривать мембранные трубы как составную область решения. [2, 3]. В литературе [4,5] указывается, что в настоящее время параметрический анализ ребристых поверхностей следует проводить на основе численного моделирования, которое позволяет полно раскрыть температурное состояние ребренной поверхности, выполнить многовариантные исследования и таким образом для конкретных условий определить оптимальные характеристики данной поверхности.

**Математическая модель задачи.** В теплообменной матрице из мембранных труб (рис. 1) имеются симметричные одинаковые элементы. Наличие этих особенностей позволяет при рассмотрении теплопередачи между теплоносителями ограничить область решения одной четвертой частью поперечного сечения трубы, которая показана на рис. 1, 2. При математическом моделировании будем полагать, что между трубой и ребрами (проставками) имеется абсолютный тепловой контакт, стенки проставки и трубы представляют собой тонкие тела, т.е. изменение температуры имеет место только вдоль высоты ребра  $h$  и в тангенциальном направлении трубы. При такой постановке

математическая модель (ММ) теплового состояния мембранной трубы может быть описана двумя связанными дифференциальными уравнениями теплопроводности для трубы и ребра и граничными условиями:

для трубы

$$\frac{d^2 t}{ds^2} + \frac{\alpha_1}{\lambda \delta_1} \varphi_1 (t_{g1} - t) + \frac{\alpha_2}{\lambda \delta_1} \varphi_2 (t_{g2} - t) = 0, \quad (1)$$

где  $ds = r_m \cdot d\varphi$ ,  $\varphi_1 = \frac{r_1}{r_m}$ ,  $\varphi_2 = \frac{r_2}{r_m}$ ;  $r_m = 0,5(r_1 + r_2)$ ;

для ребра

$$\frac{d^2 T}{dz^2} + \frac{\alpha_2}{\lambda \delta_2} (t_{g2} - T) = 0; \quad (2)$$

граничные условия

$$\varphi = 0: -\lambda \frac{dt}{ds} = 0; \quad (3)$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2}: \frac{dt}{ds} = 0, t = T; \quad (4)$$

$$z = h: -\lambda \frac{dT}{dz} = 0; \quad (5)$$

$$z = 0: T = t. \quad (6)$$

Условия (4) и (6) являются условиями сопряжения.

**Алгоритм решения.** Математическая модель представляет собой связанную задачу из двух дифференциальных уравнений теплопроводности (1) и (2), аналитическое решение такой задачи следует считать сложным [2]. Поэтому был выбран более эффективный метод решения – численный. Для разработки численного метода дифференциальные уравнения ММ и граничные условия аппроксимировались сеточными уравнениями [6]:

для трубы

$$\frac{t_{i-1} - 2t_i + t_{i+1}}{\Delta S^2} + \frac{\alpha_1 \varphi_1}{\lambda \delta_1} (t_{g1} - t_i) + \frac{\alpha_2 \varphi_2}{\lambda \delta_1} (t_{g2} - t_i) = 0, \quad (7)$$

$$1 \leq i \leq N_1 - 1,$$

где  $\Delta S = \pi \cdot r_m / (2 \cdot N_1)$ ,  $N_1$  – число узлов в кольцевой части области решения;

для ребра

$$\frac{T_{i-1} - 2T_i + T_{i+1}}{\Delta z^2} + \frac{\alpha_2}{\lambda \delta_2} (t_{g2} - T_i) = 0, \quad (8)$$

$$N_1 + 1 \leq i \leq N - 1,$$

где  $\Delta z = h / (N - N_1)$ .

Сеточные уравнения для граничных условий и условий сопряжения здесь не приводятся, т.к. они не имеют особенностей.

Коэффициенты теплоотдачи определялись по соотношениям [1].



$$Nu = 0,15 \cdot (s'_2 / d_2)^{-0.4} Re^{0.7}, \quad (9)$$

где  $Nu = \frac{\alpha_2 d_2}{\lambda_r}$  – число Нуссельта,  $Re = \frac{W_r d_2}{\nu_r}$  – число Рейнольдса,  $s'_2$  – диагональный шаг.

Анализ системы сеточных уравнений (7) и (8) позволил выбрать метод прямой прогонки [6], модифицированный с учетом условий сопряжения (4) и (6) рассматриваемой задачи. Алгоритм решения был разработан на основании двух рекуррентных формул:

для трубы

$$\begin{aligned} t_i &= A_i t_{i+1} + B_i, \\ 1 \leq i \leq N_1; \end{aligned} \quad (10)$$

для ребра

$$\begin{aligned} T_i &= A_i T_{i+1} + B_i, \\ N_1 + 1 \leq i \leq N. \end{aligned} \quad (11)$$

Прогоночные коэффициенты  $A_i$  и  $B_i$  определяются с учетом особенностей задачи по методике [5].

**Результаты численного эксперимента.** Математическая модель и разработанный алгоритм были использованы для анализа теплового состояния мембранных труб водяного экономайзера котлов – утилизаторов серии КУ – 40 ... 100. Программа включала главную процедуру, подпрограммы – функции для расчета коэффициентов теплообмена и подпрограмму для определения распределения температуры в расчетном элементе.

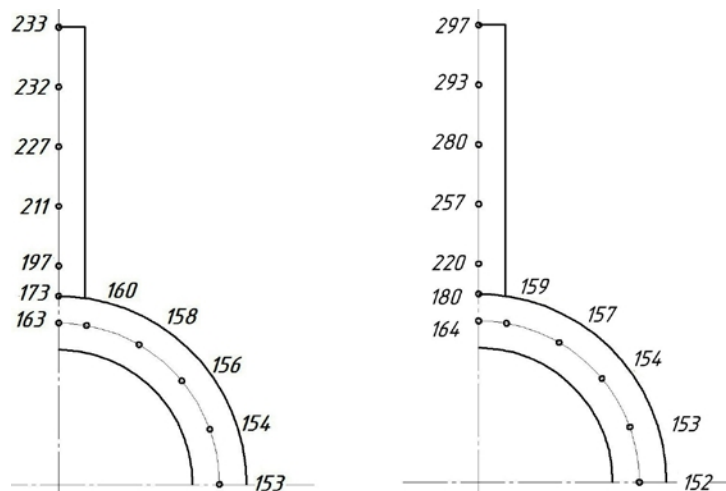


Рисунок 2 – Распределение температуры в элементе  
а) –  $h = 30 \cdot 10^{-3}$  м; б) –  $h = 60 \cdot 10^{-3}$  м

Основные геометрические размеры модульной трубы: наружный диаметр  $d_2 = 32 \cdot 10^{-3}$  м, внутренний диаметр  $d_1 = 26 \cdot 10^{-3}$  м, высота ребра  $h = (30 \div 60) \cdot 10^{-3}$  м, толщина ребра  $\delta_2 = 30 \cdot 10^{-3}$  м, поперечный шаг  $S_1 = 2,13 \cdot d_2$ , продольный шаг  $S_2 = 0,5(d_2 + 2h)$ , трубы и ребра выполнены из материала – сталь 20. Тип формы пучка – шахматный. Греющая среда – дымовые газы с температурой  $t_r = 350$  °С и скоростью  $W_r = 10$  м/с. Нагреваемая среда – вода с температурой  $t_{жс} = 150$  °С, скоростью  $W_1 = 0,6$  м/с.

На рис. 2 приведено распределение температуры (с точностью 1 °С) в элементе для мембранной поверхности  $h = 30 \cdot 10^{-3}$  м и  $h = 60 \cdot 10^{-3}$  м. Полученное распределение температуры по высоте ребра полностью согласуется с условиями теплопередачи и геометрией расчетного элемента.

В таблице 1 приводятся основные показатели мембранных и гладких труб в зависимости от высоты ребра.

Таблица 1 – Тепловые показатели мембранных труб в зависимости от  $h$

$h$	$E$	$Q_l$	$Q_p$	$Q_v$	$Q_m$	$\Delta l$	$\delta m$
$10^3$ м		кВт/м	кВт/м	кВт/м <sup>3</sup>	кВт/кг	%	%
0	–	1,802	–	435	0,845	0	0
30	0,732	2,612	1,283	631	0,739	31,0	13,2
40	0,631	2,680	1,410	531	0,669	32,8	26,4
50	0,559	2,686	1,467	452	0,601	33,0	35,3
60	0,497	2,659	1,488	388	0,538	32,0	52

Из таблицы следует, что теплосъем с единицы длины труб  $Q_l$  возрастает до величины  $h = 50 \cdot 10^{-3}$  м, теплосъем с единицы объема занятой поверхности  $Q_v$  изменяется в отношении близком к изменению тепловой эффективности ребра  $E$ , причем, для  $h = 60 \cdot 10^{-3}$  м значение  $Q_v$  уже существенно меньше, чем для гладких труб; с увеличением  $h$  удельный теплосъем с единицы массы труб  $Q_m$  уменьшается и максимальное его значение относится к гладким трубам; с увеличением  $h$  резко сокращается доля теплосъема с поверхности ребра  $Q_p$ .

Одно из главных достоинств мембранных поверхностей является сокращение длины труб в сравнении с увеличением их массы. Данные по этим показателям приводятся в таблице в относительных величинах  $\Delta l$  и  $\delta m$ . Из таблицы следует, что для условий проведенных исследований эффективность мембранных труб по этим показателям наблюдается при  $h < 50 \cdot 10^{-3}$  м.

**Выводы.** Разработан метод численного анализа теплового состояния мембранных поверхностей на основе математической модели, которая в отличие от аналитической теории теплопроводности не накладывает ограничений на условие сопряжения дифференциальных уравнений, описывающих теплопроводность в цилиндрической и ребристой части поверхности нагрева.

Численный алгоритм метода разработан на основе модификации метода прямой прогонки с учетом условия сопряжения в месте контакта проставки с основной поверхностью.

Выполнены численные исследования для модульной трубы водяного экономайзера котлов – утилизаторов серии КУ – 40...100. Результаты расчета показали, что эффективность мембранных поверхностей ограничена условиями, при которых относительное сокращение длины труб превосходит увеличение их массы, в рассматриваемом случае высотой ребра  $h < 50 \cdot 10^{-3}$  м.

**Обозначения:**  $t, T$  – температура;  $h$  – высота ребра;  $r$  – радиус,  $\varphi$  – угловая координата;  $S$  – окружная координата;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;  $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи;  $E$  – эффективность ребра;  $Q_l$  – теплосъем с 1 м мембранных труб;  $Q_p$  – теплосъем с ребристой поверхности труб;  $Q_v$  – теплосъем с 1 м<sup>3</sup> занимаемого поверхностью;  $Q_m$  – теплосъем с 1 кг массы поверхности нагрева;  $\Delta l$  – относительное сокращение длины труб мембранной поверхности;  $\delta m$  – относительное увеличение массы поверхности нагрева;  $N, N_l$  – число узлов разностной сетки;  $i, 1, 2$  – индексы.

#### Литература

1. Левченко Г.И. Оребренные поверхности нагрева паровых котлов / Г.И. Левченко, И.Д. Лисейкин, А.М. Копелиович, В.К. Мигай. М. Энергоатомиздат. 1986.–168 с.
2. Шнейдер П. Инженерные проблемы теплопроводности / П. Шнейдер М.: Изд-во И. Л. 1960. – 479 с.
3. Исаченко В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Сукомел, А.С. Осипова.– М. Энергия. 1975.– 488 с.
4. Филиппов Э.Б. Метод численного исследования тепловой эффективности трубчатой поверхности нагрева с поперечно-лепестковым оребрением / Э.Б.Филиппов, Г.Б. Черепенников, Т.Г. Лещенко, Теплоэнергетика. №6,2006.с, 36–39.
5. I.V. Galushchak, V.Ya. Gorbatenko and A.A. Shevelev. A Method for Numerically Simulating the Thermal State of a Tube with Punched Helical Tape finning. Thermal Engineering. Vol 58. №5. 2011. P. 435–438.
6. Самарский Д.А. Методы решения сеточных уравнений / А.А. Самарский, Е.С. Николаев.– М.:Наука.–1978.–592 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Levchenko G.I. Orebrennyie poverhnosti nagreva parovyih kotlov G.I. Levchenko, I.D. Liseykin, A.M. Kopeliovich, V.K. Migay. M. Energoatomizdat. 1986.–168 p.
2. Shneyder P. Inzhenernyie problemyi teploprovodnosti P. Shneyder M.: Izd-vo I. L. 1960. – 479 p.
3. Isachenko V.P. Teploperedacha V.P. Isachenko, V.A. Sukomel, A.S. Osipova.– M. Energiya. 1975.– 488 p.
4. Filippov E.B. Metod chislennogo issledovaniya teplovoy effektivnosti trubchatoy poverhnosti nagreva s poperechno-lepestkovyim orebreniem E.B.Filippov, G.B. Cherepennikov, T.G. Leschenko, Teploenergetika. #6,2006. p. 36–39.

5. I.V. Galushchak, V.Ya. Gorbatenko and A.A. Shevelev. A Method for Numerically Simulating the Thermal State of a Tube with Punched Helical Tape finning. Thermal Engineering. Vol 58. #5. 2011. P. 435–438.

6. Samarskiy D.A. Metodyi resheniya setochnyih uravneniy A.A. Samarskiy, E.S. Nikolaev.– М.:Nauka.–1978.–592 p.

УДК 621.184.54

Шевелев О.О., Тарасенко О.М., Павлова В.Г., Барвінок В.С., Павлюченко О.М.

### **МЕТОД ЧИСЕЛЬНОГО АНАЛІЗУ ТЕПЛООВОГО СТАНУ МЕМБРАННИХ ПОВЕРХОНЬ НАГРІВУ**

Запропоновано метод чисельного визначення теплопередачі мембранних поверхонь стосовно до водяних економайзерів котлів-утилізаторів серії КУ 40...100. Алгоритм чисельного розрахунку розроблений для математичної моделі складається з двох взаємопов'язаних диференціальних рівнянь теплопровідності для ребра і циліндричної частини мембранних труб. Отримані результати чисельних досліджень, що дозволяють визначити ефективність застосування мембранних поверхонь для водяних економайзерів.

Shevelev A.A., Tarasenko A.N., Pavlova V.G., Barvinok, V.S., Pavlyuchenko A.M.

### **A METHOD OF NUMERICAL ANALYSIS OF THERMAL STATE OF THE MEMBRANE SURFACES OF HEATING**

Proposed the method of numerical calculation of heat transfer membrane surfaces with respect to water economizer boilers KU series 40...100. The algorithm is developed for numerical calculation of the mathematical model consisting of two paired differential equations of heat conduction for the ribs and the cylindrical part of the membrane tubes. The results of numerical studies can determine the effectiveness of the use of membrane surfaces for water economizers.

УДК 622.691.4

Топоров В.Г., Шеїна З.В., Скрильник К.Ю., Сафта А.В.

### ІМОВІРНІСТЬ ПЕРЕРОЗПОДІЛУ МАС РІДИНИ В ПОРОЖНИНІ ТРУБОПРОВОДУ

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Моніторинг гідравлічного стану потенційно-небезпечних ділянок після точок підключення газових промислів з метою запобігання аварійним відмовам обладнання внаслідок залпового викиду рідини з порожнини газопроводу та припинення подачі газу споживачам через утворення гідратних пробок слід проводити в такі періоди року:

- під час підготовки до зимового періоду експлуатації магістрального газопроводу, зростання обсягів подачі газу попутним споживачам;
- в зимово-весняний період експлуатації, як найбільш сприятливий для конденсації рідини з газового потоку під час його транспортування;
- під час будь-якої зміни режиму роботи газопроводу, викликаній підключенням нових родовищ, зміни робочого експлуатаційного тиску, перерозподілу потоків газу в системі газопроводів, аварійних відмов обладнання на промислах тощо.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Причиною таких жорстких термінів є погіршення якості газу, зумовлене недосконалою очисткою газу на промислах, незадовільною роботою сепараційного обладнання (механічне винесення рідини), конденсаціїм рідини з газового потоку під впливом сприятливих термодинамічних та швидкісних умов експлуатації газопроводу. Діючий ГОСТ 5542 [1] не регламентує ні вплив цих умов на формування мас рідини на ділянках газопроводу, ні якість газу на вході в газорозподільну станцію (ГРС). Перерозподіл мас рідини ділянками газопроводу внаслідок досягнення величини критичного об'єму забруднень на одній з них або зміни режиму експлуатації газопроводу призводять до залпових викидів рідини з порожнини газопроводу до технологічного обладнання ГРС, компресорної станції (КС), спонукають аварійні відмови обладнання, забруднення навколишнього середовища, припинення подачі газу споживачам [2].

**Формулювання цілі статті.** В практиці експлуатації газозбірної та газотранспортної систем з питань залпових викидів рідини щорічно зустрічаються як оперативні, так і диспетчерські служби. За мету цієї розробки ставиться виявлення ознак майбутнього залпового викиду рідини, можливість запобігання утворенню цього явища.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** Функція критичного кут  $\varphi_{кр}$  (рад.), що відповідає умові залпового викиду рідини з коліна газопроводу

$$\Phi_1(\varphi_{кр}) = \frac{2\beta \cdot \frac{2\pi^2 \omega^2 \gamma_z}{Dg}}{\Delta\gamma \cdot \cos \alpha} = \frac{4\pi^2 \beta \omega^2 P}{zRTDg \cos \alpha \left( \gamma_p - \frac{P}{zRT} \right)}, \quad (1)$$

де  $\beta = 1,045-1,1$  – коефіцієнт Кориоліса;  $\omega$  – лінійна швидкість газу, м/с;  $P$  – середній тиск газу на ділянці газопроводу, Па;  $z$  – коефіцієнт стисливості газу;  $R$  – постійна газова стала, Дж/кг К;  $T$  – середня температура газового потоку на ділянці газопроводу, К;  $D$  – внутрішній діаметр газопроводу, м;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с;  $\alpha$  – кут нахилу ділянки газопроводу до горизонтальної поверхні, рад;  $\gamma_p$  – питома вага рідини, кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma_z$  – питома вага газу, кг/м<sup>3</sup>;  $\Delta\gamma = \gamma_p - \gamma_z$ , кг/м<sup>3</sup>.

Та сама функція, виходячи із геометрії трубопроводу, має ступеневу залежність від величини центрального кута до дзеркала рідини (рис. 1)

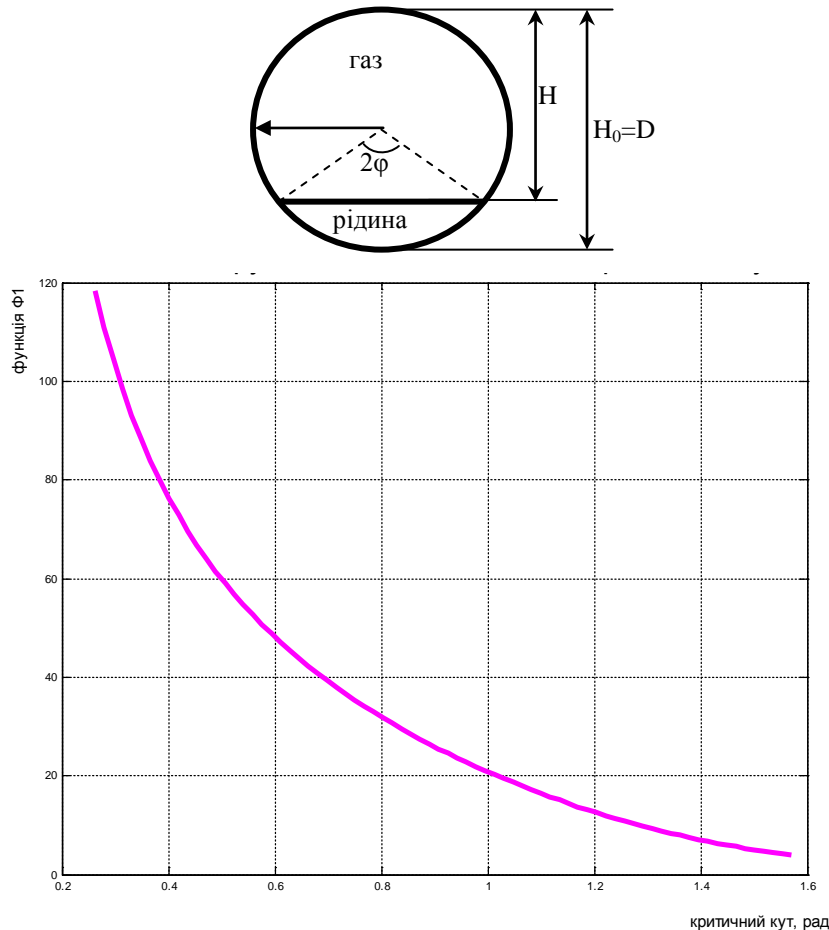


Рисунок 1 – Залежність функціональної умови  $\Phi_1(\varphi_{кр})$

Функціональну умову  $\Phi_1(\varphi_{кр})$  розраховують за формулою (1) для кожного конкретного газопроводу із такими умовами експлуатації:

- швидкісний режим роботи газопроводу від 1,0 до 15,0 м/с;
- рельєф траси прокладання газопроводу (від рівнинного газопроводу (кут нахилу ділянки – 0<sup>0</sup>) до газопроводу, прокладеного в складних гірських умовах (кут нахилу ділянки до 60<sup>0</sup>);
- діаметральний ряд (DN100–DN1400);
- режим роботи газопроводів відповідає реальним режимам експлуатації промислових газопроводів України і, що транспортують газ власного видобутку (від 1,0 МПа до 6,0 МПа);
- якісний склад забруднень в порожнині газопроводу (вода  $\gamma_p = 998$  кг/м<sup>3</sup>, нафта  $\gamma_p = 820$  кг/м<sup>3</sup>, конденсат  $\gamma_p = 740$  кг/м<sup>3</sup>).

Критичний об'єм забруднень  $V_{кр.}$  ( $\text{м}^3$ ), що відповідає умові залпового викиду рідини з коліна газопроводу, на досліджуваній ділянці визначається за формулою:

$$V_{кр} = \frac{D^2}{4} (2\varphi - \sin 2\varphi) L. \quad (2)$$

В першу чергу, на можливість проходження залпового викиду рідини діє рельєф місцевості, адже відповідно до теорії А. Чарного, сконденсована рідина займає коліно трубопроводу (рис. 2).

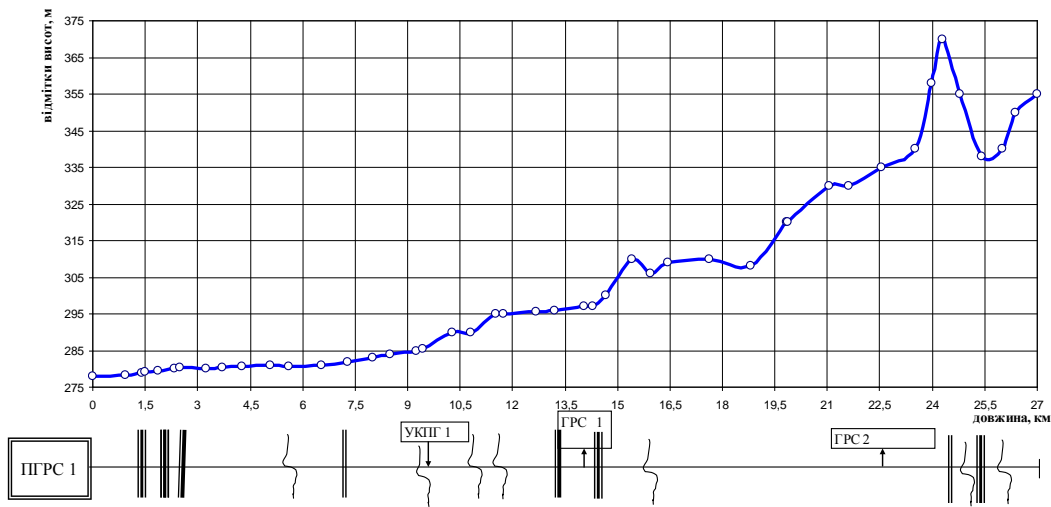


Рисунок 2 – Поздовжній план-профіль траси трубопроводу

Отже, слід звернути увагу, в першу чергу, на рельєфні трубопроводи із значною кількістю переходів через природні та штучні перешкоди, трубопроводи розміщені в горбистій чи гірській місцевостях. Крім того, слід зауважити, що залежно від діаметрального ряду, аналізуючи формули (1) і (2), залповий викид може статись швидше для труб малого діаметру, але з меншим обсягом, або ставатись дуже рідко, але із великою потужністю для труб великого діаметру.

Зміна швидкісного режиму експлуатації можлива лише за двох умов:

- зменшення величини робочого тиску і відповідного збільшення складової втрат на тертя;
- збільшення продуктивності трубопроводу (тобто його завантаження), що при-таманно зимовому періоду року, як наслідок природного збільшення споживання газу для обігріву помешкань (рис. 3).

Таким чином, основним періодом моніторингу мають стати осінньо-зимові місяці експлуатації газопроводів, які супроводжуються різкими перепадами у відборах газу споживачами.

Зміна газоводоконденсатної системи під час розробки родовища є процесом довготривалим, а отже, раптово спровокувати залповий викид рідини не може. Виключеннями можуть стати:

- зміна джерела подачі газу в газотранспортну систему, наприклад заміна подачі газу з установки комплексної підготовки газу на подачу газу з підземного сховища газу через систему комунікацій промислової газорозподільної станції;

– аварійний винос більш важкої рідини з сепараційного обладнання, порівняно з тією, що є вже сконденсованою в трубопроводі.

Основною причиною є зміна робочого тиску під час експлуатації трубопроводу, до якої можуть призвести:

- будь-які роботи з очистки порожнини ділянок трубопроводу;
- збільшення робочого тиску внаслідок проведення будь-яких ремонтних робіт;
- роботи з продувки ділянок трубопроводу;
- зменшення величини робочого тиску на вході в кінцевий пункт внаслідок забруднення, появи гідратів, зменшення акумулятивної здатності труби внаслідок потужного відбору.

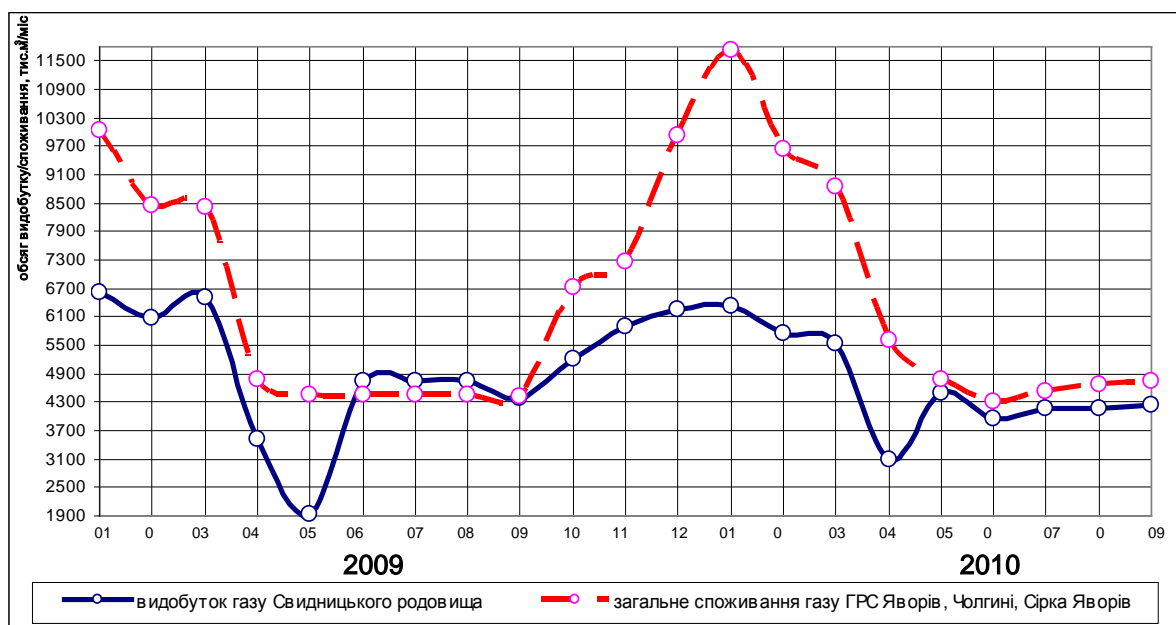


Рисунок 3 – Зміна видобутку газу родовища і споживання газу в регіоні видобутку

Останній з чинників представлено в таблиці даних про режим роботи потенційно-небезпечної ділянки трубопроводу (табл.1), на якій стався залповий викид рідини.

Таблиця 1 – Зміна режиму експлуатації ділянки трубопроводу

Дата	Абсолютний початковий тиск, кгс/см <sup>2</sup>	Абсолютний кінцевий тиск, кгс/см <sup>2</sup>	Перепад тиску на ділянці г/п, кгс/см <sup>2</sup>	Надлишкові втрати тиску на ділянці г/п, кгс/см <sup>2</sup>	Лінійна швидкість газу на ділянці г/п, м/с	Розрахунковий об'єм рідинних забруднень, м <sup>3</sup>	Критичний об'єм рідинних забруднень, м <sup>3</sup>	Гідрати
16.01.2013	12,5	12,0	0,5	0,48	0,5	11,9	15,8	вик.
01.02.2013	12,5	12,0	0,5	0,49	0,5	11,86	18,17	вик.
05.03.2013	12,5	12,0	0,5	0,49	0,49	11,86	18,11	вик.
01.04.2013	11,9	11,5	0,4	0,39	0,47	12,63	19,68	вик.
10.10.2013	11,1	9,5	1,6	1,6	0,27	13,3	20,4	не вик.
03.11.2013	11,9	10,5	1,4	1,4	0,2	13,46	22,47	не вик.
12.12.2013	11,9	6,5	5,4	5,38	0,8	14,09	14,5	вик.



Як видно з таблиці, падіння робочого тиску, викликане значним відбором природного газу в зимовий місяць, падінням робочого тиску та утворенням гідратів при низькій температурі, значно знижує межу критичної величини рідини в порожнині трубопроводу та підвищує імовірність виникнення залпового викиду до обладнання ГРС.

**Висновки.** Підсумовуючи вищесказане, зазначимо:

1. На формування певного критичного об'єму рідини в порожнині газопроводу, при досягненні величини якого відбувається перерозподіл мас рідини із залповим надходженням останньої до обладнання ГРС, КС тощо, значно впливає рельєф місцевості і технічна характеристика труб. Причому, в гірській, горбистій, а також місцевості із значною кількістю природних перешкод (яри, балки, урочища та річки) рідина формуватиме локальні зони значно активніше, причому імовірність її залпового викиду значно вища, а потужність значно менша для трубопроводів малого діаметру та навпаки для трубопроводів великого діаметру.

2. Кількість обходів операторів та лінійних обхідників траси трубопроводу, а також частота опитування приладів вимірювання має бути збільшена в періоди:

- проведення будь-яких ремонтних робіт;
- виконання будь-яких робіт з очистки попередніх або наступних за рухом газу ділянок трубопроводів чи під час їх продування;
- різкого зменшення температури навколишнього середовища із відповідним збільшенням обсягів відбору газу.

3. Будь-яка аномальна зміна робочого тиску в будь-якій точці трубопроводу може свідчити про активізацію процесу перерозподілу мас рідини або утворення гідратів, що вимагає нагального впровадження заходів щодо попередження цих явищ (зміна режиму роботи за робочим тиском, продування дренажних трубок трасою трубопроводу тощо).

#### Література

1. ГОСТ 5542-87 Газы горючие природные для промышленного и коммунально-бытового назначения. Технические условия.

2. Братах М.І. Математична модель залпового викиду рідини з порожнини газопроводу / М.І. Братах, В.Г. Топоров, І.М. Рuzина, А.В. Соболева // XVIII (ежегодная) международная научно-техническая конференция "Экологическая и техногенная безопасность, охрана водного и воздушного бассейнов, утилизация отходов".– Бердянск: Сб. научн. трудов, 2010.– С. 444–452.

#### Bibliography (transliterated)

1. GOST 5542-87 Gazyi goryuchie prirodnyie dlya promyishlennogo i kommunalno-byitovogo naznacheniya. Tehnicheskie usloviya.

2. Bratah M.I. Matematichna model zalpovogo vikidu ridini z porozhnini gazoprovodu M.I. Bratah, V.G. Toporov, I.M. Ruzina, A.V. Soboleva HVIII (ezhegodnaya) mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya "Ekologicheskaya i tehnogennaya

bezopasnost, ohrana vodnogo i vozdušnogo basseynov, utilizatsiya othodov".– Berdyansk: Sb. nauchn. trudov, 2010.– P. 444–452.

УДК 622.691.4

Топоров В.Г., Шеина З.В., Скрыльник К.Ю., Сафта А.В.

**ВЕРОЯТНОСТЬ ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЯ МАСС ЖИДКОСТИ  
В ПОЛОСТИ ТРУБОПРОВОДА**

На основе анализа теории И.А. Чарного и формулы зависимости критического объема загрязнения полости трубопровода от технических и технологических параметров представлены факторы, которые увеличивают вероятность протекания процесса залпового перераспределения жидкости между участками рельефного трубопровода.

Toporov V.G., Sheina Z.V., Skrylnyk K.Y., Safta A.V.

**THE PROBABILITY OF THE PROCESS FLUID REALLOCATION BETWEEN THE  
SECTIONS OF PIPELINE**

Based on the analysis of the theory of I.A. Charny and the critical volume of pollution in pipeline formulas depending on technical and technological parameters the article shows the factors that increase the probability of the process fluid reallocation between the sections of the relief pipeline.

УДК 643.33:547.128

Білецький Е.В., Толчинський Ю.А.

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ГІДРАВЛІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧІЇ НЕНЬЮТОНІВСЬКИХ РІДИН У КАНАЛАХ

**Постановка проблеми в загальному вигляді.** В реальних умовах технологічного процесу об'єкт досліджень не може бути повністю адекватним побудованій математичній моделі так, як при її побудові застосовувалися різні приближення та узгодження. Тому основним засобом підтвердження вірогідності отриманих теоретичних рішень є експериментальні дослідження та на їх підставі оцінка адекватності отриманих моделей [1–4]. З огляду на вище сказане, у даній статті пропонується пристрій для вимірювання гідравлічних характеристик течії неньютонівських рідин та спеціальна розрахункова методика, яка дозволяє провести перевірку експериментальних даних з теоретичними результатами моделей течії.

**Мета та задачі статті.** На сьогоднішній день для проведення досліджень гідравлічних характеристик у роботах [5–7] запропоновані різноманітні методики та установки, які мають певні недоліки і не в повній мірі відповідають усім вимогам, щодо проведення експерименту. З огляду на це, для дослідження течії неньютонівських рідин в пласкому каналі було розроблено та виготовлено експериментальний стенд (рис. 1), який дозволив дослідити та адекватно оцінити наступні характеристики: тиск, температуру, витрату і потужність, що є найголовнішими з точки зору ефективності протікання технологічних процесів хімічної і харчової промисловості [1–4].

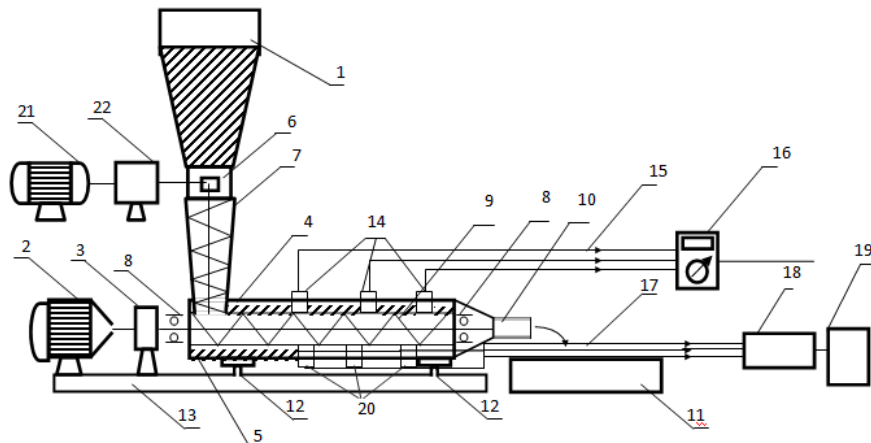


Рисунок 1 – Пристрій для вимірювання гідравлічних характеристик течії неньютонівських рідин:

- 1 – завантажувальний бункер; 2 – електродвигун; 3 – редуктор; 4 – шнековий нагнітач; 5 – охолоджуюча сорочка; 6 – з'єднувальна труба; 7 – живильник-дозатор; 8 – підшипникові вузли; 9 – черв'як; 10 – мундштук; 11 – приймальна ємність; 12 – опори; 13 – опорна рама; 14 – термопари; 15 – дроти термопар; 16 – вольтметр; 17 – дроти; 18 – тензопосилувач; 19 – самописний прилад; 20 – тензодатчики; 21 – електродвигун; 22 – редуктор

**Викладення основного матеріалу.** Як видно з рис. 1 нижня частина завантажувального бункера 1 виконана у вигляді конуса, до якого прикріплена з'єднувальна труба 6, що переходить в корпус живильника-дозатора 7, який являє собою конічний корпус, одна основа якого кріпиться до з'єднувальної труби 6, а друга основа з'єднана жи-

влячим отвором шнекового нагнітача 4, в середині живильника-дозатора 7 розташований шнековий елемент зі шагом, що зменшується до виходу шагом і розміром пера витків, шнековий нагнітач 4 виконаний у вигляді циліндричної товстостінної труби з охолоджуючою сорочкою 5, в якій з обох сторін розташовані підшипникові вузли 8, в яких розміщено суцільний однохідний черв'як 9, поверхня якого разом з внутрішньою поверхнею циліндричної труби утворює гвинтовий канал постійного перетину прямокутної форми, на вихідному кінці шнекового нагнітача 4 розташований конічний перехідник, до кінця якого кріпиться мундштук 10, який являє собою циліндричну товстостінну трубку і через який рідина поступає в приймальну ємність 11, корпус шнекового нагнітача 4 разом з понижуючим редуктором 3 і електродвигуном 2 за допомогою спеціальних опор 12 прикріплюється жорстко до опорної рами 13 анкерними болтами, у верхній частині робочої камери шнекового нагнітача 4 розташовані термопари 14 з наступним виведенням сигналу за допомогою дротів термопар 15 на вхід цифрового вольтметра 16, у нижній частині робочої камери шнекового нагнітача 4 розташовані тензодатчики 20 з наступним виведенням сигналу за допомогою дротів тензодатчиків 17 через тензопосилувач 18 на самописний прилад 19. У якості об'єкта перевірки було обрано модель течії бінгамовської рідини в пласкому каналі. Перевірка відповідності модельної течії в пласкому каналі здійснювалася на різних матеріалах таким чином, що реологічні характеристики цих матеріалів приймали різні за величинами значення в'язкості та граничного напруження зрушення. Експериментальні дослідження проводилися в широкому діапазоні зміни швидкості зрушення. Вимірювальні величини мають інтегральний характер. Вимір локальних характеристик течії не проводився.

Як вказувалося вище, за допомогою даного пристрою було проведено вимірювання величин тиску, температури, витрати і швидкості руху досліджуваних матеріалів. Величина тиску вимірювалася за допомогою спеціальних тензометричних датчиків тиску в'язкопластичних матеріалів 20, в якості чутливого елемента датчика використовувалась пластина з нержавіючої сталі X18H10T, яка має високу механічну міцність та корозійну стійкість. Дані тензодатчики дозволяли проводити вимірювання у діапазоні температур від 273–475 К з наступним виведенням сигналу за допомогою дротів тензодатчиків 17 через тензопосилувач «ТОПАЗ-3» 18 на самописний прилад 19 типу КСП-4. Використання тензопосилувача дозволяло одночасно визначати тиск у всіх точках нагнітача. Перед початком експерименту тензодатчики були проградуїровані на гідравлічному пресі з використанням трансформаторного мастила. Тензометричні датчики тиску з термокомпенсаторами включалися за напівмостовою схемою, в якій діючий і пасивний терморезистори розміщено в сусідніх плечах моста, а в двох інших плечах моста знаходилися постійні резистори. Діючий і пасивний терморезистори було наклеєні на дно і бокову стінку спеціального стакану, а сам стакан розміщувався в міцному корпусі. Фіксація всієї системи вимірювання здійснювалася притисковою гайкою. Стакани з тензодатчиками 20 розміщувалися в боковій стінці шнекового нагнітача 4 в спеціальному заглибленні таким чином, щоб вимірювався подовжній тиск в матеріалі максимальної величини. Шнековий нагнітач 4 під час роботи виділяв дисипативне тепло, яке відводилося через охолоджуючу сорочку 5 з холодною водою.

Температура матеріалу в робочій камері шнекового нагнітача 4 вимірювалася за допомогою хромель-капелевих термопар 14 з діапазоном зміни температур від 273–380 К з наступним виведенням сигналу за допомогою дротів термопар 15 на вхід цифрового вольтметра 16.

Вимірювання характеристик течії неньютонівських рідин здійснювалося наступним чином. Порція досліджуваного матеріалу зважувалась на електронних вагах ВН-

13Ц та поміщалась в завантажувальний бункер 1. В завантажувальному бункері 1 матеріал за допомогою електродвигуна 21, редуктора 22 і лопатного змішувача перемішувалася, кондиціонувалася за температурою і поступала в живильник-дозатор 7. В живильнику-дозаторі матеріал ущільнювався і поступав через живильний отвір шнекового нагнітача 4 в його робочу камеру. Проходячи крізь шнековий нагнітач 4 досліджуваній матеріал виходив через отвір мундштука 10 в приймальну ємність 11. Тривалість кожного окремого досліду контролювалася за допомогою секундоміра (близько 60 секунд). В ході дослідів температура контролювалася за допомогою термометрів 14, розташованих на вході і виході шнекового нагнітача 4. За рахунок відведення дисипативного тепла температура в робочій камері шнекового нагнітача 4 підтримувалася на рівні 20 °С. У ході експериментів також змінювалось число обертів валу шнекового нагнітача 4, що досягалось зміною діаметра з'йомного шківів. Таким чином регулювалася швидкість руху досліджуваних матеріалів та визначалась потужність електродвигуна.

На підставі отриманих значень витрат та тиску було розроблено спеціальну розрахункову методику та проведено перевірку експериментальних даних з теоретичними результатами моделей течії.

Методика розрахунку полягає в наступному. Ґрунтуючись на виборі геометричних розмірів каналу черв'яка, можна вважати цей канал близьким до плоского [8–9]. У цьому випадку, впливом другої пари стінок можна зневажити так, що для розрахунків можна застосовувати теоретичні моделі опису течії у каналах базової геометрії, які наведені у роботах [8,9]. Звідки, вираження для визначення координат границь мають такий вигляд:

$$\gamma^{\pm} = \delta\gamma \pm \gamma; \quad \gamma = \frac{dP}{d\zeta}; \quad \delta\gamma = \frac{\mu(W^+ - W^-)}{2h\tau_0}. \quad (1)$$

Підстановка цих виражень у формулу для визначення витрати (8,9) приводить до такого його вираження:

$$V_1 = (W^+ + W^-)h - (W^+ - W^-)h\delta\gamma_1 - \frac{2h^2}{3\mu_0} \frac{dP_1}{d\zeta_1} \left(1 - \frac{3}{2}\gamma_1 + \frac{1}{2}\gamma_1^3 - \frac{3}{2}\gamma_1(\delta\gamma_1)^2 - 3(\delta\gamma_1)^2\right). \quad (2)$$

Формула (2) описує витрату при течії у плоскому каналі. Течія у круглій трубі має витрату, що обчислюється за наступною формулою:

$$V_2 = \frac{\pi r_0^3}{8\mu_0} \frac{dP_2}{d\zeta_2} \left(1 - \frac{4}{3}\gamma_2 + \frac{1}{3}\gamma_2^4\right). \quad (3)$$

Слід пояснити, що у формулах (2) і (3) для розрізнення характеристик течії, що відносяться до плоского каналу й труби, використовуються індекси «1» і «2» відповідно. Система рівнянь для обчислення витрати течії має такий вигляд:

$$V_1 = V_2; \quad \frac{dP_1}{dZ_1} L_1 + \frac{dP_2}{dZ_2} L_2 = 0, \quad (4)$$

де  $L_1$  – довжина плаского каналу, м;  $L_2$  – довжина труби, м.

Стосовно до черв'ячного обладнання, приймаємо, що величина  $L_1$  це довжина гвинтової лінії каналу витків,  $L_2$  – довжина мундштука;  $r_0$  – радіус мундштука. Чисельний аналіз показує, що без значної втрати точності можливі наступні спрощення:

$$1 - \frac{3}{2}\gamma_i + \frac{1}{2}\gamma_i^3 \approx 1 - \gamma_i; \quad (5)$$

$$1 - \frac{4}{3}\gamma_2 + \frac{1}{3}\gamma_2^4 \approx 1 - \gamma_2.$$

Рішення системи рівнянь (4-5) приводить до наступних результатів:

$$\frac{dP_1}{d\xi_1} = \frac{3\mu_0(W^+ - W^-)}{2h_1} \left\{ 1 + \frac{\mu_0(W^+ - W^-)}{2h\tau_0} \times \frac{\gamma_1}{(1-\gamma_1)^2} \right\} \times \frac{1}{1 + \xi_s \frac{3\pi r_0^3}{16a_1 h_1^2} \times \frac{1-\gamma_1/\xi_s}{1-\gamma_1}},$$

$$V_1 = V_2 = V = (W^+ + W^-) a_1 h_1 \left\{ 1 + \frac{\mu_0(W^+ - W^-)}{2h\tau_0} \times \frac{\gamma_1}{(1-\gamma_1)^2} \right\} \times \frac{\xi_s (\pi r_0^3 / 16a_1 h_1^2) \times (1-\gamma_1/\xi_s)}{1 + \xi_s (\pi r_0^3 / 16a_1 h_1^2) \times (1-\gamma_1/\xi_s)},$$

$$\xi_s = \frac{L_1}{L_2} \times \frac{r^0}{h}.$$

У випадку гвинтового каналу в системі координат, що обертається разом із черв'яком, величину швидкості  $W_1$  слід вважати рівною нулю. Для величини  $\gamma^\pm$  добрим наближенням є наступне вираження:

$$\gamma_1 \approx \frac{2h\tau_0}{3\mu_0 W_1^+} \times \left( 1 + \frac{2}{3} \times \frac{3\pi r_0^3}{16a_1 h_1^2} \xi_s \right). \quad (7)$$

Дослідження проводилися з використанням двох варіантів черв'яків. Характеристики плаского каналу визначалися за допомогою наступних співвідношень:

$$L_1 = n \times \sqrt{t_B^2 + \pi^2 D^2}, \quad \text{tg} \varphi_B = t_B / \pi D, \quad (8)$$

$$a_1 = t_B \cos \varphi_B,$$

де  $t_B$  – крок черв'яка, мм;  $n$  – число витків;  $\varphi_B$  – кут підйому пера черв'яка, град.

Підстановка результатів розрахунків по формулах (8) у формули (6) приводить до таких виражень для визначення величини витрати черв'ячного пристрою:

$$\dot{V} = 33,2 \times N \left\{ 1 + \frac{0,63\gamma}{(1-\gamma)^2} \right\} \times \frac{0,60(1-\gamma/7,14)}{1+0,60 \times (1-\gamma/7,14)/(1-\gamma)},$$

$$\gamma = \frac{1,31}{\mu_0 W^+ / h\tau_0},$$
(9)

$$\dot{V} = 83,5 \times N \left\{ 1 + \frac{0,67\gamma}{(1-\gamma)^2} \right\} \times \frac{0,68(1-\gamma/5,80)}{1+0,68 \times (1-\gamma/5,80)/(1-\gamma)},$$

$$\gamma = \frac{1,31}{\mu_0 W^+ / h\tau_0}.$$

Перша з формул (9) відноситься до черв'яка із кроком  $t_B = 86$  мм і глибиною каналу  $2h = 7$  мм; а друга до черв'яка із кроком  $t_B = 132$  мм і глибиною каналу  $2h = 14$  мм.

Повна потужність черв'ячного пристрою являє собою суму потужностей, що складається з холостого ходу, переміщення матеріалу, теплової дисипації в каналі черв'яка й теплової дистанції в трубі мундштука. Вираження для цих потужностей має такий вигляд:

$$W_{\text{трансп.}} = \frac{3\mu_0 L_1 \dot{V}^2}{2a_1 h_1^3 \left( \frac{3\pi r_0^3}{16a_1 h_1^2} \xi_s \right) \times \frac{1-\gamma_1/\xi_s}{1-\gamma_1}}.$$
(10)

Підстановка геометричних характеристик черв'ячного пристрою у формулу (10) приводить до таких результатів:

$$W_{\text{трансп.}} = \frac{\mu_0 \dot{V}^2}{0,60 \times \frac{1-\gamma_1/7,14}{1-\gamma_1}} \cdot 5,25 \cdot 10^{-4}.$$
(11)

$$W_{\text{дисс. черв.}} = 5,94 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\mu_0} \left\{ \frac{\mu_0 \dot{V}}{0,60 \times \frac{1-\gamma_1/7,14}{1-\gamma_1}} \right\}^2 \times \left[ (1-\gamma_1^+)^3 + (1+\gamma_1^-)^3 \right].$$
(12)

$$W_{\text{дисс. мундшт.}} = 8,67 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\mu_0} \left\{ \frac{\mu_0 \dot{V}}{0,60 \times \frac{1-\gamma_1/7,14}{1-\gamma_1}} \right\}^2 \times 2(1-\gamma_1/7,14)^3.$$
(13)

$$W_{\text{трансп.}} = 0,36 \cdot 10^{-4} \frac{\mu_0 \dot{V}^2}{0,68 \times \frac{1-\gamma_1/5,80}{1-\gamma_1}} \quad (14)$$

$$W_{\text{дисс. черв.}} = 0,19 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\mu_0} \left\{ \frac{\mu_0 \dot{V}}{0,68 \times \frac{1-\gamma_1/5,80}{1-\gamma_1}} \right\}^2 \times \left[ (1-\gamma_1^+)^3 + (1+\gamma_1^-)^3 \right] \quad (15)$$

$$W_{\text{дисс. мундит.}} = 0,22 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\mu_0} \left\{ \frac{\mu_0 \dot{V}}{0,68 \times \frac{1-\gamma_1/5,80}{1-\gamma_1}} \right\}^2 \times 2(1-\gamma_1/5,80)^3 \quad (16)$$

Наведені формули (11–16) дозволяють порівняти отримані результати експерименту з розрахунковими даними для умов експерименту і розраховувалися для черв'яків двох видів. Вимір числа оборотів вала пристрою відбувався в межах:  $0,5 \leq N \leq 4$  об/с. Отримані формули записані в такому вигляді й з такими множниками, щоб величина  $\dot{V}$  обчислювалася в  $\frac{\text{см}^3}{\text{с}}$  для спрощення порівняння з експериментальними даними.

При обробці даних експериментів застосовувалися методи варіаційної статистики, регресійного та дисперсійного аналізу, а також методи перевірки статистичних гіпотез [10–11].

**Висновки.** Проведений аналіз показав, що експериментальні дані добре погоджуються с розрахунковими залежностями та знаходяться у межах припустимої погрішності. Новизна технічного рішення підтверджена патентом України на корисну модель [12].

#### Література

1. Процеси та апарати хімічної технології : у 2 ч. Ч. 1 / Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, А.П. ГОТЛИНСЬКА, В.О. ЛЕЩЕНКО [та інші]; під загальною редакцією Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКОГО. – Х. : НТУ"ХПІ", 2004. – 632 с.
2. Андреев А.А. Теплообменные аппараты для вязких жидкостей / А.А. Андреев. – М. : Госэнергоиздат, 1961 – 116 с.
3. Плановский А.Н. Процессы и аппараты химической и нефтяной технологии / А.Н. Плановский, П.И. Николаев. – М. : Химия, 1987. – 496 с.
4. Машини та апарати у хімічних, харчових і переробних виробництвах: підручник / Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, В.П. ШАПОРЕВ, В.Ф. МОІСЕЄВ [та ін.]. – Х. : Колегіум, 2011. – 606 с.
5. Основные технологии пищевых производств и энергосбережение : учебн. пособие / Л.Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, С.И. БУХКАЛО, П.А. КАПУСТЕНКО, Г.Л. ХАВИН. – Х. : НТУ



«ХПІ», 2005. – 460 с.

6. Чоу В.Т. Гидравлика открытых каналов / В.Т. Чоу; пер с англ. – М. : Стройиздат, 1968. – 464 с.

7. Jansseune T. Rheology and rheological morphology determination in immiscible two-phase polymer model blends / T. Jansseune, J. Mewis, P. Moldenaers [et. al.] // J. Non-Newton. Fluid Mech. – 2000. – P. 153–165.

8. Товажнянський Л.Л. Моделювання течій неньютонівських рідин у каналах базової геометрії : монографія / Л.Л. Товажнянський, Е.В. Білецький, Ю.А. Толчинський. – Х. : НТУ «ХПІ», 2013. – 319 с.

9. Білецький Е.В. Течія в'язкопластичної рідини в плоскому каналі / Е.В. Білецький, Ю.А. Толчинський, О.В. Петренко // Наукові праці ОНАХТ. – Одеса : ОНАХТ, 2010. – №37(10). – С. 122–126.

10. Агошков В.И. Проекционные и вариационные методы анализа / В.И. Агошков, Г.И. Марчук. – М. : Наука, 1986. – 360 с.

11. Ферстер Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа / Э. Ферстер, Б. Ренц; пер. с немец. – М. : Финансы и статистика, 1993. – 302 с.

12. Пат. на корисну модель 80033 Україна, МПК G05D 7/00, B01F 3/10 (2006.01). Пристрій для вимірювання характеристик течії неньютонівських рідин / Білецький Е.В., Чуйко А.М.; заявник та патентовласник Харківський торговельно-економічний інститут КНТЕУ. – № u 2012 13479 ; заявл. 26.11.2012 ; опубл. 13.05.2013, Бюл. № 9. – 4 с. : іл.

#### Bibliography (transliterated)

1. Protsesi ta aparati himichnoyi tehnologiyi : u 2 ch. Ch. 1 L.L. Tovazhnyanskiy, A.P. Gotlinska, V.O. Leschenko [ta inshi] ; pid zagalnoyu redaktsieyu L.L. Tovazhnyanskogo.– Н. : NTU "HPI", 2004. – 632 p.

2. Andreev A.A. Teploobmennyye apparaty dlya vyazkih zhidkostey A.A. Andreev. – М. : Gosenergoizdat, 1961 – 116 p.

3. Planovskiy A.N. Protsessyi i apparaty himicheskoy i neftyanoy tehnologii A.N. Planovskiy, P.I. Nikolaev. – М. : Himiya, 1987. – 496 p.

4. Mashini ta aparati u himichnih, harchovih i pererobnih virobnitstvah: pidruchnik L.L. Tovazhnyanskiy, V.P. Shaporev, V.F. Moiseev [ta in.]. – Н. : Kolegium, 2011. – 606 p.

5. Osnovnyie tehnologii pishevyih proizvodstv i energosberezhenie : uchebn. posobie L.L. Tovazhnyanskiy, S.I. Buhkalo, P.A. Kapustenko, G.L. Havin. – Н. : NTU «HPI», 2005. – 460 p.

6. Chou V.T. Gidravlika otkryityih kanalov V.T. Chou; per s angl. – М. : Stroyizdat, 1968. – 464 p.

7. Jansseune T. Rheology and rheological morphology determination in immiscible two-phase polymer model blends T. Jansseune, J. Mewis, P. Moldenaers [et. al.] J. Non-Newton. Fluid Mech. – 2000. – P. 153–165

8. Tovazhnyanskiy L.L. Modelyuvannya techiy nenyutonivskih ridin u kanalah bazovoyi geometriyi : monografiya L.L. Tovazhnyanskiy, E.V. Biletskiy, Yu. A. Tolchinskiy. – Н. : NTU «HPI», 2013. – 319 p.

9. Biletskiy E.V. Tychiya vyzkoplastichnoyi ridini v ploskomu kanali E.V. Biletskiy, Yu.A. Tolchinskiy, O.V. Petrenko Naukovi pratsi ONAHT. – Odesa : ONAHT, 2010. – #37(10). – P. 122–126.

10. Agoshkov V.I. Proektsionnyie i variatsionnyie metodyi analiza V.I. Agoshkov, G.I. Marchuk. – M. : Nauka, 1986. – 360 p.

11. Ferster E. Metodyi korrelyatsionnogo i regressionnogo analiza E. Ferster, B. Rents; per. s nemets. \* M. : Finansyi i statistika, 1993. – 302 p.

12. Pat. na korisnu model 80033 UkraYina, MPK G05D 7/00, V01F 3/10 (2006.01). Pristriy dlya vimiryuvannya harakteristik techiyi nenyutonivskih ridin / Biletskiy E.V., Chuyko A.M.; zayavnik ta patentovlasnik Harkivskiy torgovelno-ekonomichniy Institut KNTEU. – # u 2012 13479 ; zayavl. 26.11.2012 ; opubl. 13.05.2013, Byul. # 9. – 4 p. : il.

УДК 643.33:547.128

Белецкий Э.В., Толчинский Ю.А.

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ  
ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕЧЕНИЙ НЕНЬЮТОНОВСКИХ  
ЖИДКОСТЕЙ В КАНАЛАХ**

В статье предлагается стенд для измерения гидравлических характеристик течений неньютоновских жидкостей и специальная расчетная методика, которая позволяет исследовать и адекватно оценить следующие показатели процесса: давление, температуру, расход, и мощность.

Biletskiy E.V., Tolchinskiy Y.A.

**EXPERIMENTAL DEVICE FOR MEASURING HYDRAULIC CURRENT  
OF NON-NEWTONIAN LIQUIDS IN CHANNELLS**

The article presents a device for measuring hydraulic behaviour of non-newtonian liquid currents which makes it possible to study and adequately evaluate the following characteristics of the process – pressure, temperature, losses, and capability.

УДК: 661.33-047.64

Бобух А.А., Литвиненко И.И., Беспалов К.И.

## АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ РЕГЕНЕРАЦИИ АММИАКА В ОТДЕЛЕНИИ ДИСТИЛЛЯЦИИ ПРОИЗВОДСТВА СОДЫ

### Введение

Одним из основных направлений совершенствования технологии кальцинированной соды из хлорида натрия (аммиачный способ) является разработка алгоритмов управления сложными технологическими процессами. Производство соды по аммиачному способу включает восемь основных переделов (цехов или отделений): получение карбонатного сырья, переработка этого сырья, получение и очистка рассола, абсорбция, карбонизация, фильтрация, кальцинация и дистилляция (регенерация аммиака). Определенный интерес представляет повышение качества конечного продукта за счет оптимизации управления процессом регенерации аммиака в отделении дистилляции производства соды.

### Цель работы

Разработка алгоритма управления процессом регенерации аммиака в отделении дистилляции производства соды, который позволит минимизировать с помощью метода штрафных функций и выбора критерия оптимизации расход пара, одного из основных составляющих себестоимости кальцинированной соды, за счет оптимизации управления.

### Основная часть

Рассмотрим процесс регенерации аммиака из растворов, поступающих в отделение дистилляции производства соды (рисунок). На рисунке показан фрагмент функциональной схемы автоматизации указанного процесса, выполненный адресным методом [1]. На нем в условных графических, буквенных и цифровых обозначениях изображено основное оборудование, материальные потоки, регулирующие органы, контрольно-измерительные приборы, в том числе микропроцессорный контроллер (МПК), линии связи между ними. Там же показано условное обозначение выполняемых МПК функций: контроля ("контроль"), заданий регламентных значений требуемых параметров, штрафных функций и "единицы", а также расчета и выдачи управляющих воздействий ("управление") на исполнительные механизмы, в виде точек.

Процесс регенерации аммиака из фильтровой жидкости осуществляется в отделении дистилляции [2], в котором протекают реакции разложения карбонатных солей аммония и гидрокарбоната натрия за счет нагревания растворов. Реакции разложения указанных солей осуществляются в дистилляционной колонне, состоящей из конденсатора-холодильника газа дистилляции (КХДС) (1), теплообменника дистилляции (ТДС) (2), дистиллера (ДС) (3) и смесителя (реактора с рамной мешалкой) (СМ) (4). На содовых заводах жидкости отделения дистилляции нагревают паром (2.1), который проходит противотоком жидкостям. Фильтровая жидкость (1.1) проходит последовательно КХДС (1), где нагревается до 35–40 °С и начинается разложение гидрокарбоната аммония. При дальнейшем нагревании жидкости до 65–75 °С начинает диссоциировать карбонат аммония. При поступлении её в ТДС (2), где температура жидкостного потока повышается от 80 до 90 °С, разложение карбоната аммония резко ускоряется. Из ТДС

(2) жидкость (1.2) направляется в смеситель (СМ) (4), куда также поступает известковая суспензия (1.3). Пар (2.1), подаваемый в нижнюю часть ДС (3), проходит противотоком к жидкости все указанные аппараты, поэтому пар (2.2) после ДС (3) поступает в СМ (4). В результате чего в СМ (4) осуществляется процесс регенерации аммиака из хлорида аммония и сульфата аммония, образующийся свободный аммиак выделяется в газовую фазу (2.3) и поступает в ТДС (2), а жидкость (1.4) – в ДС (3).

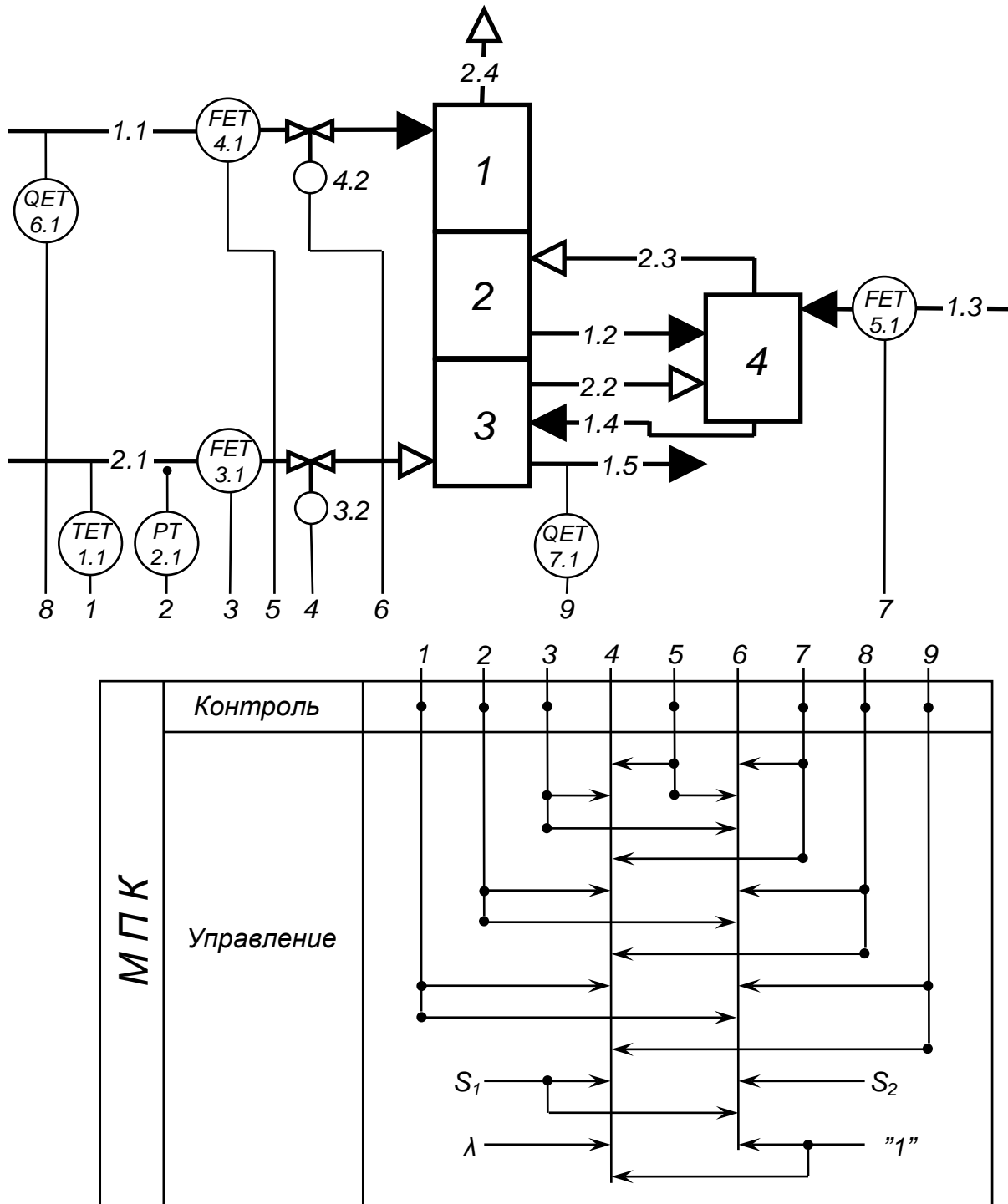


Рисунок – Фрагмент функциональной схемы автоматизации процесса регенерации аммиака в отделении дистилляции производства соды

Окончательная регенерация аммиака осуществляется паром (2.1) в ДС (3), из которого дистиллируемая жидкость (1.5) поступает на утилизацию (на рисунке не показано). Полученная парогазовая смесь (2.4) при температуре 50–60 °С, содержащая 51–53 % аммиака, после КХДС (1) поступает в отделение абсорбции (на рисунке не показано).

Рассмотренный процесс регенерации аммиака в отделении дистилляции производства соды характеризуется как непрерывный, нелинейный многомерный объект с экстремальными нестационарными характеристиками, являющийся предметом рассмотрения теории адаптационной оптимизации [1].

Для рассмотренного объекта управления целесообразно реализовать следующий адаптивный алгоритм регенерации аммиака в отделении дистилляции производства соды [3]:

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^6 \hat{a}_i(t-1)x_i(t), \quad (1)$$

где  $y$  – выход объекта, значение содержания аммиака в дистиллируемой жидкости (1.5), сигналы от первично-передающего преобразователя (ПП/ПрП) (позиция 7.1) с унифицированными выходными сигналами постоянного тока;  $t$  – текущее дискретное время;  $i = \overline{1,6}$  – количество параметров технологического процесса;  $a_1(t), a_2(t), a_3(t), a_4(t), a_5(t), a_6(t)$  – оценки параметров объекта: расходов фильтровой жидкости (1.1), пара (2.1) и известковой суспензии (1.3); давления пара (2.1); содержания аммиака в фильтровой жидкости (1.1); температуры пара (2.1);  $x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_5(t), x_6(t)$  – сигналы от соответствующих ПП/ПрП (позиции 4.1, 3.1, 5.1, 6.1, 1.1) и  $x_4(t)$  – от передающего преобразователя (ПрП) (позиция 2.1) с унифицированными выходными сигналами постоянного тока о значении: расходов – фильтровой жидкости (1.1), пара (2.1) и известковой суспензии (1.3); содержания аммиака в фильтровой жидкости (1.1); температуры пара (2.1) и давления пара (2.1); знаком " $\hat{\phantom{x}}$ " – обозначены оценки соответствующих векторов.

Исходя из того, что основным показателем работы отделения дистилляции [2], является содержание аммиака в дистиллируемой жидкости (1.5), определяющее удельные расходы пара (2.1) – одной из основных составляющих себестоимости (более 50 %) кальцинированной соды, и, учитывая, что допустимое содержание аммиака в этой жидкости ограничивается санитарными нормами, необходимо минимизировать расход пара  $x_2(t)$ , то есть при заданных ограничениях вида:

$$\hat{y}(t) = \sum_{i=1}^6 \hat{a}_i(t)x_i(t) \leq S_1; \quad M[x_1(t) \leq S_2] \quad (2)$$

$$\text{минимизировать} \quad M[x_2^2(t)], \quad (3)$$

где  $M$  – символ математического ожидания;  $S_1$  – регламентное значение содержания аммиака в жидкости (1.5);  $S_2$  – регламентное значение расхода фильтровой жидкости (1.1).

Поставленную задачу можно решить с помощью метода штрафных функций, при этом критерий оптимизации будет иметь вид:

$$I(t) = M \left[ x_2^2(t) + \lambda \left( \sum_{i=1}^6 \hat{a}_i(t) x_i(t) - S_1 \right)^2 + (x_1(t) - S_2)^2 \right], \quad (4)$$

где  $\lambda$  – штрафной коэффициент, представляющий собой достаточно большое число. Решая систему уравнений

$$\frac{\partial I(t)}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial I(t)}{\partial x_2} = 0, \quad (5)$$

получаем оптимальные законы управления в виде

$$x_1(t+1) = \frac{\hat{a}_1(t)(S_1 - \sum_{i=2}^6 \hat{a}_i(t)x_i(t)) + S_2}{1 + \hat{a}_1^2(t)}, \quad (6)$$

$$x_2(t+1) = \frac{\lambda \hat{a}_2(t)(S_1 - \sum_{i=1, i \neq 2}^6 \hat{a}_i(t)x_i(t))}{1 + \lambda \hat{a}_2^2(t)}. \quad (7)$$

Разработанный адаптивный алгоритм регенерации аммиака (1), ограничения (2), выражение минимизации (3), критерий оптимизации (4), решение системы уравнений (5) и оптимальные законы управления по выдаче управляющих воздействий на изменение расходов: (6) – фильтровой жидкости (1.1) и (7) – пара (2.1) наиболее просто можно реализовать при помощи современных многофункциональных, высокопроизводительных, многоканальных, быстродействующих и высоконадежных МПК со специальными программами (СП), а также – соответствующих ПП/ПрП и ПрП (позиции 1.1, 3.1, 4.1, 5.1, 6.1, 7.1 и 2.1) и исполнительных механизмов (ИМ) (позиции 3.2 и 4.2), механически соединенных с регулирующими органами.

В первую очередь при реализации адаптивного алгоритма (1) для вычисления оценок параметров объекта  $a_1(t), a_2(t), a_3(t), a_4(t), a_5(t), a_6(t)$  необходимо, чтобы сигналы о значениях  $x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t), x_5(t), x_6(t), y(t)$  в виде унифицированных сигналов постоянного тока в момент времени  $t$  с выходов соответствующих ПП/ПрП и ПрП: (позиции 4.1, 3.1, 5.1, 6.1, 1.1, 7.1 и 2.1), поступили на соответствующие входы МПК, который по СП вычисляет указанные оценки (выполняется функция "контроль").

Для реализации ограничений (2), выражения минимизации (3), критерия оптимизации (4), решения системы уравнений (5) и оптимальных законов управления (6) и (7) в МПК по СП заносятся в виде унифицированных сигналов постоянного тока: регламентные значения содержания аммиака ( $S_1$ ) в дистиллируемой жидкости (1.5) и расхода ( $S_2$ ) фильтровой жидкости (1.1); значение штрафного коэффициента ( $\lambda$ ) и задание "единицы". После этого, МПК в реальном масштабе времени по СП выполняет стандартные функции суммирования, вычитания, умножения, деления, возведения в квадрат, расчета и выдачи управляющих воздействий на соответствующие ИМ: (позиция 3.2) для управления расходом пара (2.1) и (позиция 4.2) для управления расходом фильтровой жидкости (1.1), механически соединенные с соответствующими регулирующими органами (выполняется функция "управление").

## **Вывод**

Разработанный адаптивный алгоритм управления процессом регенерации аммиака в отделении дистилляции целесообразно использовать при разработке компьютерно-интегрированной системы управления производством соды. Этот алгоритм отличается простотой реализации и, при заданных ограничениях на регламентные значения содержания аммиака в дистиллируемой жидкости и расход фильтровой жидкости, минимизирует в реальном масштабе времени расход пара, одного из основных составляющих себестоимости кальцинированной соды.

#### Литература

1. Бобух А.А. Компьютерно-интегрированная система автоматизации технологических объектов управления централизованным теплоснабжением: монография / А.А. Бобух, Д.А. Ковалев; под ред. А. А. Бобуха. – Х.: ХНУГХ им. А.Н. Бекетова, 2013. – 226 с.
2. Зайцев И.Д. Производство соды / И.Д. Зайцев, Г.А. Ткач, Н.Д. Стоев. – М.: Химия, 1986. – 312 с.
3. А. с. SU 1623955 A1, C 01 D 7/18, G 05 D 27/00. Устройство для автоматического управления процессом регенерации аммиака в дистилляционной колонне производства соды / А.А. Бобух, В.М. Момот, И.Д. Зайцев и др. (СССР). – № 4457704; заявл. 11.08.88; опубл. 01.10.90, Бюл. № 4. – 5 с.: ил.

#### Bibliography (transliterated)

1. Bobuh A.A. Kompyuterno-integrirovannaya sistema avtomatizatsii tehnologicheskikh ob'ektov upravleniya tsentralizovannym teplosnabzheniem: monografiya A.A. Bobuh, D.A. Kovalev; pod red. A. A. Bobuha. – H.: HNUGH im. A.N. Beketova, 2013. – 226 p.
2. Zaytsev I.D. Proizvodstvo sodyi I.D. Zaytsev, G.A. Tkach, N.D. Stoev. – M.: Himiya, 1986. – 312 p.
3. A.s. SU 1623955 A1, C 01 D 7/18, G 05 D 27/00. Ustroystvo dlya avtomaticheskogo upravleniya protsessom regeneratsii ammiaka v distillyatsionnoy kolonne proizvodstva sodyi A.A. Bobuh, V.M. Momot, I.D. Zaytsev i dr. (SSSR). – # 4457704; zayavl. 11.08.88; opubl. 01.10.90, Vyul. # 4. – 5 p.: il.

УДК: 661.33-047.64

Бобух А.О., Литвиненко І.І., Беспалов К.І.

#### **АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСОМ РЕГЕНЕРАЦІЇ АМІАКУ У ВІДДІЛЕННІ ДИСТИЛЯЦІЇ ВИРОБНИЦТВА СОДИ**

У статті запропоновано алгоритм керування процесом регенерації аміаку у відділенні дистилляції виробництва соди, який відрізняється простотою реалізації та мінімізує, за рахунок оптимізації керування, витрати пару, одної з основних складових собівартості кальцинованої соди

Bobukh A.A., Litvinenko I.I., Bespalov K.I.

#### **ALGORITHM OF AMMONIA REGENERATION PROCESS MANAGEMENT IN SECTION OF DISTILLATION OF SODA PRODUCTION**

In article the algorithm of ammonia regeneration process management in section of distillation of soda production, which differs simplicity of realization and minimizes, due to optimization of management, a consumption of steam, one of the main components of prime cost of the calcinated soda, is offered.



УДК 622.691.4

Братах М.І., Рузіна І.М., Сіроус В.С., Криволапчук І.П.

### МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ УМОВ ВИНИКНЕННЯ ГІДРОУДАРУ

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** Гідравлічним ударом називається різка зміна тиску в напірному трубопроводі внаслідок раптової зміни швидкості рідини в часі.

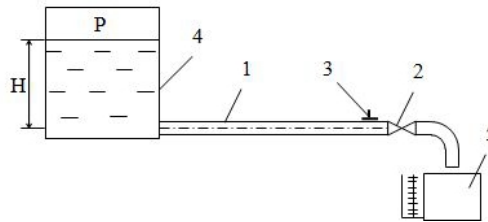


Рисунок 1 – Дослідження гідравлічного удару: 1 – довга труба, 2 – запірний пристрій, 3 – датчик тиску, 4 – резервуар, 5 – мірна ємність

На рис. 1 представлений стенд для дослідження параметрів гідравлічного удару. При гідравлічному ударі відбувається різке підвищення тиску в трубі. Кінетична енергія шарів рідини, що зупинились в трубі, перетворюється в потенціальну енергію стиснутої рідини. В першу чергу тиск збільшується безпосередньо біля запірного пристрою після зупинки перших шарів рідини. Потім, по мірі зупинки наступних шарів, збільшення тиску буде швидко розповсюджуватись вгору по трубопроводу, утворюючи хвилю підвищення тиску. Підвищення тиску, розповсюджуючись по трубопроводу з великою швидкістю, викликає стиск рідини і розширення стінок труби. Вказана пружна деформація рідини і труби відбувається зі швидкістю розповсюдження тиску по довжині труби. Швидкість розповсюдження пружних деформацій називається швидкістю розповсюдження ударної хвилі. Після того як зупиниться останній шар рідини в резервуарі, з котрого починається трубопровід, тиск біля запірного пристрою досягне свого максимуму. Характер підвищення тиску біля запірного пристрою показаний на схематичній „ударній діаграмі” (рис. 2), із розгляду котрої витікає, що підвищення тиску біля засувки відбувається не на самому початку удару, а через деякий дуже малий проміжок часу від початку підвищення тиску. Це пояснюється тим, що явище удару відбувається в пружному середовищі.

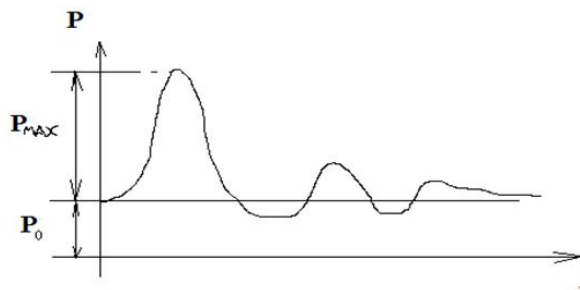


Рисунок 2 – Діаграма зміни тиску – «ударна діаграма»

Таким чином, після зупинки останнього шару вся рідина в трубопроводі буде стиснута. Але, так як в цей момент тиск в резервуарі буде меншим, ніж тиск в трубопроводі, то рідина буде рухатись по напрямку до резервуару. Внаслідок цього відбудеться

різке зниження тиску в трубопроводі. Зниження тиску, яке передається від шару до шару і розповсюджується по напрямку до запірного пристрою, називається зворотною ударною хвилею. Час пробігу прямої і зворотної ударної хвилі складає тривалість фази гідравлічного удару. Коли тиск знизиться по всьому трубопроводу, рідина зупиниться, знаходячись під пониженим тиском. В цьому положенні, коли тиск в трубопроводі буде менший, ніж в резервуарі, почнеться зворотний рух рідини до запірного пристрою з відновленням швидкості і тиску, а потім знову відбудеться гідравлічний удар. Він буде характеризуватись меншим підвищенням тиску, так як частина енергії втрачена. За цією зворотною хвилею настане друга, тобто повториться фаза гідравлічного удару і т.д. Описаний процес відбувається надзвичайно швидко, так як швидкості розповсюдження ударної хвилі дуже великі. Втрати енергії, супутні коливальному руху рідини, призводять до поступового згасання даного процесу.

На рис. 2 схематично показана діаграма зміни тиску в умовах гідравлічного удару в залежності від часу, котра показує, що підвищення тиску при гідравлічному ударі може в декілька разів перевищувати тиск в умовах постійного напору.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Вперше явище гідравлічного удару експериментально і теоретично було вивчено Н.Є. Жуковським, котрий в 1898 році розробив теорію гідравлічного удару. При виведенні основних залежностей гідравлічного удару Жуковський користувався теоремою про кількість руху, а також фрагментами теорії пружності  $\left(\frac{\Delta d}{d}, \frac{\Delta \sigma}{E}\right)$ . Формула для швидкості розповсюдження ударної хвилі має вигляд:

$$C = \frac{\sqrt{\frac{E_0}{\rho}}}{\left(\sqrt{1 + \frac{E_0 \cdot d}{E \cdot \delta}}\right)}, \quad (1)$$

де  $\delta$  – товщина стінок труби;  $E$  – модуль пружності матеріалу, із якого зроблений трубопровід;  $\sqrt{\frac{E_0}{\rho}}$  – швидкість розповсюдження пружних деформацій в рідині з густиною

$\rho$  і модулем пружності  $E_0$ , для води  $C_0 = \sqrt{\frac{E_0}{\rho}} = 1425 \text{ м/с}$ .

**Формулювання цілі статті.** Але, нормативна база для перевірки можливості виникнення гідроудару відсутня, тому за мету цієї роботи поставлено створення вищезгаданої методики на базі даних, отриманих з лабораторного стенду (рис. 1) та підтвердження результатів під час опрацювання в реальних умовах (дані щодо проходження гідроудару на діючому обладнанні газового промислу).

**Виклад основного матеріалу досліджень.** Згідно до [1] допустимий внутрішній надлишковий тиск слід розраховувати за формулою:

$$[p] = \frac{2[\sigma] \cdot \phi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = \frac{2 \cdot 410 \cdot 1 \cdot (11 - 1)}{124 + (11 - 1)} = 61,19, \text{ МПа}, \quad (2)$$

де  $[\sigma]$  – допустиме напруження при розрахунковій температурі, МПа (при розрахунку на руйнування приймають  $[\sigma] = \sigma_{\text{тимчасове}} = 410$  МПа;  $\phi_p$  – коефіцієнт міцності поздовжнього зварного шва,  $\phi_p = 1$ ;  $s$  – товщина стінки труби, мм;  $c$  – додавання до розрахункової товщини стінки труби,  $c = 1$  мм;  $D$  – внутрішній діаметр труби, мм.

Стрибок тиску, що призведе до руйнування стінки ємності (в реальних умовах – теплообмінника) при робочому максимальному тиску 9,31 МПа:

$$[\Delta p] = [p] - P_{\text{роб}}^{\text{max}} = 61,19 - 9,31 = 51,88 \text{ МПа.} \quad (3)$$

Якщо цей стрибок тиску був зумовлений гідроударом, то, за формулою Жуковського, мінімальна швидкість потоку при досяганні якої відбувається руйнування металу труби, дорівнює:

$$[V_0] = \frac{[p]}{\rho \cdot C_V} = \frac{51,88 \cdot 10^6}{1040 \cdot 1329,7} = 37,5 \text{ м/с,} \quad (4)$$

де  $C_V$  – швидкість поширення ударної хвилі, м/с, [2]:

$$C_V = \frac{1}{\sqrt{\frac{\rho}{E_{\text{pid}}} + \frac{\rho \cdot D}{E_{\text{mp}} \cdot \delta}}}, \quad (5)$$

де  $E_{\text{pid}}$  – модуль пружності води, Па;  $E_{\text{mp}}$  – модуль пружності сталі (матеріалу трубопроводу), Па;  $D$  – внутрішній діаметр трубопроводу, м;  $\delta$  – товщина стінок трубопроводу, м.

Прийнявши за довідником  $E_{\text{pid}} = 2,2 \cdot 10^9$  Па,  $E_{\text{mp}} = 1,6 \cdot 10^{11}$  Па, а за матеріалами замовника  $D = 0,100$  м,  $\delta = 0,007$  м,  $\rho = 1040$  кг/м<sup>3</sup>, визначаємо:

$$C_V = \frac{1}{\sqrt{\frac{1040}{2,2 \cdot 10^9} + \frac{1040 \cdot 0,100}{1,6 \cdot 10^{11} \cdot 0,007}}} = 1329,7 \text{ м/с.} \quad (6)$$

Перепад тисків можна прийняти рівним різниці тисків у технологічному трубопроводі  $p_1$  і магістральному трубопроводі  $p_2$ :

$$\Delta p = p_1 - p_2 = 9,31 - 2,94 = 6,37 \text{ МПа.} \quad (7)$$

Якщо припустити, що цей перепад тисків, визначений за формулою (7), був втрачений між сепаратором С-1-6П і теплообмінником Т-6П, то можна обчислити середню швидкість руху продукту в трубопроводі.

$$\Delta p = \rho \cdot g \cdot H ;$$

$$H = \sum h_l + \sum h_m + \frac{V_0^2}{2 \cdot g}, \quad (8)$$

де  $\sum h_l$  – втрати напору по довжині;  $\sum h_m$  – втрати напору на місцевих опорах.

Втрати напору вздовж ушкодженої ділянки трубопроводу відповідно до [3]:

1) місцевий опір – поворот  $90^\circ$  (труба діаметром  $114 \times 7$  мм) – 8 шт.  
 $\zeta_{90^\circ} = 0,23 \cdot 8 = 1,84$ ;

2) місцевий опір – вихід в трубу від сепаратора  $\zeta_{вих} = 0,2$ ;

3) місцевий опір – вхід у теплообмінник  $\zeta_{вх} = 1,0$ ;

4) по довжині (труба діаметром  $114 \times 7$  мм) – довжина  $l = 15,02$  м.

Коефіцієнт гідравлічного тертя для сталевих ненових труб  $\lambda = 0,02$ . Внутрішній діаметр трубопроводу  $D = 0,100$  м.

$$H \cong \left( \lambda \cdot \frac{1}{D} + \sum \zeta + 1 \right) \cdot \frac{V_0^2}{2 \cdot g}. \quad (9)$$

Звідси знайдемо витрату:

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot \sqrt{g \cdot H}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\lambda \cdot \frac{1}{D} + \sum \zeta + 1}} = \frac{3,14 \cdot 0,100^2 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 624,25}}{2 \cdot 1,41 \cdot \sqrt{0,02 \cdot \frac{15,02}{0,100} + 1,84 + 1 + 0,2 + 1}} = 0,3285, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (10)$$

Миттєва середня швидкість руху рідини при такій витраті могла становити:

$$V_0 = \frac{Q}{F} = \frac{0,3285 \cdot 4}{3,14 \cdot 0,100^2} = 41,85 \text{ м/с}. \quad (11)$$

Величина перевищення тиску рідини у випадку гідроудару могла складати за формулою Жуковського [2]:

$$\Delta p = \rho \cdot V_0 \cdot C_V, \quad (12)$$

де  $\rho$  – густина рідини,  $\text{кг/м}^3$ ;  $V_0$  – швидкість руху рідини в трубопроводі,  $\text{м/с}$ ;  $C_V$  – швидкість поширення ударної хвилі,  $\text{м/с}$ .

Перевищення тиску при цьому могло становити:

$$\Delta p = \rho \cdot V_0 \cdot C_V = 1040 \cdot 41,85 \cdot 1329,7 = 57,87 \text{ МПа}. \quad (13)$$

Перевіряємо умову руйнування стінки теплообмінника:

$$[\Delta p] < \Delta p; \quad (14)$$

$$[51,88] < 57,87.$$

Умова виконується, отже руйнування стінки теплообмінника за рахунок втрати міцності труби могло статися при умові виникнення гідравлічного удару.

**Висновки.** Створено методику перевірки факту проходження гідрудару під час експлуатації газозбірної системи газових промислів, які експлуатують свердловини із значним водним фактором газового потоку. Методику можливо використати як для технологічних розрахунків для діючих об'єктів, так і в рамках навчального процесу, оскільки її сформовано на базі опрацювання нормативних документів, теорії гідравлічного удару Жуковського та методик гідравлічних і міцнісних розрахунків посудин, що працюють під тиском.

#### Література

1. ГОСТ 14249-89 «Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность»
2. Константинов Д.М. Інженерна гідравліка / Д.М. Константинов, О.О. Гіжа – К.: Видавничий Дім «Слово». 2006. – 432 с.
3. Альтшуль А.Д. Гидравлические сопротивления / А.Д. Альтшуль. 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Недра. 1982. – 224 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. GOST 14249-89 «Sosudyi i apparaty. Normyi i metodyi rascheta na prochnost».
2. Konstantinov D.M. Inzhenerna gidravlika D.M. Konstantinov, O.O. Gizha – K.: Vidavnichiy Dim «Slovo». 2006. – 432 p.
3. Altshul A.D. Gidravlicheskie soprotivleniya A.D. Altshul. 2-e izd. pererab. i dop. – M.: Nedra. 1982. – 224 p.

УДК 622.691.4

Братах М.И., Рузина И.М., Сероус В.С., Криволапчук И.П.

#### **МЕТОДИКА РАСЧЕТА УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ГИДРОУДАРА**

В статье представлена оценка возможности образования явления гидравлического удара в сложной газосборной системе месторождений со значительным водным фактором. Представленный способ базируется на проверке допустимых напряжений при разрушении стенки трубопровода при гидравлическом ударе.

Bratakh M.I., Ruzina I.M., Sirous V.S., Krivolapchuk I.P.

#### **METHOD OF CALCULATION CONDITIONS OF WATER HAMMER ORIGIN**

The article presents an estimation of the possible formation of water hammer phenomenon in a complex gas gathering system of gas field with significant water factor. The present method is based on checking the allowable stress at failure of the pipeline wall under the pressure of water hammer.

УДК 629.7.036

Кобец Е.В., Загребельная Л.И.

## НЕСТАЦИОНАРНАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РЕГУЛИРУЮЩЕГО КАВИТАЦИОННОГО УСТРОЙСТВА

Использование гидродинамической кавитации в промышленных жидкостных двигательных установках позволяет значительно снизить удельные энергетические затраты.

Критические потоки жидкости с параметрами насыщения, претерпевающие в пределах сужающихся каналов фазовые превращения, вызывают устойчивый интерес в различных областях техники. Особое внимание этим вопросам уделяется при разработке элементов регулирующих устройств жидкостных ракетных двигателей.

Рассмотрим нестационарную математическую модель первичного преобразователя давления в расход топлива [1].

Основное отличие потока кавитирующей жидкости состоит в том, что течение в этом случае сопровождается сложными процессами тепло- и массообмена между фазами, их скольжением относительно друг друга, а возможно, и нарушением термодинамического равновесия. Указанные явления вносят большие погрешности в теоретический анализ из-за их недостаточной изученности.

Сравнительно просто критические параметры в текущей жидкости реализуются в кавитационной трубке (рис. 1). При возникновении развитой кавитации в горловине трубки после разворота потока жидкости резко уменьшается скорость звука в связи с фазовым переходом, а скорость потока парожидкостной смеси достигает критического значения. За наиболее узким сечением скорость смеси продолжает возрастать до момента конденсации пара. При конденсации наблюдается ее скачкообразное уменьшение. Так как жидкость выходит из горловины сопла при скорости, равной скорости звука двухфазной среды, то волны давления не в состоянии распространяться с выхода трубки на вход. По мере уменьшения давления в выходной части рассматриваемого устройства достигается такой его уровень, ниже которого массовый расход становится нечувствительным к его величине. Дальнейшее понижение давления вниз по потоку увеличивает протяженность кавитационной зоны, наращивая потери, что и способствует поддержанию постоянства расхода с некоторой статической неравномерностью, которая и используется в качестве полезного сигнала.

В целях наиболее достоверного описания нестационарной математической модели первичного преобразователя давления в расход проведен ряд экспериментальных исследований по визуализации качественных картин течения на специально изготовленных, прозрачных плоской и объемной моделях его проточной части.

Очевидно, что режим развитой кавитации в рассматриваемой схеме характеризуется наличием, по крайней мере, двух зон: тороидальной кольцевой каверны, объем  $V_{\Pi}$  которой заполнен газами и парами при весьма низком давлении, и зоны пузырькового двухфазного течения в объеме  $V_{см}$ . Анализ снимков, полученных при проведении качественного эксперимента, показывает, что смесевое интенсивно насыщенное пузырьками течение возникает в самом узком сечении струи, обусловленном эффектом отрыва потока, и распространяется вдоль диффузора на некоторую глубину  $l_x$ . Далее следует резко разграниченный переход к мелкодисперсному характеру насыщенности жидкости парогазожидкостными включениями.

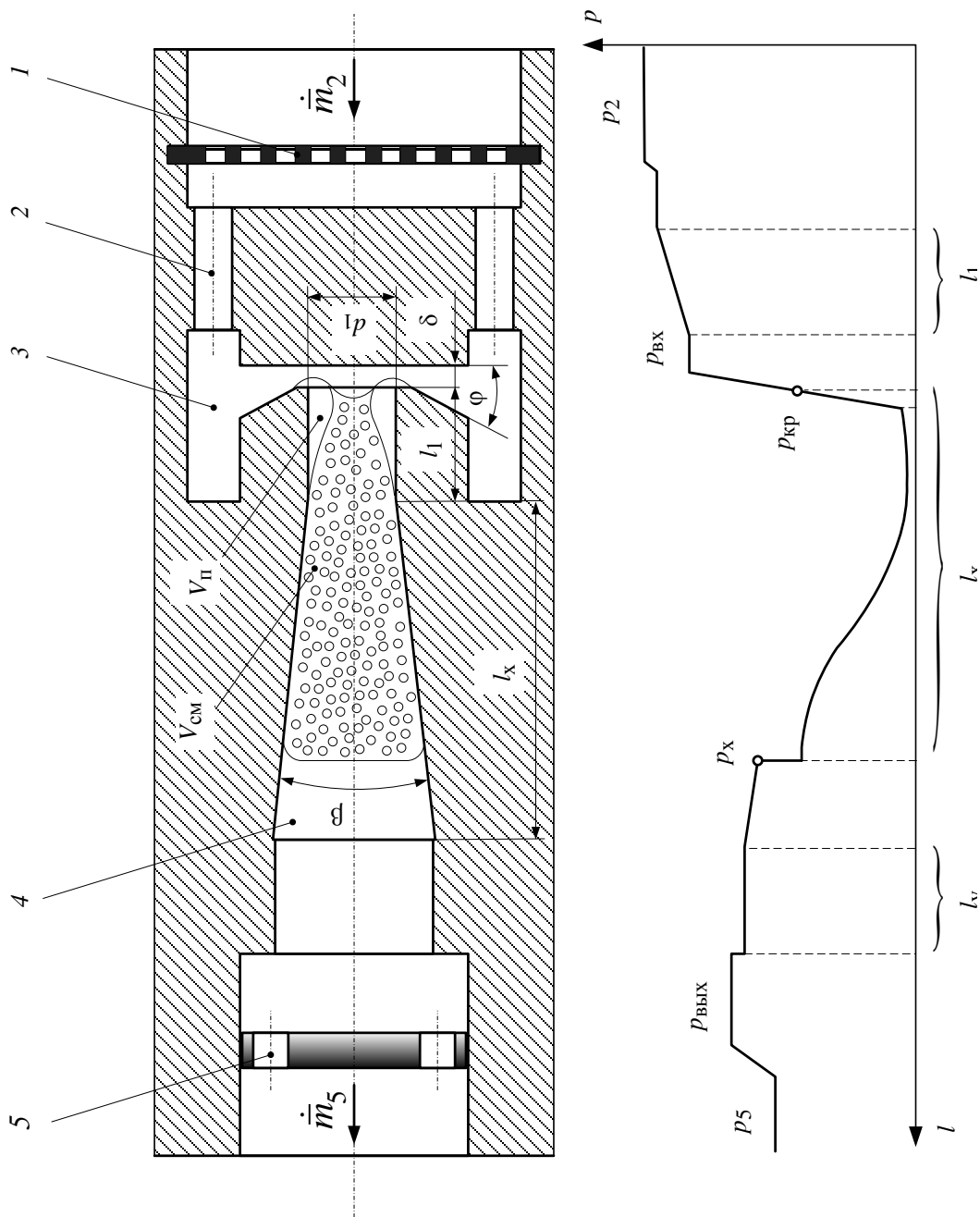


Рисунок 1 – Схема течения в преобразователе давления в расход: 1 – сетчатый фильтр; 2 – входные каналы секторного типа; 3 – входная кольцевая полость; 4 – диффузор; 5 – дроссельное сопротивление на выходе

Известно, что даже с заметным увеличением площади поперечного сечения струи вниз по течению давление в ней не восстанавливается в соответствии с падением скорости, т. к. имеют место существенные потери энергии [2]. Тем не менее, продвижение двухфазной среды по диффузору сопровождается плавным повышением давления вплоть до границы резкого фазового перехода, расстояние до которого оценивается размером  $l_x$ . В объеме  $V_{см}$  парогазовые включения, вероятно, имеют переменную структуру как по размеру пузырьков, так и по качественному распределению их в единице объема.

Сложность и многообразие физических процессов, происходящих в первичном преобразователе, привели к необходимости принять ряд следующих основных допущений при описании его математической модели:

- жидкость достаточно дегазирована, чтобы давление в присоединенной камере и пузырьковом образовании считать приблизительно равным давлению ее насыщенных паров;
- время установления термодинамического равновесия между фазами существенно меньше периода колебания параметров, определяющих течение в кавитационных зонах, что справедливо для низкочастотных режимов возмущений (менее 50 Гц);
- унос паровой фазы из зон кавитационных образований почти отсутствует;
- движение пузырьков в объеме  $V_{см}$  происходит без скольжения;
- стенки проточной части абсолютно жесткие, жидкость в низкочастотном диапазоне возмущений несжимаема, а ее вязкостные свойства почти не проявляются;
- влияние со стороны скоростного напора на энергосодержание жидкости во входных и выходных полостях первичного преобразователя очень мало.

При выводе системы уравнений, описывающей динамические свойства первичного преобразователя, использованы уравнения количества движения и неразрывности для среды, текущей в элементах рассматриваемого устройства [3].

Полученные уравнения динамической системы запишем по основным участкам первичного преобразователя, параметры обозначены по сечениям (см. рис. 1):

- уравнения на входе

$$p_2 = R_{вх} \dot{m}_2^2, \quad (1)$$

где  $R_{вх}$  – коэффициент активного сопротивления;

- уравнение границы зоны смесового пузырькового течения

$$p_x = \frac{1}{2\rho_{ж} F_x} \left\{ \left[ \left( \frac{F_x}{\varepsilon F_{кр}} \right)^2 - \frac{\psi_y}{(1-\varphi)^2} \right] \dot{m}_2^2 + \frac{2\psi_y}{1-\varphi} \dot{m}_2 \dot{m}_5 - (1 + \psi_y) \dot{m}_5^2 \right\}, \quad (2)$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность рабочей жидкости;  $F_{кр}$ ,  $F_x$  – площади в критическом сечении и в сечении фазового перехода от смеси к жидкости;  $\varepsilon$  – степень сжатия потока;  $\psi_y$  – коэффициент полноты удара;  $\varphi$  – коэффициент парогазонасыщения пузырьковой зоны;



- уравнение на выходе

$$p_5 = p_x + \frac{1}{2\rho_{ж}F_x^2}\dot{m}_5^2, \quad (3)$$

- уравнение смесевой емкости

$$(1-\varphi)\frac{dV_{см}}{dt} = \frac{1}{\rho_{ж}}(\dot{m}_2 - \dot{m}_5). \quad (4)$$

При этом значение площади сечения фазового перехода от смеси к жидкости  $F_x$  и величину объема смесевой зоны  $V_{см}$  определяем из соотношений

$$F_x = \pi \left[ (l_x - l_1) \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} + r_1 \right]^2, \quad (5)$$

$$V_{см} = \frac{\pi(l_x - l_1)}{3} \left[ (l_x - l_1)^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\beta}{2} + 3r_1 \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} (l_x - l_1) + 3r_1^2 \right] + \pi r_1^2 l_1 - V_{п}. \quad (6)$$

Рассматриваемый первичный преобразователь давления в расход основную часть времени работает в составе корректора режима двигательной установки в диапазоне ограниченных отклонений от некоторого номинального состояния параметров, поэтому конечную систему уравнений, описывающую его динамические свойства, удобно представить в линеаризованной форме с обезразмеренными параметрами:

$$\begin{aligned} \rho \bar{p}_2 &= \kappa_1 \delta \dot{\bar{m}}_2; \\ \rho \bar{p}_x &= \kappa_2 \delta \dot{\bar{m}}_2 - \kappa_3 \delta \dot{\bar{m}}_5 + \kappa_4 \delta \dot{\bar{l}}_x; \\ \rho \bar{p}_5 &= \rho \bar{p}_x - \kappa_5 \delta \dot{\bar{l}}_x + \kappa_6 \delta \dot{\bar{m}}_5; \\ \tau_l \frac{d\delta \dot{\bar{l}}_x}{dt} &= \delta \dot{\bar{m}}_2 - \delta \dot{\bar{m}}_5, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} \kappa_1 &= 2\bar{p}_2^*; & \kappa_2 &= \lambda \left[ \frac{\bar{F}_x^{*2}}{\varepsilon^2} - \frac{\Psi_y \varphi}{(1-\varphi)^2} \right]; & \kappa_3 &= \lambda \left( 1 - \frac{\Psi_y \varphi}{1-\varphi} \right); \\ \kappa_4 &= \lambda \bar{F}_x^* \left( \frac{\partial \bar{F}_x}{\partial \bar{l}_x} \right)^* \left[ \frac{1}{\varepsilon^2 \xi_{\text{конф}}^*} - \frac{\bar{p}_x^*}{\bar{p}_2^*} \right] \xi_{\text{конф}}^*; & \kappa_5 &= \frac{\lambda}{\bar{F}_x^*} \left( \frac{\partial \bar{F}_x}{\partial \bar{l}_x} \right)^*; \\ \kappa_6 &= \lambda \tau_l \frac{2\pi r_1^3 \rho_{ж} (1-\varphi) \bar{\delta}}{\dot{m}_{п}^*} \bar{F}_x^*; & \lambda &= \frac{2\bar{p}_2^*}{\xi_{\text{конф}}^* \bar{F}_x^{*2}}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\bar{F}_x^* &= \frac{F_x}{F_{кр}} = \frac{0,5}{\bar{\delta}} \left[ (\bar{l}_x^* - \bar{l}_1) \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} + 1 \right] \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}; \\ \left( \frac{\partial \bar{F}_x}{\partial l} \right)^* &= \frac{1}{\bar{\delta}} \left[ (\bar{l}_x^* - \bar{l}_1) \operatorname{tg} \frac{\beta}{2} + 1 \right] \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}; \quad \delta \bar{p}_i = \frac{\delta p_i}{P_{п}^*} S_{п}; \\ \bar{p}_i^* &= \frac{p_i}{P_{п}^*} S_{п}; \quad \delta \dot{m}_i = \frac{\delta \dot{m}}{\dot{m}_{п}^*}; \quad \delta \bar{l}_x = \frac{\delta l_x}{r_1}; \quad \bar{\delta} = \frac{\delta}{r_1}.\end{aligned}$$

После несложных математических преобразований системы (7) получим уравнение преобразователя давления в расход в удобной для анализа операторной форме:

$$(T_{п} p + 1) \delta \dot{m}_5 = \frac{1}{\kappa_1} (1 - \tau_{п}^* p) \delta \bar{p}_2 + \tau_{п}^{**} p \delta \bar{p}_5, \quad (8)$$

где  $T_{п} = \frac{\tau_l (\kappa_6 - \kappa_3)}{\kappa_5 - \kappa_4}$  – постоянная времени преобразователя;  $\tau_{п}^* = \frac{\tau_l \kappa_2}{\kappa_5 - \kappa_4}$  – постоянная

времени воздействия по производной от  $\delta \bar{p}_2$ ;  $\tau_{п}^{**} = \frac{\tau_l}{\kappa_5 - \kappa_4}$  – постоянная времени воз-

действия по производной от  $\delta \bar{p}_5$ .

Таким образом, преобразователь в режиме малых отклонений описывается уравнением апериодического звена первого порядка с воздействием по отклонениям давления на входе и его производной. Влияние выходного давления проявляется лишь на нестационарных режимах его работы [4].

Для стендовых условий проливки, когда на выходе из преобразователя устанавливается дроссельное устройство с постоянным проходным сечением, однозначность зависимости (8) обеспечивается дополнительным соглашением вида:

$$\delta \dot{m}_5 = \frac{1}{\kappa_7} \delta \bar{p}_5, \quad (9)$$

где  $\kappa_7$  – коэффициент сопротивления дроссельного устройства в режиме малых отклонений.

Подстановка уравнения (9) в (8) приводит к однозначной операторной зависимости отклонения расхода из преобразователя от возмущения по давлению его на входе:

$$\delta \dot{m}_5 = \frac{\frac{1}{\kappa_1} (1 - \tau_{п}^* p)}{\left( T_{п} - \frac{\tau_{п}^{**}}{\kappa_7} \right) p + 1} \delta \bar{p}_2. \quad (10)$$

При ступенчатом характере изменения давления перед преобразователем на величину  $\delta \bar{p}_2^*$ , используя вторую теорему разложения Хевисайда, получим изменение расхода в зависимости от времени:

$$\delta \dot{m}_5(t) = \frac{\delta \bar{p}_2^*}{\kappa_1} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{\kappa_2}{\kappa_6 - \kappa_3 - \frac{1}{\kappa_7}} \right) e^{-\frac{\kappa_5 - \kappa_4}{\tau_l \left( \kappa_6 - \kappa_3 - \frac{1}{\kappa_7} \right)} t} \right]. \quad (11)$$

Из выражения (5) видно, что переходная характеристика преобразователя в рассмотренном частном случае описывается экспоненциальной кривой, начинающейся

при  $t = 0$  от уровня  $\frac{\delta \bar{p}_2^*}{\kappa_1} \left[ 1 - \left( 1 + \frac{\kappa_2}{\kappa_6 - \kappa_3 - \frac{1}{\kappa_7}} \right) \right]$  и асимптотически приближающейся при

$t \rightarrow \infty$  к горизонтальной прямой  $\frac{\delta \bar{p}_2^*}{\kappa_1}$  с постоянной времени  $\frac{\tau_l \left( \kappa_6 - \kappa_3 - \frac{1}{\kappa_7} \right)}{\kappa_5 - \kappa_4}$ .

В составе регулирующего устройства закон изменения первой производной от давления на выходе  $p \delta \bar{p}_5$  определяется динамическими свойствами последующих звеньев в корректоре режима.

Предлагаемый первичный преобразователь высокого давления в расход по своим динамическим свойствам способен обеспечить эффективную работоспособность корректора режима двигательной установки.

#### Литература

1. Гуськов В.П. Нестационарная математическая модель первичного преобразователя в расход / В.П. Гуськов, Е.В. Кобец // Высокотемпературные газовые потоки, их получение и диагностика: сборник научных трудов. – Харьков. ХАИ, 1991. – С. 24–31.
2. Борисенко А.И. Газовая динамика двигателей / А.И. Борисенко. – М. Наука, 2002. – 793 с.
3. Венгерский Э.В. Гидродинамика двухфазных потоков в системах питания энергетических установок // Э.В. Венгерский, В.А. Морозов, Г.Л. Усов. – М.: Наука, 1982. – 128 с.
4. Steam Bubble Cavitation / Mahulkar A.V., Vapat P.S., Pandit A.B., Lewis F.M. // AIChE Jurnal. – 2008. – Vol. 54. – №7. – P. 1711–1724.

#### Bibliography (transliterated)

1. Guskov V.P. Nestatsionarnaya matematicheskaya model pervichnogo preobrazovatelya v rashod V.P. Guskov, E.V. Kobets Vvisokotemperaturnye gazovyye potoki, ih poluchenie i diagnostika: sbornik nauchnyih trudov. – Harkov. HAI, 1991. – P. 24–31.
2. Borisenko A.I. Gazovaya dinamika dvigateley A.I. Borisenko. – M. Nauka, 2002. – 793 p.

3. Vengerskiy E.V. Gidrodinamika dvuhfaznyih potokov v sistemah pitaniya energeticheskikh ustanovok E.V. Vengerskiy, V.A. Morozov, G.L. Usov.– M.: Nauka, 1982.– 128 p.

4. Steam Bubble Cavitation Mahulkar A.V., Bapat P.S., Pandit A.B., Lewis F.M. AIChE Jurnal. – 2008. – Vol. 54. – #7. – P. 1711–1724.

УДК 629.7.036

Кобець О.В., Загребельна Л.І.

**НЕСТАЦІОНАРНА МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РЕГУЛЮЮЧОГО  
КАВІТАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ**

Розглядається нестационарна математична модель регулюючого кавітаційного обладнання, що працює в рідинних ракетних двигунах.

Kobets E.V., Zagrebelnaj L.I.

**NONSTATIONARY MATHEMATICAL MODEL OF THE GOVERNING  
CAVITATIONAL DEVICE**

The nonstationary mathematical model of the governing cavitation device working in liquid rocket drives is considered.

УДК 622.691.4

Коляденко В.А., Соболева А.В., Кузнєцова Т.О., Недільський Д.В.

### **РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ РУХУ ОЧИСНОГО ПОРШНЯ**

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** В нафтогазовій галузі важливо вміти правильно застосовувати на практиці вимоги нормативних документів, адже порушення їх вимог, як правило, призводить до аварійних ситуацій або відмов, супроводжується збільшенням матеріальних та часових ресурсів для подолання наслідків аварійної ситуації.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Розгляд питання проведено для очисних операцій після гідровипробування конденсатопроводу, параметри проведення яких регламентовано нормативним документом [1].

Таблиця 1 – Допустимі та нормативні величини відповідно до [1]

Параметр потоку	Значення
Швидкість переміщення поршня-розділювача під час видавлювання води (відповідно до п. 9.8), не менше	5,0 км/год
Максимально допустима швидкість поршня під час очистки підземних і наземних ділянок трубопроводів (відповідно до п. 7.17.9)	70 км/год
Максимально допустима швидкість поршня під час очищення надземних ділянок трубопроводів (відповідно до п. 7.17.15)	10 км/год
Мінімальний перепад тиску на очисному пристрої (відповідно до табл. 12.2)//втрати напору	0,1 МПа (1,0 кгс/см <sup>2</sup> )//10 м
Втрати напору, віднесені до 1 км трубопроводу (відповідно до табл. Б.1)	10,491 м

Недотримання вимог цього нормативного документа призвело до застрягання поршня в порожнині трубопроводу в одному із його колін на якомусь орієнтовному кілометрі. Причиною цього могла стати як помилка розрахунку мас рідини, що має бути витиснена з трубопроводу після гідровипробування, так і зовнішні причини, наприклад, наявність будівельного сміття в порожнині трубопроводу, раптове падіння робочого тиску під час продування трубопроводу тощо.

**Формулювання цілі статті.** Основною метою роботи є перевірка можливості надання руху застряглому поршню за допомогою створення необхідного початкового тиску газу на ділянці трубопроводу, що очищається. В навчальному ж процесі основною метою є формування у майбутнього спеціаліста інженерного рішення на основі сукупного використання як нормативних документів, так і літературних джерел.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** Вихідні дані до розрахунку представлено в табл. 2.

Таблиця 2 – Вихідні дані до розрахунку:

Параметр потоку	Значення
Довжина трубопроводу	27000 м
Технічна характеристика (діаметр x товщина стінки)	325x7 мм
Точка застрягання поршня (орієнтовно)	16000 м
Максимальний перепад висот на ділянці трубопроводу (від точки застрягання поршня до кінця трубопроводу)	24 м
Щільність поршня	500–600 кг/м <sup>3</sup>
Вага поршня	25 кг
Тип поршня	Еластичний полімерний
Густина забруднень	1000 кг/м <sup>3</sup>
Орієнтовна витрата природного газу для продування (очистки) трубопроводу	5000 м <sup>3</sup> /год (0,12 млн. м <sup>3</sup> /добу)
Основний вид виконуваних робіт	Витискання води із трубопроводу після гідровипробування
Орієнтовна витрата води, що витісняється	500 м <sup>3</sup> /год
Умови витіснення рідини	Витіснення води з порожнини трубопроводу здійснюється у ємності при атмосферному тиску
Температура робочого середовища	285 К
Коефіцієнт стискання газу	0,96

Алгоритм розрахунку наступний:

1. Розрахунок режиму початкового тиску в точці застрягання поршня-розділювача (згідно з вимогами додатку Б [1]).

Втрати тиску на продування цієї ділянки складатимуться з гравітаційних втрат на подолання нерівномірності рельєфу  $h_{геод}$ , втрат на тертя під час переміщення поршня опору  $h_{оп}$ , переміщення газу, води і забруднень  $h_{тертя}$ :

$$\Delta P = \rho \cdot g \cdot (h_{геод} + h_{оп} + h_{тертя}) = 1000 \cdot 9,81 \cdot (24 + 10 + 10,491 \cdot 11,0) = 1,132 \text{ МПа} = 11,55 \text{ кгс/см}^2. \quad (1)$$

Враховуючи те, що приймання води під час витіснення її еластичним поршнем-розділювачем здійснюється в умовах атмосферного тиску, мінімально допустима величина тиску на під час відновлення його руху на 16 км траси має становити

$$P_{роб} = 1,132 \text{ МПа або } 11,55 \text{ кгс/см}^2.$$

2. Розрахунок швидкості руху очисного пристрою

Лінійна швидкість руху очисного пристрою залежить від витрати природного газу з джерела або ресивера, технічної характеристики ділянки і параметрів тиску і температури [2]:

$$\omega = 0,0054 \frac{Q \cdot z_{cp} \cdot T_{cp}}{P_{роб} \cdot D_e^2}, \quad (2)$$

де  $Q$  – номінальна витрата газу, млн.м<sup>3</sup>/добу;  $z$  – коефіцієнт стисливості газу;  $T_{cp}$  – середня температура газу по трасі газопроводу, К;  $P_{ex}$  – вхідний тиск в регулятор, МПа;  $D_e$  – внутрішній діаметр газопроводу, м.

$$\omega = 0,0054 \frac{Q \cdot z_{cp} \cdot T_{cp}}{P_{роб} \cdot D_e^2} = 0,0053 \frac{0,12 \cdot 0,96 \cdot 285}{1,132 \cdot 0,311^2} = 1,62 \text{ м/с} = 5,83 \text{ км/год}.$$

### 3. Визначення тиску в початковій точці трубопроводу

На ділянці до 16 км траси слід пропустити очисний пристрій, який рухатиметься під дією тиску природного газу, або створити умови для продування ділянки трубопроводу.

Початковий тиск в трубопроводі, що забезпечить проходження поршня із оптимальною швидкістю визначають за формулою [3]:

$$P_{поч} = n \cdot \left( \Delta p + \frac{P_{роб}}{\sqrt{1 - 2 \cdot a \cdot \omega^2 \cdot L}} \right), \quad (3)$$

де  $n$  – коефіцієнт запасу (приймаємо рівним 2);  $\Delta p$  – опір переміщенню очисного пристрою, МПа;  $P_{роб}$  – робочий тиск в точці застрягання поршня-розділювача, МПа;  $L$  – довжина очищеної ділянки, м.

Коефіцієнт  $a$  визначають за формулою:

$$a = \frac{\lambda}{2 \cdot R \cdot T \cdot D}, \quad (4)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт гідроопору ділянки трубопроводу (приймаємо рівним 0,03);  $R$  – газова стала:

$$R = \frac{R_{пов}}{\Delta} = \frac{288}{0,6} = 480 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}, \quad (5)$$

де  $\Delta$  – відносна густина газу за повітрям (для інженерних розрахунків газоконденсатних родовищ України, приймаємо рівним 0,6).

$$a = \frac{\lambda}{2 \cdot R \cdot T \cdot D} = \frac{0,03}{2 \cdot 480 \cdot 285 \cdot 0,311} = 3,526 \cdot 10^{-7};$$

$$P_{поч} = n \cdot \left( \Delta p + \frac{P_{роб}}{\sqrt{1 - 2 \cdot a \cdot \omega^2 \cdot L}} \right) =$$

$$= 2 \cdot \left( 0,1 + \frac{1,132}{\sqrt{1 - 2 \cdot 3,526 \cdot 10^{-7} \cdot 1,62^2 \cdot 16000}} \right) = 2,498 \text{ МПа} = 25,48 \text{ кгс/см}^2.$$

#### 4. Визначення необхідної продуктивності подачі газу

Нормативним документом обмежено швидкість пропускання поршня для лінійних ділянок підземного та надземного типу від 5 км/год до 10 км/год, продуктивність, що відповідатиме таким швидкостям, знаходитиметься в межах:

$$Q_{необ} = 185,2 \frac{\omega \cdot P_{роб} \cdot D^2}{z \cdot T} = 185,2 \frac{(1,392 \div 2,785) \cdot 1,132 \cdot 0,311^2}{0,96 \cdot 285} \quad (6)$$

$$= 0,1032 \div 0,2064 \text{ млн. м}^3 / \text{добу} = 4300 \div 8600 \text{ м}^3 / \text{год} = 71,7 \div 143,3 \text{ м}^3 / \text{хв.}$$

**Висновки.** Отже, створивши певний початковий тиск на рівні 2,5 МПа, поршню буде надано оптимальної швидкості, яка забезпечить переміщення рідини перед ним в пробковому режимі і повне витискання останньої з порожнини трубопроводу.

Розрахункові параметри потоку представлено в табл. 3.

Таблиця 3 – Розрахункові параметри потоку

Параметр потоку	Значення
Початковий тиск в трубопроводі	(2,5 МПа) 25,48 кгс/см <sup>2</sup>
Тиск в точці застрягання очисного пристрою для відновлення його руху і виштовхування води	(1,13 МПа) 11,55 кгс/см <sup>2</sup>
Необхідна витрата газу для забезпечення оптимальної швидкості очисного поршня	4,3÷8,6 тис.м <sup>3</sup> /год

Розрахунок, в якому використано реальні дані організації-підрядника виконання робіт, може бути використано в рамках курсів технології проектування об'єктів нафтогазової галузі, технології проведення певного виду робіт або спорудження протяжних об'єктів для транспортування вуглеводневих потоків з метою формування у майбутнього спеціаліста галузі інженерних та технічних рішень, суть яких базується на системному аналізі діючих нормативних документів та теоретичних основ збору і транспорту вуглеводнів, зокрема рівнянь стану природного газу, нерозривності потоку, балансу повної енергії та основного рівняння трубопроводів.

#### Література

1. ВБН В. 2.3.-00013741-09:2009 Магістральні трубопроводи. Будівництво. Лінійна частина. Очищення порожнини та випробування.



2. Деточенко А.В. Спутник газовика / А.В. Деточенко, А.Л. Михеев, М.М. Волков.– М: Недра. 1978. – 311 с.

3. Чирсков В.Г. Строительство магистральных трубопроводов. Справочник / В.Г. Чирсков, В.Л. Березин, Л.Г. Телегин и др. М.: Недра. 1991. – 475 с.

**Bibliography (transliterated)**

1. VBN V. 2.3.-00013741-09:2009 Magistralni truboprovodi. Budivnitstvo. Liniyna chastina. Ochischennya porozhnini ta viprobuvannya.

2. Detochenko A.V. Sputnik gazovika A.V. Detochenko, A.L. Miheev, M.M. Volkov.– М: Nedra. 1978. – 311 p.

3. Chirskov V.G. Stroitelstvo magistralnyih truboprovodov. Spravochnik V.G. Chirskov, V.L. Berezin, L.G. Telegin i dr. М.: Nedra. 1991. – 475 p.

УДК 622.691.4

Коляденко В.А., Соболева А.В., Кузнецова Т.О., Недельский Д.В.

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ОЧИСТНОГО ПОРШНЯ**

На основе анализа и систематизации требований нормативных документов и научно-технической литературы разработана и реализована на практике методика определения начального давления, необходимого для приведения в движение застрявшего в трубопроводе очистного поршня. Обоснована оптимальная скорость очистного поршня на уровне 4–8 м/с и возможность использования энергии природного газа для очистки трубопроводов после гидроиспытания.

Kolyadenko V.A., Sobolev A.V., Kuznetsova T.S., Nedelsky D.V.

**CALCULATION OF PIG MOVEMENT PARAMETRES**

On the basis of analysis and systematization of regulatory requirements and scientific and technical literature a method of determining the initial and required to start the movement pig jammed in the pipeline pressure was developed and put into practice. The optimal speed of the pig at 4–8 m / s and the use of natural gas energy for pigging pipelines after testing was substantiated.

УДК: 681.5.033

Подустов М.А., Бобух А.А., Ковалёв Д.А.

## АЛГОРИТМ ПСЕВДООПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

### Введение

Одной из задач, возникающих при проектировании компьютерно-интегрированных систем управления технологическими процессами (КИСУ ТП) [1] непрерывных динамических систем, является разработка достаточно простых и удобных для вычисления алгоритмов управления такими системами. Это связано в первую очередь с тем, что решение задачи управления в традиционной постановке и общепринятыми методами приводит к сложным вычислительным процедурам, не пригодным для управления в реальном масштабе времени. Поэтому определенный интерес представляют в настоящее время различные псевдооптимальные алгоритмы управления, позволяющие упростить процесс управления без ощутимой потери его качества.

### Цель работы

Разработка алгоритма псевдооптимального управления, который позволит снизить себестоимость выходного продукта управляемой динамической нелинейной системы при заданном его качестве.

### Основная часть

Рассмотрим задачу управления некоторой, в общем случае нелинейной, динамической системой с двумя выходами, находящейся в режиме нормального функционирования. Такую систему, без ограничения общности для полученных далее результатов, можно описать, в предположении малых отклонений от режима нормального функционирования, линейными разностными уравнениями с постоянными коэффициентами:

$$x(k+1) = a^T X(k) + b^T U(k) + q^T G(k), \quad (1)$$

$$y(k+1) = h^T Y(k) + d^T U(k) + e^T G(k), \quad (2)$$

где  $X(k) = \begin{pmatrix} x(k) \\ x(k-1) \\ \vdots \\ x(k-n+1) \end{pmatrix}$ ,  $Y(k) = \begin{pmatrix} y(k) \\ y(k-1) \\ \vdots \\ y(k-f+1) \end{pmatrix}$ ,  $U(k) = \begin{pmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ \vdots \\ u_l(k) \end{pmatrix}$ ,  $G(k) = \begin{pmatrix} g_1(k) \\ g_2(k) \\ \vdots \\ g_m(k) \end{pmatrix}$ ;

$X(k)$  и  $Y(k)$  – векторы выхода системы  $n \times I$  и  $f \times I$  соответственно;  $U(k)$  – вектор управлений системой  $l \times I$ ;  $G(k)$  – вектор возмущений, действующих на систему  $m \times I$ ;  $a^T, b^T, q^T, h^T, d^T, e^T$  – транспонированные векторы коэффициентов, которые получены в результате идентификации исследуемой системы, как это рассмотрено в [2–4], и размерности которых, равны, соответственно  $I \times n$ ,  $I \times f$ ,  $I \times l$ ,  $I \times m$ .

Положим, что задана диагональная матрица стоимости управляющих воздействий:

$$C = S^T I = \begin{pmatrix} c_{11} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & c_{22} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & c_{ll} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где  $S^T$  – транспонированный вектор стоимости управляющих воздействий  $l \times I$ ;  $I$  – единичная матрица.

Теперь, при заданной матрице стоимости управляющих воздействий (3), можно определить задачу управления динамической системой (1), (2) как задачу стабилизации на заданном уровне величин  $x(k+1)$  и  $y(k+1)$ , характеризующих «качество» выходного продукта, при минимуме затрат на изменение управляющих воздействий  $U$ , то есть необходимо минимизировать критерий:

$$I = \Delta U^T C \Delta U, \text{ где } \Delta U = U(k) - U(k-1) \quad (4)$$

при ограничениях в виде равенств:

$$\begin{aligned} \Delta x &= x_0 - x(k) = x(k+1) - x(k) = \\ &= a^T (X(k) - X(k-1)) + b^T (U(k) - U(k-1)) + q^T (G(k) - G(k-1)) = \\ &= a^T \Delta X + b^T \Delta U + q^T \Delta G, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\Delta X = X(k) - X(k-1)$ ,  $\Delta G = G(k) - G(k-1)$ ;  $x_0$  – заданное «качество» выхода  $x$ .

Аналогично получаем

$$\Delta y = y_0 - y(k) = h^T \Delta Y + d^T \Delta U + e^T \Delta G, \quad (6)$$

где  $\Delta Y = Y(k) - Y(k-1)$ ;  $y_0$  – заданное «качество» выхода  $y$ .

Решение задачи управления в приведенной выше постановке стремится к оптимальному при условии малых отклонений от режима нормального функционирования управляемой динамической системы. Минимизация критерия (4) должна обеспечить снижение себестоимости выходного продукта по сравнению с традиционными методами автоматического управления, так как критерий (4) зависит от стоимости входных управляющих воздействий, которые для рассматриваемых динамических систем являются материальными потоками.

Воспользуемся для решения сформулированной задачи оптимизации с ограничениями в виде равенств методом неопределенных множителей Лагранжа [3]. Сформируем функцию  $F$ :

$$F = \Delta U^T C \Delta U + \lambda_1 (\Delta x - a^T \Delta X - b^T \Delta U - q^T \Delta G) + \lambda_2 (\Delta y - h^T \Delta Y - d^T \Delta U - e^T \Delta G), \quad (7)$$

Условиями наличия экстремума функции  $F$  являются:

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial \Delta U} = 2C\Delta U - \lambda_1 b - \lambda_2 d = 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda_1} = \Delta x - a^T \Delta X - b^T \Delta U - q^T \Delta G = 0, \\ \frac{\partial F}{\partial \lambda_2} = \Delta y - h^T \Delta Y - d^T \Delta U - e^T \Delta G = 0 \end{cases} \quad (8)$$

Исключая  $\lambda_1$  и  $\lambda_2$  из системы уравнений (8), можно получить аналитическое выражение для вычисления  $\Delta U$ , для которого приведены новые условные обозначения, индексация и наименование параметра  $k$ :

$$\begin{aligned} \Delta U = C^{-1} & \left( \frac{\Delta x - a^T \Delta X - q^T \Delta G - \frac{k_2}{k_3} (\Delta y - h^T \Delta Y - e^T \Delta G)}{k_1 - \frac{k_2^2}{k_3}} \cdot b + \right. \\ & \left. + \frac{\Delta y - h^T \Delta Y - e^T \Delta G - \frac{k_2}{k_1} (\Delta x - a^T \Delta X - q^T \Delta G)}{k_3 - \frac{k_2^2}{k_1}} \cdot d \right), \end{aligned} \quad (9)$$

где  $k_1 = b^T C^{-1} b$ ,  $k_2 = b^T C^{-1} d = d^T C^{-1} b$ ,  $k_3 = d^T C^{-1} d$ .

Формула (9) представляет собой рекуррентный алгоритм компенсации отклонения от заданного значения величин выходов динамической системы (1), (2) и в развернутом виде записывается как:

$$U(k) = U(k-1) + \varepsilon, \quad (10)$$

где  $\varepsilon$  – величина компенсации, определяемая правой частью формулы (9).

Аналогично изложенному можно получить рекуррентный алгоритм вычисления  $U(k)$  для систем, у которых не два, а большее количество выходов и для которых учитывается динамика управляющих воздействий.

Рассмотрим два практически важных алгоритма управления динамической системой.

Если динамическая система описывается одним уравнением, подобным (1), то есть имеет один выход, алгоритм управления принимает вид:

$$U(k) = U(k-1) + \frac{(\Delta x - a^T \Delta X - q^T \Delta G) \cdot C^{-1} b}{b^T C^{-1} b}. \quad (11)$$

Подобный результат можно получить и для динамических систем с одним выходом, у которых учитывается динамика входных управляющих воздействий. В этом случае система описывается уравнением:

$$x(k+1) = a^T X(k) + q^T G(k) + b_1^T U(k) + b_2^T U(k-1) + b_3^T U(k-2) + \dots, \quad (12)$$

где  $U(k) = \begin{pmatrix} u_1(k) \\ u_2(k) \\ \vdots \\ u_l(k) \end{pmatrix}$ ,  $U(k-1) = \begin{pmatrix} u_1(k-1) \\ u_2(k-1) \\ \vdots \\ u_l(k-1) \end{pmatrix}$ , и так далее,  $b_1^T, b_2^T, b_3^T \dots$  – транспонированные

векторы размерностью  $l \times l$ .

Вектор управления системой вычисляется по формуле:

$$U(k) = U(k-1) + \frac{(\Delta x - a^T \Delta X - q^T \Delta G - b_2^T U' + b_3^T U'' - \dots) \cdot C^{-1} b_1}{b_1^E C^{-1} b_1}, \quad (13)$$

где  $\Delta U' = U(k-1) - U(k-2)$ ,  $\Delta U'' = U(k-2) - U(k-3)$ .

Следует отметить, что если не учитывать динамику управляемой системы, то можно получить алгоритм управления статической системой.

Для практической реализации рассмотренных выше рекуррентных алгоритмов управления динамическими системами при заданной матрице стоимости управляющих воздействий необходимо обратить внимание на еще одно важное обстоятельство – наличие физических ограничений на вектор управления  $U(k)$  в виде неравенств:

$$Q < U(k) < P, \quad (14)$$

где  $Q$  и  $P$  – векторы физических ограничений на реализацию вектора  $U(k)$  размерностью  $l \times l$ .

Для того, чтобы добиться заданного «качества» выходов при наличии таких ограничений, необходимо предварительно проверить, выполняется ли неравенство:

$$Q < U(k-1) + \Delta U < P. \quad (15)$$

Если условие не выполняется, то необходимо выяснить, за счет каких компонент вектора  $U(k)$  это происходит. Пусть это будут  $U'_1, U'_2, \dots, U'_t$ , где штрих обозначает изменение индекса. Тогда значения этих переменных принимаем равными границам интервалов, возле которых они находятся. Некомпенсированное значение выходов соответственно:

$$\Delta x' = \Delta x - a^T \Delta X - q^T \Delta G - b_1^T \Delta U_1 = b_2^T \Delta U_2, \quad (16)$$

$$\Delta y' = \Delta y - h^T \Delta Y - e^T \Delta G - d_1^T \Delta U_1 = d_2^T \Delta U_2, \quad (17)$$

где  $\Delta U_1 = \begin{pmatrix} \Delta U'_1 \\ \Delta U'_2 \\ \vdots \\ \Delta U'_t \end{pmatrix}$ ,  $\Delta U_2 = \begin{pmatrix} \Delta U'_{t+1} \\ \Delta U'_{t+2} \\ \vdots \\ \Delta U'_l \end{pmatrix}$ ,  $b = \begin{pmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_2 \end{pmatrix}$ ,  $d = \begin{pmatrix} d_1 \\ \vdots \\ d_2 \end{pmatrix}$ ,

(то есть, выделен  $U_1(k)$  – вектор управлений, принимающих граничные значения, и  $U_2(k)$  – вектор остальных управлений), можно скомпенсировать за счет вектора управлений  $U_2(k)$ .

Разобьем матрицу стоимости так, что получим подматрицу стоимости управлений  $U_2(k)$ – $C$ . Тогда для получения значений  $U_2(k)$  необходимо минимизировать функционал, подобный (4):

$$I^* = \Delta U_2^T C \Delta U_2 \quad (18)$$

при ограничениях (16) и (17), то есть в данном случае достаточно воспользоваться формулой (9) для измененного вектора управлений и матрицы стоимости. После вычисления  $\Delta U_2$  опять необходимо проверить неравенство:

$$Q_2 < U_2(k-1) + \Delta U_2 < P_2, \quad (19)$$

где  $Q = \begin{pmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_t \end{pmatrix}$ ,  $P = \begin{pmatrix} P_1 \\ \vdots \\ P_t \end{pmatrix}$ .

Если неравенство (19) опять не будет выполняться, то необходимо скомпенсировать новые остатки, возникающие после того, как часть компонент вектора  $U_2(k)$  примет граничные значения подобно  $U_1(k)$ .

Разработанный алгоритм управления при ограничениях в виде неравенств не является строгим (оптимальным), но дает близкие к оптимуму результаты, если система находится в режиме нормального функционирования и, следовательно, векторы управления  $U(k)$  редко принимают граничные значения. Строгое решение этой задачи может быть проведено только численными методами.

Для функционирования алгоритмов управления (9), (11), (13) необходима периодическая корректировка моделей (1) и (2) с помощью алгоритмов идентификации [1–4]. Если разработанные алгоритмы управления в конечном счете не приведут к вектору  $\Delta U$ , который способен перевести управляемую систему в состояние, характеризующееся заданными выходами  $x_0$  и  $y_0$  при ограничениях (14) и выполнении условия адекватности моделей (1) и (2) управляемой системой, то необходимо ставить вопрос о пригодности данной системы для производства и вероятной ее неисправности.

### Вывод

Разработанный алгоритм псевдооптимального управления динамической системой целесообразно использовать для КИСУ ТП, так как этот алгоритм отличается простотой реализации и высоким быстродействием, обладает свойствами, близкими к свойствам оптимальных алгоритмов, и способностью, при постоянном применении корректировки моделей на основе алгоритмов [1–4], адаптироваться к свойствам нестационарных динамических систем. Кроме того, данный алгоритм псевдооптимального управления динамической системой может обеспечить снижение себестоимости выходного продукта.

Благодаря перечисленным свойствам разработанный алгоритм псевдооптимального управления динамической системой может существенно улучшить процесс управления динамическими нелинейными системами.

Литература

1. Бобух А.А. Компьютерно-интегрированная система автоматизации технологических объектов управления централизованным теплоснабжением: монография / А.А. Бобух, Д.А. Ковалёв; под ред. А.А. Бобуха. – Х.: ХНУГХ им. А.Н. Бекетова, 2013.– 226 с.
2. Эйкхофф П. Основы идентификации систем управления / П. Эйкхофф. – М.: Мир, 1975. – 680 с.
3. Цыпкин Я.З. Информационная теория идентификации / Я.З. Цыпкин. – М.: Наука, 1995. – 336 с.
4. Подустов М.А. Моделирование процессов нелинейных динамических систем / Подустов М.А., Бобух А.А., Ковалёв Д.А. // Інтегровані технології та енергозбереження: Науково-практичний журнал, № 4.– Х: НТУ «ХПІ», 2013. С. 32–37.

Bibliography (transliterated)

1. Bobuh A.A. Kompyuterno-integrirovannaya sistema avtomatizatsii tehnologicheskikh ob'ektov upravleniya tsentralizovannyim teplosnabzheniem: monografiya A.A. Bobuh, D.A. KovalYov; pod red. A.A. Bobuha. – H.: HNUGH im. A.N. Beketova, 2013.– 226 p.
2. Eykhoff P. Osnovyi identifikatsii sistem upravleniya P. Eykhoff. – M.: Mir, 1975. – 680 p.
3. Tsyipkin Ya.Z. Informatsionnaya teoriya identifikatsii Ya.Z. Tsyipkin. – M.: Nauka, 1995. – 336 p.
4. Podustov M.A. Modelirovanie protsessov nelineynyih dinamicheskikh sistem / Podustov M.A., Bobuh A.A., KovalYov D.A. Integrovani tehnologiyi ta energozberezhennya: Naukovo-praktichnyi zhurnal, # 4.– H: NTU «HPI», 2013. P. 32–37.

УДК: 681.5.033

Подустов М.О., Бобух А.О., Ковальов Д.О.

**АЛГОРИТМ ПСЕВДООПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ ДИНАМІЧНИМИ СИСТЕМАМИ**

У статті запропоновано алгоритм псевдооптимального керування, який дозволить понизити собівартість вихідного продукту динамічної керованої системи при заданій його якості, що дозволяє істотно поліпшити процес керування динамічними нелінійними системами.

Podustov M.A., Bobukh A.A., Kovalyov D.A.

**ALGORITHM OF PSEUDO-OPTIMUM CONTROL OF DYNAMIC SYSTEMS**

In article the algorithm of pseudo-optimum control which will allow to reduce prime cost of an initial product of dynamic operated system at set its quality that allows to improve management of dynamic nonlinear systems significantly is offered.

## РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСТВОРОВ ФУРАНО-ЭПОКСИДНЫХ РЕАКЦИОННОСПОСОБНЫХ ОЛИГОМЕРОВ

**Постановка и актуальность задачи.** Для формирования высококачественных покрытий вначале, используемых в строительной индустрии для защиты бетонных и металлических изделий и конструкций, необходимо создать оптимальную структуру раствора реакционноспособного олигомера (РСО), являющегося пленкообразователем, которая в свою очередь зависит от целого ряда физико-химических и технологических факторов: параметров, молекулярной неоднородности олигомера, химической природы и вязкости растворителя, характера взаимодействия олигомера и растворителя, концентрации пленкообразователя, температуры системы и других факторов [1].

Применение реологических исследований к растворам фурано-эпоксидных олигомеров (ФАЭД) дает возможность получить важную информацию о гидродинамическом поведении системы и процессах структурообразования в разбавленных, умеренно-концентрированных и концентрированных растворах фурано-эпоксидных РСО. Кроме этого, концентрационный режим растворов олигомеров во многом определяет механизм и направление химических реакций с участием молекул РСО.

Метод дифференциальной вискозиметрии позволяет охарактеризовать изменение гидродинамических характеристик молекул ФАЭД, их агрегатов при увеличении концентрации РСО в растворе, а также получить количественную информацию об удельных парциальных объемах молекул или их агрегатов (кластеров), плотности упаковки частиц в кластере, концентрации кластеров в растворе и т.д. [2]. В случае ассоциации кластеров с образованием более крупных кластеров, обладающих фрактальной структурой, данный метод позволяет оценить фрактальную размерность. Кроме этого, трактовка концентрационных эффектов в растворах РСО, вероятно, может быть основана на концепции рептации [3], с учетом различных состояний линейной молекулы олигомера (персистентные цепи) и с достаточной степенью корректности должна количественно описывать переход от разбавленных растворов к умеренно-концентрированным. Невозмущенные размеры молекулы эпоксидного олигомера (ЭО) составляют 0,095 нм, длина сегмента Куна – 3,3 нм. Расстояние между концами повторяющегося звена ЭО –  $O\text{PhC}(\text{CH}_3)_2\text{PhOCH}_2\text{CH}(\text{OH})\text{CH}_2$  – (проекция на направление основной оси) – 0,77 нм, статистический сегмент Куна равен 4,3 нм, диаметр полимерной цепи 0,59 нм, что сопоставимо с размерами бензольных колец в цепи ЭО [12]. Значительные размеры молекул ингредиентов ФАЭД способствуют к существенному межмолекулярному взаимодействию, что проявляется в возникновении в растворах и самих РСО ассоциатов и крупных образований типа кластеров, строение и природа которых в настоящее время практически не изучены.

Вязкость растворов измеряли в вискозиметре Уббелодде при температуре 25 °С. Погрешность определения температуры при термостатировании растворов составляла 0,5 °С. Время истечения растворителя – не менее 120 с, поэтому поправку на кинетическую энергию не вводили.

Представляло интерес исследовать структуру и реологические свойства растворов фурано-эпоксидных реакционноспособных олигомеров.



**Результаты и их обсуждение.** В качестве объектов исследования выбраны со-мещенные фурано-эпоксидные олигомеры на основе фурфуrolацетонного мономера ФАМ и эпоксидиановых олигомеров ЭД-16, ЭД-20, ЭД-22, а также исходные компо-ненты РСО. Данные системы представляют собой персистентные молекулы [4].

Так как склонность РСО к ассоциации зависит от химической природы раство-рителя, то в качестве растворителей были выбраны ацетон, этилцеллозольв и метило-вый спирт, физико-химические свойства которых представлены в табл. 1. Указанные растворители используются (кроме метилового спирта) для создания трехмерных по-крытий из раствора на поверхности металлических изделий (труб, технологического оборудования и др.) и поверхности изделий и конструкций из бетона.

Таблица 1 – Физико-химические свойства растворителей

Наименование параметра	Растворитель		
	Ацетон	Метанол	Этилцеллозольв
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	784,5	786,7	931,1
Мольный объем, см <sup>3</sup> /моль	74,0	40,7	97,0
Вязкость динамическая, Па с, 10	0,304	0,544	–
Диэлектрическая проницаемость	20,7	32,6	–
Дипольный момент, <i>D</i>	2,7	1,7	–
Донорное число, <i>DN</i>	17,0	30,2	–
Акцепторное число, <i>AN</i>	12,5	41,3	–
Константа автопротолиза, <i>pK<sub>a</sub></i>	32,5	17,2	–
Параметр растворимости, $\delta$ , (МДж/м <sup>3</sup> ) <sup>1/2</sup> , в т.ч. характеризующий взаимодействие:	19,93	29,13	24,07
– дисперсионное $\delta_d$	15,46	15,14	16,01
– полярное $\delta_p$	10,4	12,2	9,2
– за счет водородных связей $\delta_h$	6,9	22,2	14,3
Ассоциативный параметр растворимости $\delta_a$ , (МДж/м <sup>3</sup> ) <sup>1/2</sup>	12,5	25,3	17,4

На рис. 1 представлены концентрационные зависимости относительной вязкости растворов олигомера ФАЭД-50(22) в выбранных растворителях.

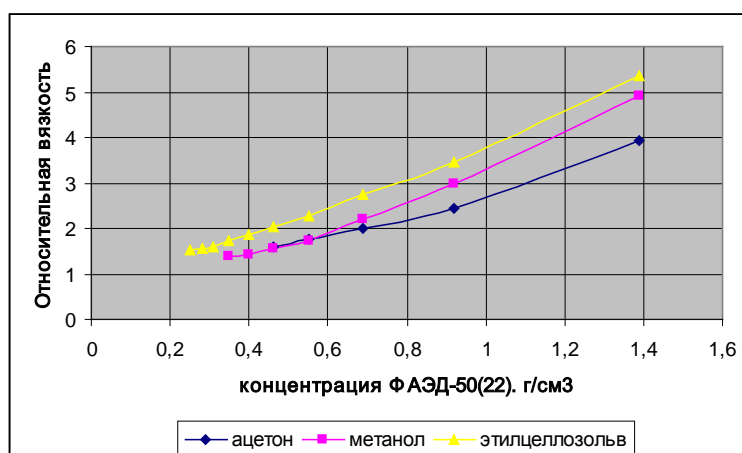
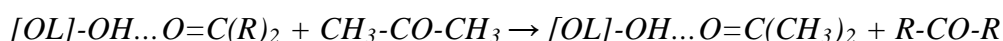
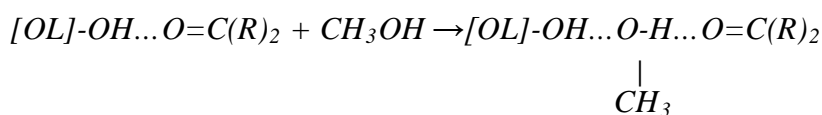


Рисунок 1 – Относительная вязкость растворов ФАЭД-50(22)

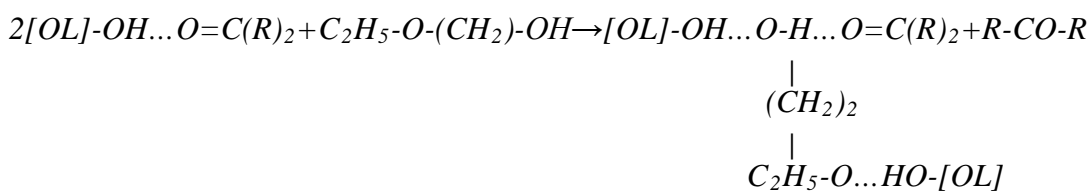
С увеличением концентрации олигомера монотонно возрастает относительная вязкость раствора, однако, повышение вязкости в неодинаковой мере. Учитывая только вклад водородных связей в изменение вязкости растворов ФАЭД-50, следовало бы ожидать (табл. 1) повышение вязкости в ряду: ацетон–этилцеллозольв–метанол. Однако экспериментальные данные (рис. 1) не подтверждают это предположение – увеличение вязкости наблюдается в ряду: ацетон-метанол-этилцеллозольв. Данный эффект, по-видимому, определяется типом водородной связи. Ацетон является только акцептором водородной связи, метанол и донором и акцептором (соотношение соответствующих вкладов 1:1), в то время как этилцеллозольв, являясь и донором и акцептором водородной связи, имеет это соотношение 1:2. Механизм межмолекулярного взаимодействия в системе "олигомер-растворитель" представлен схемой:.



а) Акцепторный растворитель



б) Донорно-акцепторный растворитель (1:1)



в) Донорно-акцепторный растворитель (1:2)

Способность ацетона разрушать водородные олигомер-мономерные связи в большей степени проявляются ввиду акцепторных свойств данного растворителя, что позволяет в некоторой степени компенсировать свое более низкое значение  $\delta_h$  по сравнению с этилцеллозольвом и метанолом.

В рамках термодинамического подхода (теории Гильденбранта-Скетчарда [5] и Флори-Хаггинса [6]) растворимость фурано-эпоксидных РСО снижается в ряду: ацетон–этилцеллозольв–метанол (табл. 2). Оценку параметров термодинамического взаимодействия, его критического значения ( $\chi$  и  $\chi_{кр}$ ), параметра совместимости ( $\beta$ ), мольной энтальпии смешения ( $\Delta H$ ) и исключенного объема ( $\varepsilon$ ) проводили исходя из зависимостей:

$$\beta = (\delta_{ол} - \delta_{раст})^2; \chi = \frac{V \cdot (\delta_{ол} - \delta_{раст})^2}{R \cdot T}; \chi_{кр} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{r_1^2} - \frac{1}{r_2^2} \right);$$

$$\Delta H = (\delta_{ол} - \delta_{раст})^2 \cdot \varphi_1 \cdot \varphi_2; \varepsilon = 2 \cdot \chi - 1,$$

где  $\delta_{ол}$ ,  $\delta_{раст}$  – параметры растворимости олигомера и растворителя соответственно, (МДж/м<sup>3</sup>)<sup>1/2</sup>; V – мольный объем, м<sup>3</sup>/моль; R – универсальная газовая постоянная, Дж/кг

$K$ ;  $T$  – температура, К;  $r_1=V_1/V_2$  и  $r_2=V_2/V_1$  ( $V_i$  – мольные объемы РСО и растворителя, м<sup>3</sup>/моль);  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – соответственно мольные доли олигомера и растворителя в смеси.

Таблица 2 – Параметры термодинамического взаимодействия системы

Наименование параметра	Растворитель		
	Ацетон	Метанол	Этилцеллозольв
Параметр совместимости, $\beta$ , МДж/м <sup>3</sup>	70,73	310,11	157,5
Параметр термодинамического взаимодействия, $\chi$	2,112	5,094	6,166
Критический параметр термодинамического взаимодействия, $\chi_{кр}$	46,87	522,1	15,23
Молярная энтальпия смешения, $\Delta H$ , мДж	17,68	77,53	39,37
Приведенный исключенный объем, $\epsilon$	3,124	9,188	11,332

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о низком уровне совмещения фурано-эпоксидных олигомеров со спиртами (на примере метанола). Поэтому при формировании покрытий из растворов ФАЭД представляется целесообразным использовать смесевые промышленные растворители либо не содержащие спирты, либо с низким содержанием этого ингредиента.

На рис. 2 приведены данные о вязкости ФАЭД и исходных компонентов в «хорошем» растворителе – ацетоне.

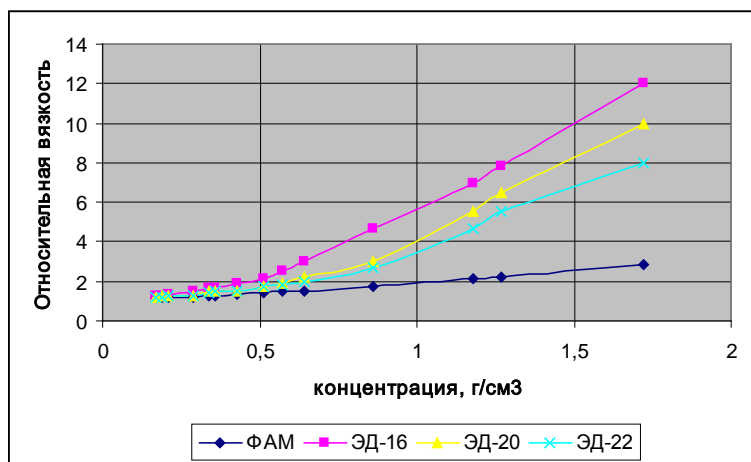


Рисунок 2 – Относительная вязкость растворов ФАМ и ЭО в ацетоне

Количественный анализ концентрационных зависимостей относительной вязкости  $\eta_{отн}$  олигомерных молекул в растворе может быть выполнен с помощью соотношения:  $\ln \eta_{отн} = ([\eta] \cdot c)^\alpha$ , получаемого в результате преобразования степенной функции  $\ln \eta_{отн} = k \cdot c^\alpha$ , которая широко используется для описания концентрационной зависимости вязкости олигомеров и полимеров ( $\alpha$  – скейлинговый показатель,  $k$  – константа) [7,8].

Это выражение справедливо для растворов олигомеров в термодинамически "хороших" растворителях, что характерно для системы «ФАЭД-ацетон». Параметр  $[\eta] \cdot c$  имеет физический смысл гидродинамического объема, занимаемого молекулой

олигомера при наложении гидродинамического поля с поперечным градиентом скорости  $g$  [7].

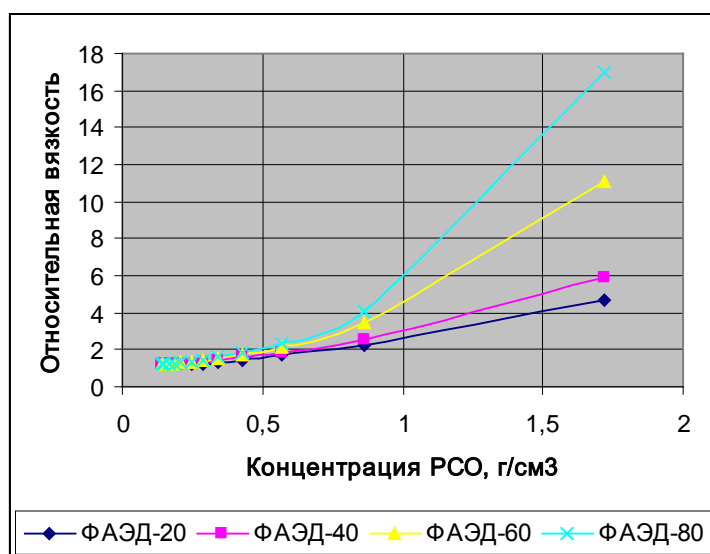


Рисунок 3 – Относительная вязкость растворов ФАЭД в ацетоне (ЭО – ЭД-16)

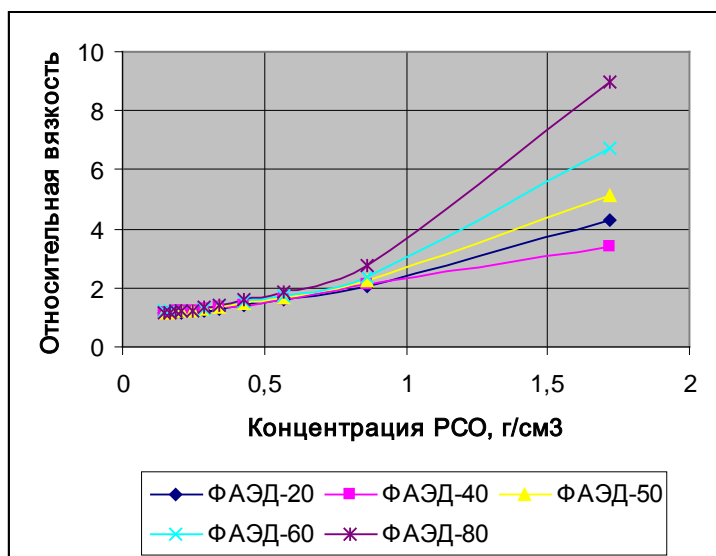


Рисунок 4 – Относительная вязкость растворов ФАЭД в ацетоне (ЭО – ЭД-20)

Графический анализ зависимости относительной вязкости  $\eta_{отн}$  от  $c$  в двойных логарифмических координатах с достаточной степенью точности в исследованном концентрационном диапазоне позволяет ее аппроксимировать прямой линией, тангенс угла наклона которой равен  $1/\alpha$ , а отрезок, отсекаемый на оси ординат, соответствует  $k$ .

Произведение  $\alpha \cdot k$  характеризует удельный парциальный объем  $\bar{V}$  молекул или их агрегатов (кластеров) [7].

Концентрация, при которой наступает начало перекрывания частиц (молекул, кластеров), т.е. полного однократного заполнения частицами объема, может быть оценена по формуле  $[\eta] \cdot c_{кр} / a = 1$  [8], исходя из скейлинговых соотношений:  $a = 3 \cdot v$ , где

$\nu$  – показатель степени, связывающий радиус агрегата (кластера) с числом молекул в кластере.

Характеристическую вязкость олигомеров  $[\eta]$  определяли по формуле Хаггинса, экстраполируя значение приведенной вязкости на нулевую концентрацию:

$$\frac{\eta - \eta_0}{\eta_0 \cdot c} = [\eta] + K_x \cdot [\eta]^2 \cdot c.$$

Типичные зависимости вязкости от концентрации олигомера в координатах уравнения Хаггинса приведены на рис. 5.

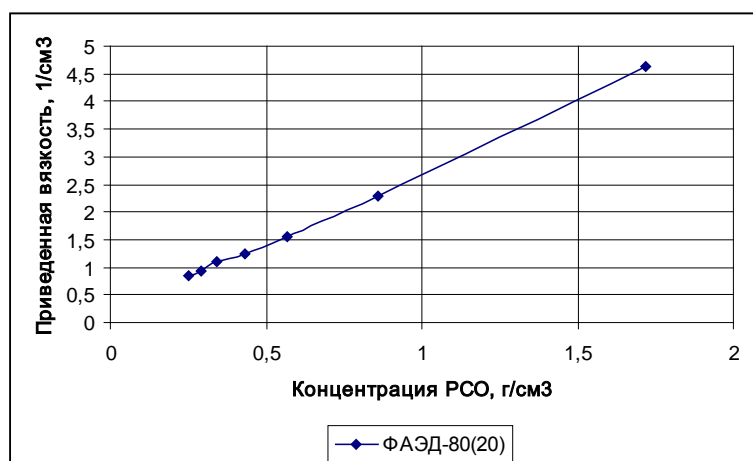


Рисунок 5 – Зависимость вязкости раствора ФАЭД-40(20) в ацетоне в координатах уравнения Хаггинса

Определив характеристическую вязкость  $[\eta]$ , константу Хаггинса  $K_x$ , рассчитывали по формуле:

$$K_x = \frac{\frac{\eta_{yd}}{c} - [\eta]}{[\eta]^2 \cdot c}.$$

При этом знание вида функциональной зависимости  $\eta_{yd}/c$  от  $c$  позволяет существенно снизить значимость погрешности  $K_x$  при малых концентрациях олигомера. Погрешность определения  $K_x$  в эксперименте не превышала 3 % (табл. 3).

Таблица 3 – Реологические параметры исследованных систем

Параметр	Реакционноспособный олигомер						
	ФАМ	ФАЭД-20	ФАЭД-40	ФАЭД-50	ФАЭД-60	ФАЭД-80	ЭО
$[\eta]$ , см³/г	0,705	<u>0,550</u>	<u>0,825</u>	0,750	<u>0,750</u>	<u>0,600</u>	<u>0,800</u>
$K_x$	0,431	<u>3,574</u> 3,680	<u>1,172</u> 0,615	1,393	<u>4,189</u> 0,925	<u>9,150</u> 2,912	<u>5,427</u> 4,756

Примечание: числитель ЭД-16, знаменатель – ЭД-20; значение параметров для ФАЭД-50 приведено только для ЭО – ЭД-20.

Гидродинамическое поведение фурано-эпоксидных олигомеров в разбавленных и умеренно концентрированных растворах в значительной мере определяет реологические свойства указанных систем, что позволяет сформулировать основные принципы построения олигомерных композиций различного функционального назначения (табл. 4).

Таблица 4 – Гидродинамические и структурные параметры растворов РСО в ацетоне

PCO	$\nu$	$a$	$k$	$V$	$c^*$ , г/см <sup>3</sup>	$D$
ФАМ	0,333	1,000	0,676	0,676	1,420	3
ФАЭД-20	<u>0,298</u>	<u>0,895</u>	<u>0,967</u>	<u>0,865</u>	<u>1,627</u>	<u>3</u>
	0,273	0,818	0,912	0,746	1,604	3
ФАЭД-40	<u>0,328</u>	<u>0,983</u>	<u>1,067</u>	<u>1,049</u>	<u>1,191</u>	<u>3</u>
	0,315	0,944	0,881	0,832	1,144	3
ФАЭД-50(20)	0,313	0,939	0,933	0,876	1,252	3
ФАЭД-60	<u>0,287</u>	<u>0,861</u>	<u>1,445</u>	<u>1,244</u>	<u>1,148</u>	<u>3</u>
	0,281	0,842	0,997	0,823	1,123	3
ФАЭД-80	<u>0,317</u>	<u>0,951</u>	<u>1,621</u>	<u>1,545</u>	<u>1,585</u>	<u>3</u>
	0,303	0,908	1,148	1,042	1,244	3
ЭО	<u>0,333</u>	<u>1,000</u>	<u>1,780</u>	<u>1,780</u>	<u>1,250</u>	<u>3</u>
	0,305	0,955	1,650	1,576	1,212	3

Примечание: числитель ЭД-16, знаменатель – ЭД-20

С увеличением концентрации РСО в растворе образуются кластеры (агрегаты) конечных размеров, которые в свою очередь агрегируют друг с другом по механизму кластер-кластерной ассоциации [10,11] с формированием в области порога гелеобразования (перколяции) бесконечного кластера, у которого доля олигомерных молекул, принадлежащих бесконечному кластеру в растворе велика и значительно превышает долю олигомерных молекул, входящих в кластеры конечных размеров.

С учетом скейлингового соотношения [10]:

$$s = \rho \cdot \left( \frac{\bar{R}}{R_o} \right)^D.$$

Относительная вязкость растворов  $\ln \eta_{\text{омн}}$  кластеров конечных размеров ниже порога перколяции может быть описана зависимостью [10,11]:

$$\ln \eta_{\text{омн}} = V_o(R) \cdot s^{3-D} \cdot c_s,$$

где  $V_o(R)$  – гидродинамический объем молекулы олигомера, см<sup>3</sup>/г;  $s$  – число молекул олигомера в кластере конечного размера;  $D$  – фрактальная размерность кластера;  $c_s$  – концентрация кластеров в растворе, г/см<sup>3</sup>, определяется по соотношению:

$$c_s = c/s,$$

где  $c$  – концентрация РСО в растворе, г/см<sup>3</sup>.

Вероятность образования кластера из молекул олигомера  $p$  может быть оценена в соответствии со следующей зависимостью:  $p = (1 - c_s/s)$ .

Таблица 5 – Структурные параметры растворов ФАЭД (растворитель ацетон)

PCO	$[\eta]c$ ,	$s$	$c_s$ , г/см <sup>3</sup>	$P$
ФАМ	0,606	1	–	–
ФАЭД-20	<u>0,473</u>	<u>2,94</u>	<u>0,292</u>	<u>0,660</u>
	0,439	2,78	0,309	0,604
ФАЭД-50(20)	0,645	1,55	0,556	0,353
ФАЭД-80	<u>0,516</u>	<u>7,42</u>	<u>0,116</u>	<u>0,865</u>
	0,628	2,59	0,332	0,614
ЭО	<u>0,668</u>	<u>4,99</u>	<u>0,172</u>	<u>0,799</u>
	0,712	4,05	0,233	0,725

Примечание: числитель – олигомер ЭД-16, знаменатель – ЭД-20; концентрация ФАЭД в растворе – 0,86 г/см<sup>3</sup>.

**Выводы.** Полученные экспериментальные данные с достаточной степенью точности и достоверности аппроксимируются известными аналитическими зависимостями, используемыми в физикохимии и реологии полимеров и олигомерных материалов.

Раствор ФАЭД в ацетоне обладает изотропными свойствами во всем исследованном диапазоне концентраций олигомера, т.к. на кривых, отражающих зависимость вязкости от концентрации не выявлено аномальных областей или точек экстремума. Реологическое поведение растворов олигомеров, содержащих эпоксидный компонент с различной молекулярной массой (ЭД-16; ЭД-20; ЭД-22) с технологической точки зрения находится на одном уровне и в реальных условиях производства при формировании защитного антикоррозионного покрытия на бетонных строительных изделиях и конструкциях, на внешней поверхности трубопроводов в полевых и стационарных условиях могут быть взаимозаменяемыми компонентами, если не накладываются ограничения по прочностным и эксплуатационным свойствам покрытия.

#### Литература

1. Чернин И.З., Смехов Ф.М., Жердяев Ю.М. Эпоксидные полимеры и композиции.– М.: Химия, 1982.– 232 с.
2. Красовский А.Н., Новиков Д.В., Крашенинников В.А., Плодистый А.Б. и др. Кластерная модель агрегации эпоксидиановых олигомеров в растворах и структура покрытий на основе эпоксидных и эпоксифенольных смол // ЖПХ.– 2001. Т74. Вып. 1.– С. 124–134.
3. Гросберг А.Ю., Хохлов А.Р. Статистическая физика макромолекул.– М.: Наука, 1989.– 344 с.
4. Маркевич М.А. Структурно-кинетические аспекты процессов образования эпоксидиановых олигомеров и трехмерных полимеров на их основе: Авторефер. Докт. дисс, Черногоровка, 1986.– 46 с.

5. Дринберг С.А., Ицко Э.Ф. Растворители для лакокрасочных материалов: Справочное пособие.– 2-е изд., перераб. и доп.– Л.: Химия, 1986.– 208 с.
6. Тагер А.А. Физикохимия полимеров.– М.:Химия, 1978.– 544 с.
7. Поляков Д.Н., Красовский А.Н. Гидродинамическое поведение и надмолекулярная структура нитробензола в ацетоне // Коллоидный журнал.– 1992. Т. 54, Вып. 6.– С. 48–52.
8. Баранов В.Г., Агафонов Г.И., Одляницкая В.С., Агранова С.А. Структурообразование в водных растворах силикатов щелочных металлов // ЛКМ.– 1987, № 6.– С. 18–20.
9. Красовский А.Н., Николаев Б.П., Шляхов и др. Гидродинамическое поведение водных растворов силикатов щелочных металлов и эффекты структурирования на ранних стадиях образования геля // Коллоидный журнал.– 1994. Т.56. Вып. 3.– С. 371–375.
10. Баранов В.Г., Бресткин Ю.В., Поддубный В.И., и др. Концентрационная зависимость линейных макромолекул в хороших растворителях // Высокомолекулярные соединения, Сер. А.–1987.Т.29, № 12.– С. 2516–2520.
11. Красовский А.Н., Николаев Б.П., Шляхов и др. Скейлинговое поведение, кластерная структура и концентрационные зависимости относительной вязкости желатин в водных растворах вблизи порога гелеобразования // Высокомолекулярные соединения, Сер. А.–1995.Т.37, № 2.– С. 273–281.
12. Зайцев Ю.С., Кочергин Ю.С., Пактер М.К., Кучер Р.В. Эпоксидные олигомеры и клеевые композиции.– К.: Наукова думка, 1990.–200 с.

Bibliography (transliterated)

1. Chernin I.Z., Smehov F.M., Zherdyaev Yu.M. Epoksidnyie polimeryi i kompozitsii.– М.: Himiya, 1982.– 232 p.
2. Krasovskiy A.N., Novikov D.V., Krashenninnikov V.A., Plodistyiy A.B. i dr. Klasternaya model agregatsii epoksidianovyih oligomerov v rastvorah i struktura pokryitiy na osnove epoksidnyih i epoksifenolnyih smol ZhPH.– 2001. T74. Vyip. 1.– P. 124–134.
3. Grosberg A.Yu., Hohlov A.R. Statisticheskaya fizika makromolekul.– М.: Nauka, 1989.– 344 p.
4. Markevich M.A. Strukturno-kineticheskie aspektyi protsessov obrazovaniya epoksidianovyih oligomerov i trehmernyih polimerov na ih osnove: Avtorefer. Dokt. diss, Chernogolovka, 1986.– 46 p.
5. Drinberg S.A., Itsko E.F. Rastvoriteli dlya lakokrasochnyih materialov: Spravochnoe posobie.– 2-e izd., pererab. i dop.– Л.: Himiya, 1986.– 208 p.
6. Tager A.A. Fizikohimiya polimerov.– М.:Himiya, 1978.– 544 p.
7. Polyakov D.N., Krasovskiy A.N. Gidrodinamicheskoe povedenie i nadmolekulyarnaya struktura nitrobenzola v atsetone Kolloidnyiy zhurnal.– 1992. T. 54, Vyip. 6.– P. 48–52.
8. Baranov V.G., Agafonov G.I., Odlyanitskaya V.S., Agranova S.A. Strukturnoobrazovanie v vodnyih rastvorah silikatov schelochnyih metallov LKM.– 1987, # 6.– P. 18–20.



9. Krasovskiy A.N., Nikolaev B.P., Shlyahov i dr. Gidrodinamicheskoe povedenie vodnykh rastvorov silikatov shelochnykh metallov i efektyi strukturirovaniya na rannih stadiyah obrazovaniya gelya Kolloidnyiy zhurnal.– 1994. T.56. Vyip. 3.– P. 371–375.

10. Baranov V.G., Brestkin Yu.V., Poddubnyiy V.I., i dr. Kotsentratsionnaya zavisimost lineynykh makromolekul v horoshih rastvoritelyah Vyisokomolekulyarnye soedineniya, Ser. A.–1987.T.29, # 12.– P. 2516–2520.

11. Krasovskiy A.N., Nikolaev B.P., Shlyahov i dr. Skeylingovoe povedenie, klaster-naya struktura i kotsentratsionnyie zavisimosti odnositelnoy vyazkosti zhelatinyi v vodnykh rastvorah vblizi poroga geleobrazovaniya Vyisokomolekulyarnye soedineniya, Ser. A.– 1995.T.37, # 2.– P. 273–281.

12. Zaytsev Yu.S., Kochergin Yu.S., Pakter M.K., Kucher R.V. Epoksidnyie oligome-ryi i kleevyie kompozitsii.– K.: Naukova dumka, 1990.–200 p.

УДК 678.5

Рассоха О.М.

### **РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РОЗЧИНІВ ФУРАНО-ЕПОКСИДНИХ РЕАКЦІЙНОЗДАТНИХ ОЛІГОМЕРІВ**

Вивчені структура та реологічні властивості реакційноздатних фураноз-епоксидних олігомерів, що використовуються при формуванні захисних покриттів в будівельній індустрії.

Rassokha A.N.

### **RHEOLOGICAL PROPERTIES OF THE FURAN-EPOXY REACTIVE OLIGOMER SOLUTIONS**

Structure and rheological properties of the furan-epoxy reactive oligomers used in forming the coatings in the construction industry are investigated.

УДК 541.128

Шапорев В.П., Шестопапов А.В.

## СИНТЕЗ ЧАСТИЦ ТИТАНА АЛЮМИНИЯ АНИЗОТРОПНОЙ ФОРМЫ ПРИ ПРОТЕКАНИИ ТВЕРДОФАЗНЫХ РЕАКЦИЙ В СИСТЕМЕ ГИДРОКСИД АЛЮМИНИЯ–ДИОКСИД ТИТАНА

### Введение

Титанат алюминия ( $\text{Al}_2\text{TiO}_5$ ) привлекает к себе внимание тем, что он является термостойким материалом с низким термическим расширением (температура плавления  $1860\text{ }^\circ\text{C}$ , коэффициент термического расширения  $1,4 \cdot 10^{-6}/^\circ\text{C}$  в диапазоне температур  $25\text{--}800\text{ }^\circ\text{C}$ ) [1]. Преимущество отдается  $\text{Al}_2\text{TiO}_5$ , который синтезирован в виде нитевидных кристаллов или частиц анизотропной формы. Такие частицы используются как армирующий компонент при производстве композиционных материалов для накладок на днища поршней двигателей внутреннего сгорания (ДВС) [2,3], тепловой изоляции дизеля [4], упрочнения титанатного или алюминиевого сплавов, из которых изготавливаются детали ДВС [5,6].

Известные методы синтеза титаната алюминия [7,8] базируются на процессе спекания активного оксида алюминия с оксидом титана в присутствии добавок фторида алюминия ( $\text{AlF}_3$ ). Причем реакционная смесь синтезируется в результате смешения водных растворов сернокислого алюминия  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  и сернокислого титанила  $\text{TiOSO}_4$ . Образовавшийся осадок подвергается дегидратации и десульфурации, а полученный порошкообразный материал, состоящий из оксида алюминия и диоксида титана с добавкой 5–30 % фторида алюминия (в пересчете на атомы Al) подвергается тепловой обработке при  $1300\text{ }^\circ\text{C}$  и выше. Как установлено авторами работ [7,8], при таких условиях обжига, особенно в случае стехиометрического соотношения спекаемых оксидов, наряду с образованием  $\text{Al}_2\text{TiO}_5$ , одновременно наблюдается склонность титаната алюминия к эвтектоидному распаду на оксид алюминия и диоксид титана типа рутила. Поэтому формирование кристаллов анизотропной формы весьма затруднено. В работе [9] рассмотрены и обоснованы теоретически экспериментальные результаты по образованию и кристаллизации нитевидных кристаллов титанатов в процессе твердофазного синтеза на основании процессов диффузии иницированных рекристаллизацией.

Показано, что в типичных дисперсных системах рост новых фаз осуществляется в результате низкотемпературных [ $T \approx (0,1\text{--}0,4) T_{\text{пл}}$  продукта] процессов массопереноса, а рост кристаллов анизотропной формы проходит в результате кристаллизации, образовавшейся рентгеноаморфной новой фазы. Однако публикации по исследованию процесса образования  $\text{Al}_2\text{TiO}_5$  с точки зрения теории, обоснованной в работе [9], отсутствуют.

В данной статье приведены результаты исследования по синтезу титаната алюминия с помощью термической обработки порошкообразной смеси из кислотосодержащих соединений алюминия (в основном  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) и диоксида титана с добавкой фторида алюминия ( $\text{AlF}_3$ ) и определения размера частиц, отношения поперечного размера к длине кристалла, а также кристаллографической ориентации в продольном направлении.

### Методика исследований

#### Приготовление образцов и методы измерений

Для получения исходного материала для синтеза титаната алюминия готовили смеси различного состояния из порошкообразных компонентов. В качестве гидроксида

алюминия использовали гидраргиллит, выпускаемый различными глиноземными заводами, который состоял из гранул с размерами 20–150 мкм, содержание гранул с размерами 40–80 мкм составляло ~80 %. Гранулы, в свою очередь, состояли из пластинчатых кристаллов гидраргиллита с характерным размером  $10^4$ – $10^5$  Å. Согласно [10] кристаллическая структура гидраргиллита базируется на пакетах АВ, образованных двумя слоями гидроксильных групп, между которыми расположен слой катионов алюминия. Пакеты АВ удерживаются вместе в объеме кристаллов за счет водородных связей. Объединение пакетов в структуре гидраргиллита может быть изображено последовательно АВ ВА АВ... [10]. Содержание структурной воды в гидраргиллите, определяемое по потерям массы при прокаливании, составляет 34,6 % и практически совпадает с теоретическим для гидроксидов состава  $\text{Al}(\text{OH})_3$ . В качестве другого компонента использовали диоксид титана модификации анатаз. Анатаз существует в виде двух модификаций:  $\alpha$  и  $\beta$  и кристаллизуются они в тетрагональной системе.  $\beta$ -анатаз при 642 °С обратимо переходит в  $\alpha$ -форму, а в отсутствие примесей (особенно ионов Fe)  $\alpha$ -анатаз, начиная с 915 °С, переходит монотонно в рутил. Переход анатаза в рутил сопровождается уменьшением объема почти в 8 %. В экспериментах использовали диоксид титана квалификации ОСЧ 7–3 по ТУ 6–09–01–640–84. Массовая доля  $\text{TiO}_2$  составляла 96,2–97,7 %, массовая доля Fe – 0,009–0,039 %. Для уменьшения содержания ионов Fe диоксид титана обрабатывали 10 % раствором КОН, а затем 10 % раствором HCl. После отмывки и сушки  $\text{TiO}_2$  массовая доля Fe уменьшилась на порядок.

Указанные компоненты (гидраргиллит и диоксид титана) смешивались до получения гомогенной однородной смеси с использованием различных агрегатов, в том числе на завершающей стадии двухвальковой шнековой машины с самоочищающимися шнеками и фильерой для получения гранулята в виде цилиндров с размерами  $(5\text{--}10) \times (10\text{--}15)$  мм.

В ряде экспериментов вместо анатаза использовался аморфный гидроксид титана, который получается на промежуточной стадии производства диоксида титана с содержанием свободной воды 5–10 %. В процессе смешения и гомогенизации компонентов в смеси вводили 5 %, в пересчете на атомы Al,  $\text{AlF}_3$ . Компонент  $\text{AlF}_3$  вводили в указанном количестве, так как в [7,8] установлено, что большее количество  $\text{AlF}_3$  не оказывает влияние на процесс формирования кристаллов  $\text{Al}_2\text{TiO}_5$ . Компонент диоксид титана вводили в шихту с избытком от стехиометрии в количестве 1–2 %, что, согласно [9], наряду с небольшими примесями ионов Fe, способствует подавлению эвтектоидного распада  $\text{Al}_2\text{TiO}_5$  на оксид алюминия и рутил.

Изменение фазового состава при протекании твердо-фазной реакции проводилось непосредственно в процессе термической обработки гранулированной шихты, то есть методом «*in situ*».

Рентгенографическое исследование осуществляли на дифрактометре ДРОН-2 в  $\text{Cu}_\alpha$ -излучении при напряжении на трубке 36 кВ и силе тока 30 мА. Монохроматором служил графит, что обеспечивало хорошее разрешение линий на дифрактограммах. Для съемки применялась высокотемпературная рентгеновская камера УВД-2000, позволяющая проводить нагрев в среде воздуха или другого инертного газа до температуры 1400 °С.

Исследуемые образцы шихты подвергались также термическому анализу на дериватографе МОМ 1500. Как при рентгенографических исследованиях, так и термическом анализе съемки проводились в неизотермических условиях при скоростях нагрева 150–200 град./мин. Указанные скорости нагрева выбраны, исходя из рекомендаций [9]. При термическом анализе кривые ДТА, ДТГ и ТГ регистрировались при скорости про-

тяжки регистрационной бумаги 1 мм/мин. Регистрационная чувствительность кривых ДТА – 250 мВ, ДТГ – 1 мВ, ТГ – 100 мг. Некоторые образцы подвергались термической обработке в тиглях (лодочках). Тигли с объемом 30 см<sup>3</sup> изготовлены из платины, объем загрузки материала в тигель составил ~10–12 см<sup>3</sup>. Полученная после термической обработки масса в тиглях репульпировалась в дистиллированной воде и фильтровалась. Осадок репульпировался в этиловом спирте. Осадок сушился при 105 °С и в полученной массе определялись размеры кристаллов.

Замеры кристаллов и определение их структуры проводили на электронном микроскопе УЭМВ-100 и просвечивающем электронном микроскопе фирмы Сименс – «Эльмископ-1». Морфологию кристаллов исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-2 (Япония). Кристаллографические параметры титаната алюминия даются в соответствии с таблицами стандарта ICPDS.

### Результаты исследований и их обсуждение

В первую очередь был исследован процесс дегидратации гидраргиллита при температурах нагрева 200 град./мин. до температуры реакции. На кривых ДТА зафиксирован небольшой по интенсивности эндотермический эффект при 220 °С, связанный с потерей воды и экзотермический эффект в области температур 730–860 °С. Последний обусловлен переходом (кристаллизацией) нестабильной структуры, образовавшейся при дегидратации в  $\eta$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с кубической упаковкой по кислороду. При температуре фазового превращения гидроксид-оксид в присутствии парциального давления паров воды в газовой фазе с высокой воспроизводимостью, как установлено рентгенографическими исследованиями, формируется практически «однофазный» рентгеноаморфный продукт с высокой химической активностью, который не дает отражений на электронных дифрактограммах как от отдельных частиц, так от их массы. Содержание структурной (кристаллизационной) воды в этом продукте 5–10 массовых процентов, что меньше теоретического даже для гидроксидов алюминия состава AlO(OH). Известно, что в гидроксидах алюминия, включая гидраргиллит, ионы Al (III) находятся только в октаэдрической координации, а в оксидах  $\gamma$ -,  $\eta$ -,  $\chi$ - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – и в октаэдрической, и в тетраэдрической координации по кислороду [11]. Обработка спектров ЯМР<sup>27</sup>Al, которые сняты на образцах дегидратированного гидраргиллита, нагреваемого до температуры дегидратации со скоростью более 150 °С/мин, и приведены в работах [10, 12], показала, что, вероятно, полученный в наших экспериментах продукт дегидратации имеет содержание ионов Al (III) в 6-, 5-, 4-координированном состоянии близко к 85, 10 и 5 %. Из этого следует, что большая часть катионов после дегидратации гидраргиллита в неравновесных условиях сохраняет свое октаэдрическое окружение. То есть в продукте сохраняется основной структурный мотив исходного кристаллического гидроксида с формированием нестабильной промежуточной структуры твердой фазы, обладающей повышенной энергией и реакционной способностью, проявляя при этом свойства аморфного вещества, что и наблюдалось нами на рентгенограммах. Установлено, что рентгеноаморфное состояние системы наблюдается вплоть до температуры 950 °С, только при этой температуре появляются интенсивности, характерные для  $\chi$  Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–2 $\theta$ –27; 35; 56. Выдержка рентгеноаморфного продукта дегидратации гидраргиллита при температуре 800 °С в течении 90 мин. позволила установить, что рентгеноаморфный продукт при длительной выдержке может кристаллизоваться в виде волокон (рис. 1).

Дифракционная картина рентгеновских лучей при нагревании диоксида титана с принятыми скоростями нагрева, а также ДТА, собственно подтвердили вышеотмеченные температурные интервалы перехода  $\beta$ - и  $\alpha$ -анатаза в рутил. При переходе анатаза в

рутил, начиная с температуры 1000 °С, наблюдалось укрупнение частиц с размера 40–60 мкм до 200 мкм. По-видимому это и является причиной уменьшения объема массы на 8–10 %, как отмечалось выше.



Рисунок 1 – Волокнистый продукт со структурой  $\left( \begin{array}{c} -\text{Al} \\ \diagdown \\ \text{O} \\ \diagup \\ -\text{Al} \end{array} \right) - \text{HO} - \text{Al}$  после выдержки при 800 °С. Увеличение в 20000 раз

Таким образом, индивидуальное исследование компонентов шихты при их нагреве со скоростью 200 град/мин показывает, что в интервале температур 650–950 °С компоненты шихты имеют высокую реакционную способность, близкие структурные мотивы и, вполне вероятно, что смесь компонентов в шихте при этих температурах вступит в реакцию с образованием ретгеноаморфного продукта  $\text{Al}_2\text{TiO}_5$  (рис. 2).

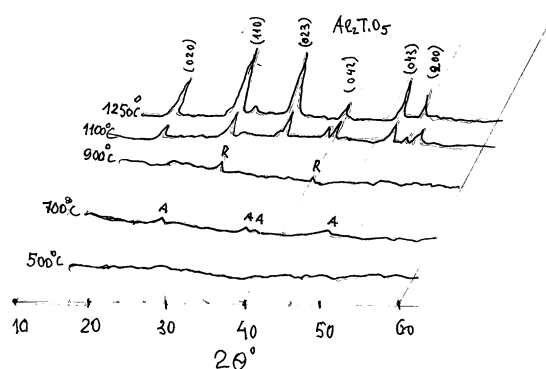


Рисунок 2 – Дифракционная картина рентгеновских лучей шихты, нагреваемой со скоростью 200 град/мин до различных температур.  
А – анатаз, R – рутил,  $\text{Al}_2\text{TiO}_5$  – титанат алюминия

На рис. 2 приведена дифракционная картина рентгеновских лучей исследуемой шихты с последующим обжигом при различных температурах.

Из приведенных рентгенограмм на рис. 2, как и следовало ожидать, в интервале температур 500–900 °С наблюдается рентгеноаморфная фаза. При 700 °С наблюдаются чуть заметные интенсивности  $\alpha$ -анатаза, а при 900 °С – рутила. Это связано с тем, что в шихте находится избыток оксида титана  $\beta$ -модификации, которая, как уже отмечалось выше, при 642 °С переходит в  $\alpha$ -модификацию, а при 900 °С – в рутил. Микрофотогра-

фії, полученные при исследовании структуры кристаллов в процессе нагрева до температур выше 600 °С, приведены на рис. 3.

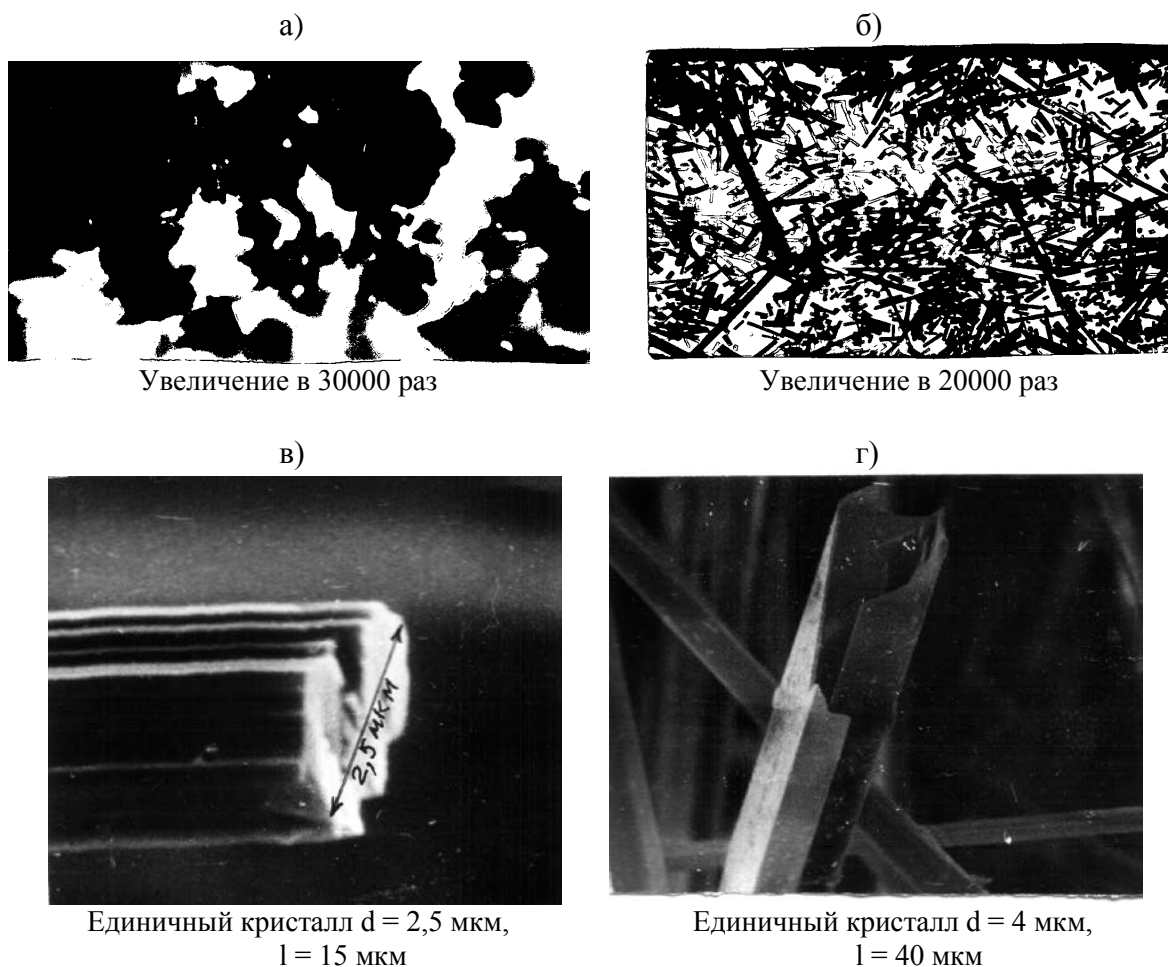


Рисунок 3 – Микрофотографии частиц титаната алюминия, синтезированных в процессе нагрева до различных температур  
а – 600 °С; б – 1000 °С; в – 1100 °С; г – 1300 °С

Из приведенных данных следует, что рентгеноаморфная фаза при достижении 1000 °С полностью кристаллизуется в частицы с анизотропной формой. Причем, как показано на экспозиции рис. 3 (в, г), в сечении кристаллы имеют огранку, близкую к шестиграннику, что согласуется с наблюдениями [1, 7, 8]. Влияние температуры обжига на размер и форму частиц отражено на рис. 4.

Таким образом, согласно результатам настоящих исследований, на число образующихся частиц анизотропной формы значительное влияние оказывает температурный режим обжига исходной шихты (рис. 4). Оптимальной температурой в процессе обжига можно принять 1200 °С, поскольку в этом интервале образуются кристаллы с наибольшим значением  $l/d$ . Не следует, по-видимому, исключать и интервал температур 1000–1100 °С. В этом интервале при достаточно высоких отношениях  $l/d$  можно синтезировать тонкие кристаллы с диаметром 1–2 мкм.

В общем случае, с помощью просвечивающего электронного микроскопа было установлено, что получаемые анизотропные частицы представляют собой агрегаты из

монокристаллов или тонких игольчатых кристаллов, расположенных в направлении длины; направление длины совпадает с осью (-a-).

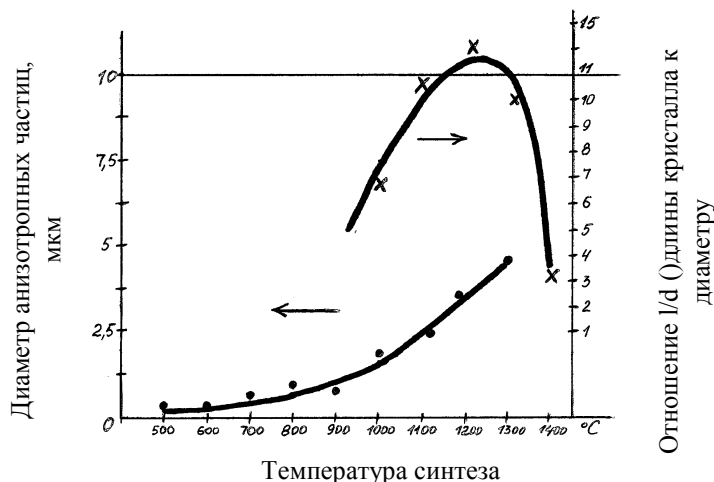


Рисунок 4 – Влияние температуры обжига на размер и форму частиц титаната алюминия; × – соотношения l/d; • – размер кристалла в поперечном сечении

Для определения возможности использования полученных в данном исследовании титанатов алюминия в композитах были проведены исследования получения ориентированных формованных изделий из указанных материалов.

В такой порошок титаната алюминия добавляли 2 % по массе поливинилового спирта, смесь тщательно перемешивали и затем формовали с помощью экструзии тонкие пластины, которые укладывали в пакет и прессовали под давлением 1 т/см<sup>2</sup>. Получали ориентированные формованные изделия. Эти изделия резко нагревали до температуры 1400 °C и после выдержки в течение часа при этой температуре изделия извлекали из печи. Рентгенограмма поверхности прессования в процессе формования этих спеченных изделий приведена на рис. 5. Благодаря ориентации кристаллов титаната алюминия их дифракционная интенсивность в значительной степени отличалась от дифракционной интенсивности порошков.

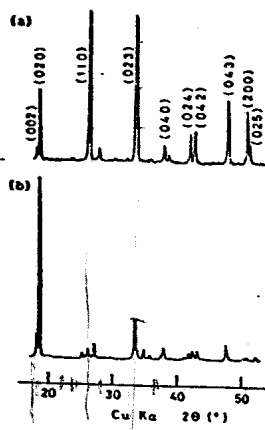


Рисунок 5 – Дифракционные картины рентгеновских лучей для поверхности спеченных изделий: а – обычное прессование измельченных порошков; b – прессование многослойных пакетов из пластин, сформированных из порошков с частицами продолговатой формы

Степень ориентации в направлении различных осей, определенная методом, предложенным Лотжерингом, указана в табл. 1. Индекс ориентации образца 1, рассчитанный по рис. 5 в, был несколько меньше степени ориентации образца 2, полученного из порошка титаната алюминия. В любом случае отмечалась значительная ориентация параллельно оси  $-a-$  ( $F//a$ ). Данное обстоятельство свидетельствовало об ориентации продолговатых частиц параллельно поверхности образца, продольное направление которых совпадало с направлением оси  $-a-$ . В случае образца 1 отмечался высокий индекс ориентации ( $OkO$ ) ( $F \perp b$ ) и наблюдалась низкая воспроизводимость индекса ориентации ( $OkO$ ) ( $OoI$ ). Однако имела место хорошая воспроизводимость результатов оценки их отражения ( $OkI$ ) ( $F//a$ ).

Таблица 1 – Индексы Лотжеринга для различных направлений. Индексы предпочтительной ориентации образца 1 были рассчитаны с помощью рис. 5 в; образец 2 был изготовлен из такого же порошка

	Образец 1		Образец 2	
	$F \perp x$		$F \perp x$	
$x=a$	-9,08	+0,88	-0,07	+0,82
$x=b$	+0,56	-0,03	+0,39	-0,04
$x=c$	+0,05	+0,32	+0,14	+0,12

### Выводы

- 1) В результате проведенных исследований было установлено, что анизотропные частицы титаната алюминия ( $Al_2TiO_5$ ) при протекании твердофазного процесса между гидроксидом алюминия и оксидом титана получают при температурах выше  $900\text{ }^\circ\text{C}$ .
- 2) Продольное направление продолговатых кристаллов, полученных в данной работе, было ориентировано по оси  $-a-$ .
- 3) Были получены ориентированные спеченные материалы с индексом Лотжеринга  $F//a = 0,88$ .

### Литература

1. E. Kato, K. Daimon, J. Takahasbi and all. Синтез частиц титаната алюминия анизотропной формы // Report of the Research Laboratory of Engineering Materials, Tokio Instut of Technology – 1984.– У.– С. 75–86.
2. Schneider J.L. Chemically for med ceramic for engine wear materials / High. Tech. Ceram. Proc. World Congr. High. Tech. Ceram. 6th Int. Meet. Mod. Ceram. Technol. (6th CIMTEC), Milan, 24-28 June 1986 // Amsterdam e. a., 1987.– Pp. 2581–2587.
3. Baker A.R., Dawson D.I., Evang D.C. Ceramics and composite materials for precision enge component // Mater. and Des., 1987.– 8.– № 6.– Pp. 315–323.
4. Churchiel Randolph A., Smith Jemes E., Chark Nigel N., Turton Richard A. Low-heet rejechion engines – a concept review // SAE Techn. Pap. Ser., 1998.– № 880014.– Pp. 25–36.
5. Frendenberger Bob. Ceramic engine parts // Mot. Serv. (USA), 1987.– 66.– № 12.– Pp. 16–19.
6. Miller Bardley, Coblenz William, Paille Norman. Development of ceramic exhaust port liner // SAE Techn. Pap. Ser., 1988.– № 880677.– Pp. 1–19.



7. K. Daimon, E. Kato and all. Синтез титаната алюмінія при спеканні їх оксидов // Ёгё кёкайси, 1986.– Т.94.– С. 380–382.
8. K. Daimon and E. Kato. Исследование кристаллов  $Al_2TiO_5$  анизотропной формы // J. Cryst. Growth, 1986.– 75.– С. 348–352.
9. Шапоров В.П. Технология неорганических армирующих наполнителей // Диссертация на соиск. учен. степени докт. техн. наук по специальности 05.17.01 – технология неорганических веществ.– Харьков: ХГПУ, 1996.– 486 С.
10. Р.Я. Буянов, О.П. Криворучко. О природе термохимической активации кристаллических веществ // Изв. Сибирск. отдел АН СССР сер. химич. наук, 1986.– № 11.– В.4.– С. 39–44.
11. Mastikhin V.M., Krivoruchko O.P., Zolotovskii B.P., Buyanov R.A. The Nature of Thermochemical Activation of hydroxides // React. Kinet. Catal. Lett., 1981.– 18.– № 1–2.– Pp. 117.
12. Автор. свид. СССР № 528733. Откр. изобр. образцы и тов. знаки, 1981.– № 47.

Bibliography (transliterated)

1. E. Kato, K. Daimon, J. Takahasbi and all. Sintez chastits titanata alyuminiya anizotropnoy formy Report of the Research Laboratory of Engineering Materials, Tokio Instut of Technology – 1984.– U.– P. 75–86.
2. Schneider J.L. Chemically for med ceramic for engine wear materials High. Tech. Ceram. Proc. World Congr. High. Tech. Ceram. 6th Int. Meet. Mod. Ceram. Technol. (6th CIMTEC), Milan, 24–28 June 1986 // Amsterdam e. a., 1987.– Pp. 2581–2587.
3. Baker A.R., Dawson D.I., Evang D.C. Ceramics and composite materials for precision enge component Mater. and Des., 1987.– 8.– # 6.– Pp. 315–323.
4. Churchiel Randolph A., Smith Jemes E., Chark Nigel N., Turton Richard A. Low-heet rejechion engines – a concept review SAE Techn. Pap. Ser., 1998.– # 880014.– Pp. 25–36.
5. Frendenberger Bob. Ceramic engine parts Mot. Serv. (USA), 1987.– 66.– # 12.– Pp. 16–19.
6. Miller Bardley, Coblenz William, Paille Norman. Development of ceramic exhaust port liner SAE Techn. Pap. Ser., 1988.– # 880677.– Pp. 1–19.
7. K. Daimon, E. Kato and all. Sintez titanata alyuminiya pri spekanii ih oksi-dov YogYo kYokaysi, 1986.– Т.94.– P. 380–382.
8. K. Daimon and E. Kato. Issledovanie kristallov  $Al_2TiO_5$  anizotropnoy formy J. Cryst. Growth, 1986.– 75.– P. 348–352.
9. Shaporev V.P. Tehnologiya neorganicheskikh armiruyuschih napolniteley Dissertatsiya na soisk. uchen. stepeni dokt. tehn. nauk po spetsialnosti 05.17.01 – tehnologiya neorganicheskikh veschestv.– Harkov: HGPU, 1996.– 486 P.
10. R.Ya. Buyanov, O.P. Krivoruchko. O prirode termohimicheskoy aktivatsii kristallicheskih veschestv Izv. Sibirsk. otdel AN SSSR ser. himich. nauk, 1986.– # 11.– V.4.– P. 39–44.
11. Mastikhin V.M., Krivoruchko O.P., Zolotovskii B.P., Buyanov R.A. The Nature of Thermochemical Activation of hydroxides React. Kinet. Catal. Lett., 1981.– 18.– # 1–2.– Pp. 117.
12. Avtor. свид. SSSR # 528733. Otkr. izobr. obraztsy i tov. znaki, 1981.– # 47.

УДК 541.128

Шапорев В.П., Шестопапов О.В.

**СИНТЕЗ ЧАСТОК ТИТАНУ АЛЮМІНІЮ АНІЗОТРОПНОЇ ФОРМИ ПРИ ПРОТІКАННІ ТВЕРДОФАЗНИХ РЕАКЦІЙ В СИСТЕМІ ГІДРОКСИД АЛЮМІНІЮ–ДІОКСИД ТИТАНУ**

У статті наведено дані з процесу утворення нитковидних кристалів титанату алюмінію при протіканні твердофазної реакції в системі гідроксид алюмінія – диоксид титану. Доведено, що при нагріванні утворення нової фази ( $\text{Al}_2\text{TiO}_5$ ) зобов'язано низькотемпературним [ $T \approx (0,1-0,4) T_{\text{пл}}$  продукту] процесам масопереносу, а зростання кристалів анізотропної форми проходить внаслідок кристалізації утвореної рентгеноаморфної нової фази. Визначено температурні інтервали процесу, розміри кристалів, відношення поперечного розміру кристала до його довжини, а також кристаліграфічна орієнтація. На основі здобутих кристалів вироблені орієнтовано спечені матеріали з індексом Лотжеринга  $F//a = 0,88$ .

Shaporev V.P., Shestopalov O.V.

**SINTASIS OF PHASE OF ANIZOTROP FORM ALUMINUM TITANATE AT FLOWING OF FIRMLY PHASE REACTION IN THE SYSTEM ALUMINIUM HYDROXIDE–TITANIUM DIOXIDE**

In the article information is resulted from the process of whiskerization aluminum titanate (ATI,  $\text{Al}_2\text{TiO}_5$ ) at flowing firmly phase reaction in the system aluminium hydroxide-titanium dioxide. It is well-proven that at heating of formation of new phase ( $\text{Al}_2\text{TiO}_5$ ) due to low temperature [ $T(0,1-0,4) T_m$  of product] processes of mass transfer, and growth of crystals of anizotrop form passes as a result of crystallization x-ray photography of amorphous new phase. Certain temperature intervals of process, sizes of crystals, relations of transversal size of crystal, to his length, and also orientation of crystallography. On the basis of the obtained crystals mined-out sintered materials are oriented with Lotgering factor  $F//a = 0,88$ .

Атаманов Ю.Л., Крутиков Г.А., Стрижак М.Г.

## АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УДАРНЫХ ПНЕВМОАГРЕГАТОВ СО ВСТРОЕННЫМ РЕЗЕРВУАРОМ

**Введение.** Ударный эффект в пневмоагрегатах (ПА) со встроенным резервуаром создаётся за счёт практически ступенчатого наращивания значительного усилия на поршне при разгерметизации поршня-клапана с седлом (рис. 1). Быстрому наращиванию скорости поршня способствует невысокое противодействие в выхлопной полости в начале движения поршня. Однако, быстрое увеличение скорости приводит также и к быстрому увеличению давления в выхлопной полости и падению давления в рабочей полости, что вызывает режим автоторможения и появление развитого колебательного процесса [1].

**Цель работы.** Ввиду колебательного характера движения поршня координата расположения заготовки, при которой достигается максимальная скорость удара, строго обусловлена конструктивными и настроечными параметрами ПА [2].

При этом необходимо учитывать эффективность использования работоспособности сжатого воздуха, т.е. степень энергетического совершенства ПА.

Для оценки степени энергетического совершенства проектируемого ПА необходимо выработать критерий такой оценки и провести качественный и количественный анализ потерь энергии сжатого воздуха при срабатывании ударного ПА с целью определения соотношения параметров ПА, обеспечивающих минимум этих потерь.

**Основное содержание.** Для обобщения результатов исследований и минимизации независимых параметров, влияющих на внутренние переходные процессы, запишем математическую модель ПА со встроенным резервуаром в безразмерной форме. При этом накопительная ёмкость и неиспользуемый объём выхлопной полости (ввиду того, что координата нанесения удара  $x^* < L$ ) интерпретируются как начальные ("паразитные") объёмы полостей пневмоцилиндра (ПЦ).

При решении поставленной задачи можно ограничиться рассмотрением только двух фаз срабатывания ПА (накопления воздуха в ёмкости и движения поршня до момента удара). Учитывая временную задержку в срабатывании распределителя по каналу пневмоуправления  $0,03 \div 0,06$  с в математической модели можно не учитывать возможность перемены знака расхода и переходов от процессов опорожнения к процессам заполнения в полостях ПА и наоборот, т.е. рассматривать упрощённый вариант математической модели.

$$\begin{cases} \frac{d\sigma_1}{d\tau} = \frac{k}{\lambda_{01} + \lambda} [\varphi(\sigma_1) - \sigma_1 v]; \\ \frac{d\sigma_2}{d\tau} = \frac{-k}{1 + \lambda_{02} - \lambda} \left[ \frac{\Omega \sigma_2^{2k}}{\Pi_{21}} \varphi\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_2}\right) - \sigma_2 v \right]; \\ \beta \frac{dv}{d\tau} = \sigma_1 - \Pi_{21} \sigma_2 - \chi. \end{cases} \quad (1)$$

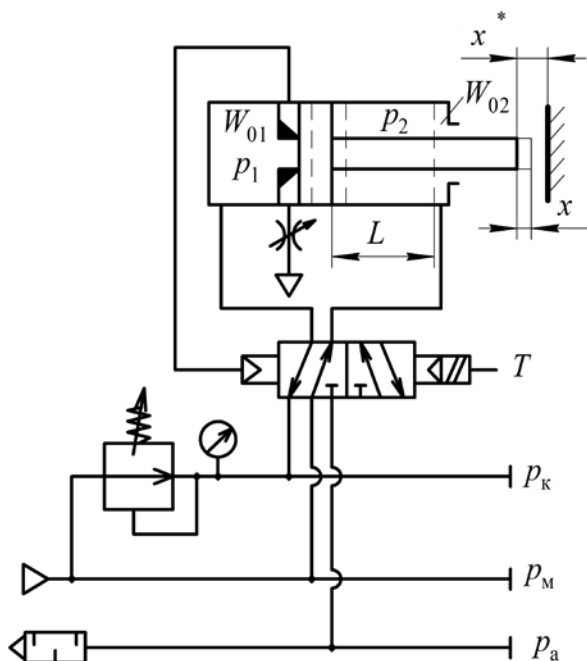


Рисунок 1 – Схема ударного пневмоагрегата с синхронным управлением контура питания

Условие отрыва поршня от седла в безразмерной форме имеет вид:

$$\Pi_{21}\sigma_2^* + \chi = \sigma_1^*\varphi + (1 - \varphi)\sigma_a, \quad (2)$$

где  $\sigma_1 = \frac{P_1}{P_M}$ ;  $\sigma_2 = \frac{P_2}{P_M}$ ;  $\sigma_a = \frac{P_a}{P_M}$  – безразмерные давления;  $\lambda = \frac{x}{L}$ ,  $\nu = \frac{v}{L}t_6$  – безразмерные координата и скорость поршня;  $\tau = \frac{t}{t_6}$  – безразмерное время;  $t_6 = \frac{F_1 L}{f_1^3 \sqrt{kRT_M}}$  – базовая единица времени;  $f_1^3$  – эффективная площадь впускного тракта;  $\sqrt{kRT_M}$  – скорость звука;  $\varphi(\sigma)$  – расходная функция;  $\chi = \frac{P_{тр}}{F_1 P_M}$  – параметр нагрузки;  $\sigma_1^*$ ,  $\sigma_2^*$  – безразмерные значения давлений, при которых происходит разгерметизация;  $\Pi_{21} = F_2/F_1$ ;  $\varphi(\sigma)$  – расходная функция [2].

Критериями динамического подобия являются  $\lambda_{01} = W_{01}/F_1 L$  – безразмерный объём встроенного резервуара;  $\varphi = F_c/F_1$  – безразмерная площадь сопла;  $\Omega = f_2^3/f_1^3$  – отношение эффективных площадей выпускного и впускного трактов;  $\beta = \frac{mL}{t_6^2 F P_M}$  – критерий инерционности (безразмерная масса).

Введём некоторые допущения. Первое допущение связано с тем, что после отрыва поршня от седла он быстро набирает большую скорость, вследствие чего массовый расход, обусловленный движением поршня, на порядок превосходит расход, поступающий в накопительную полость и уходящий из выхлопной полости [4].

Поэтому при работе ПА в этой фазе допустимо считать как рабочую, так и выхлопную полости замкнутыми.

Интегрирование первых двух уравнений в этом случае приводит к уравнениям адиабатических процессов расширения и сжатия воздуха соответственно в рабочей и выхлопной полостях

$$\sigma_1(\lambda_{01} + \lambda)^k \cong \lambda_{01}^k; \quad \sigma_2(1 + \lambda_{02} - \lambda)^k \cong \frac{1}{\Pi_{21}}[\varphi + \sigma_a(1 - \varphi)](1 + \lambda_{02})^k. \quad (3)$$

Начальные значения безразмерных давлений в правых частях уравнений (3) соответственно равны  $\sigma_{1н} = 1$  и, в соответствии с (2),  $\sigma_{2н} = \frac{\varphi}{\Pi_{21}} + \frac{\sigma_a}{\Pi_{21}}(1 - \varphi)$ .

Следовательно, главные составляющие работы расширения и сжатия могут быть определены как

$$\Pi_p = \int_0^{\lambda^*} \sigma_1 d\lambda = \frac{\lambda_{01}}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{01} + \lambda} \right)^{k-1} \right]; \quad (4)$$

$$\Pi_c = \int_0^{\lambda^*} \sigma_2 d\lambda = \frac{1}{\Pi_{21}} [\varphi + \sigma_a(1 - \varphi)] \left( \frac{1 + \lambda_{02}}{k-1} \right) \left[ \left( \frac{\lambda_{02} + 1}{\lambda_{02} + 1 - \lambda^*} \right)^{k-1} - 1 \right], \quad (5)$$

где  $\Pi_p$  – потенциальная энергия расширения воздуха в рабочей полости ПА в безразмерной форме;  $\Pi_c$  – потенциальная энергия сжатия воздуха в выхлопной полости ПА в безразмерной форме, причём, в первом и втором случае используется базовое значение работы  $A_0 = F_1 p_m L$ .

Максимально полезную работу, которую может совершить сжатый воздух, находящийся в накопительной ёмкости, определим, используя понятие удельной работоспособности сжатого воздуха (эксергии) [3].

Из теории компрессорных машин известно, что сообщенная единице массы газа работа  $l$  может быть определена как:

$$l = c_p (T_k - T_a) - q = c_p (T_k - T_a) + \int_{S_a}^{S_k} T ds, \quad (6)$$

где  $c_p$  – теплоёмкость при изобарическом процессе;  $T_a$ ,  $S_a$ ,  $T_k$ ,  $S_k$  – температура и энтропия в начале и конце процесса сжатия воздуха в компрессоре.

Согласно одному из свойств  $T-S$  диаграммы (рис. 2) изменение теплосодержания газа  $c_p(T_k - T_a)$  эквивалентно площади фигуры, расположенной под отрезком изобары  $p_k = \text{const}$  в интервале температур  $T_k - T_a$ :  $c_p(T_k - T_a) \sim S_{233'12}$ . Отведенное тепло  $q$  эквивалентно площади под политропой 3-5 в интервале температур  $T_k - T_a$ :  $q \sim S_{3563'3}$ . Таким образом, удельная работа сжатия в  $T-S$  координатах определяется площадью  $S_{123561} = S_{723587}$ .

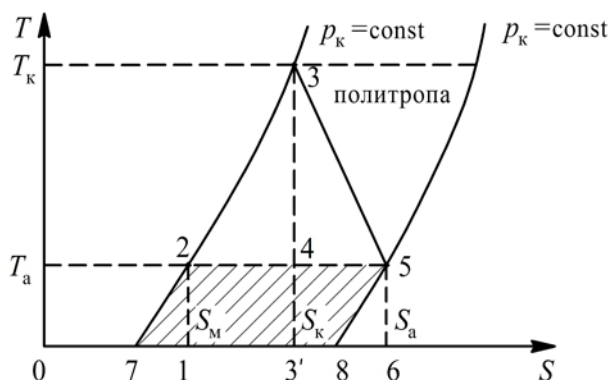


Рисунок 2 – Процесс сжатия воздуха в компрессоре в  $T - S$  координатах

Удельная работоспособность потока газа  $l_p$ , т.е. та часть удельной работы сжатия в компрессоре, которая в дальнейшем может быть использована для производства внешней механической работы, определим исходя из того, что в холодильнике компрессора и ресивере поток сжатого воздуха приходит в термическое равновесие с окружающей средой. После изобарного охлаждения потока сжатого воздуха его удельная работоспособность будет определяться площадью 1-2-5-6-1 или 7-2-5-8-7 (рис. 2)

$$l_p = T_a(S_a - S_M) = c_p T_M \ln \left[ \frac{T_a}{T_M} \left( \frac{p_M}{p_a} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \quad (7)$$

где  $T_M$  – температура сжатого воздуха в питающей магистрали.

Ввиду того, что после охлаждения  $T_M = T_a$  и, кроме того, энтальпия воздуха

$$i = c_p T_M = \frac{k}{k-1} RT_M$$

$$l_p = RT_M \ln \frac{p_M}{p_a}; \quad (8)$$

Удельная работоспособность в этом случае в  $p - V$  координатах изображается площадью  $a - b - e - d$ , что позволяет выделить две части, две разные составляющие

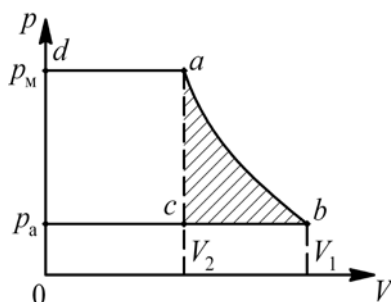


Рисунок 3 – Потенциальная энергия сжатого воздуха

механической работы, совершаемой газом. Работа, определяемая площадью  $a-c-e-d$  и равная  $V_2(p_M - p_a)$ , характерна для потока и совершается не за счёт изменения состояния газа в нем, а за счёт энергии, передаваемой через газ в потоке от внешнего источника (компрессора), т. е. в этом случае воздух выступает как кинематическое звено, связывающее компрессор с рабочей полостью пневмодвигателя. Эту часть работоспособности принято называть *транзитной* [5]. Площадь  $a-b-c$  будет соответствовать потенциальной энергии  $u$  сжатого воздуха, которая соответствует работе идеального компрессора при изотермическом процессе сжатия единицы массы воздуха от начальных условий до указанного объёма.

$$u = l_p - V_2(p_M - p_a) = RT_M \ln \frac{p_M}{p_a} - \frac{RT_M}{p_M}(p_M - p_a); \quad (9)$$

$$u = RT_M \left[ \ln \frac{1}{\sigma_a} - (1 - \sigma_a) \right]. \quad (10)$$

В пневмоагрегатах со встроенным резервуаром работу совершает покоящийся сжатый воздух в накопительной емкости (рис. 1). Поэтому для определения удельной работоспособности (эксергии) будем использовать выражение (10).

Полная работоспособность сжатого воздуха в накопительном резервуаре

$$E_s = uM = \frac{uW_{01}P_M}{RT_M}. \quad (11)$$

Или в безразмерной форме

$$\bar{E}_s = \frac{E_s}{A_0} = \lambda_{01} \left[ \ln \frac{1}{\sigma_a} - (1 - \sigma_a) \right]. \quad (12)$$

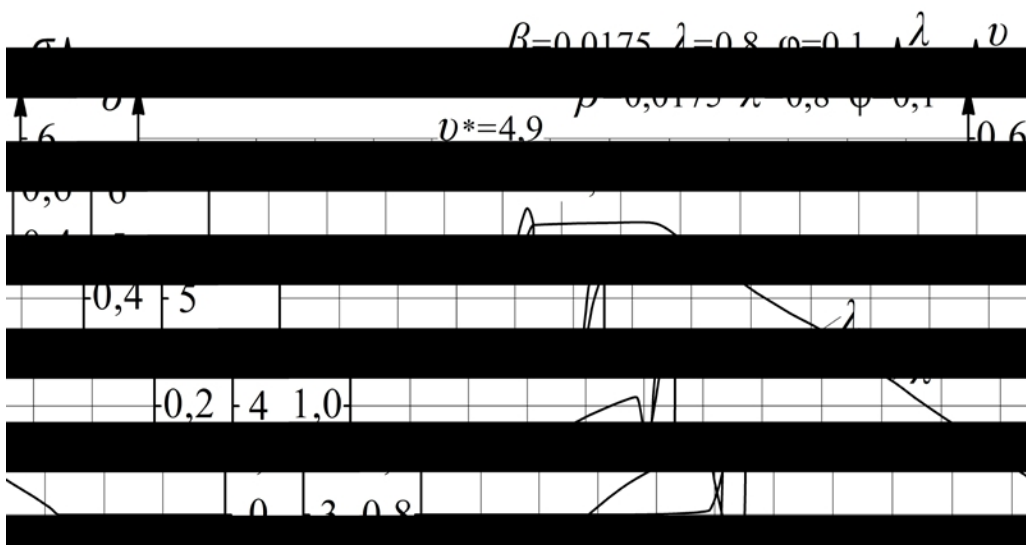


Рисунок 4 – Барохонная и динамическая диаграмма ударного пневмоагрегата

Барохронная и динамическая диаграмма ударного пневмоагрегата в безразмерной форме при критериях динамического подобия  $\beta = 0,0175$ ,  $\lambda_{01} = 0,8$ ,  $\varphi = 0,1$  представлена на рис. 4. На её основе получена  $p-V$  ( $\sigma - \lambda$ ) диаграмма, которая позволяет получить качественную и количественную оценку компонентов энергозатрат (рис. 5). На рис. 5  $S_{abcd} \sim \lambda_{01} \ln 1/\sigma_a$  – полная работоспособность потока сжатого воздуха, поступившего в накопительную ёмкость.  $S_{idcl} \sim \bar{E}_s$  – работоспособность покоящегося сжатого воздуха в накопительной ёмкости. Остальные компоненты энергозатрат сжатого воздуха представлены в таблице 1.

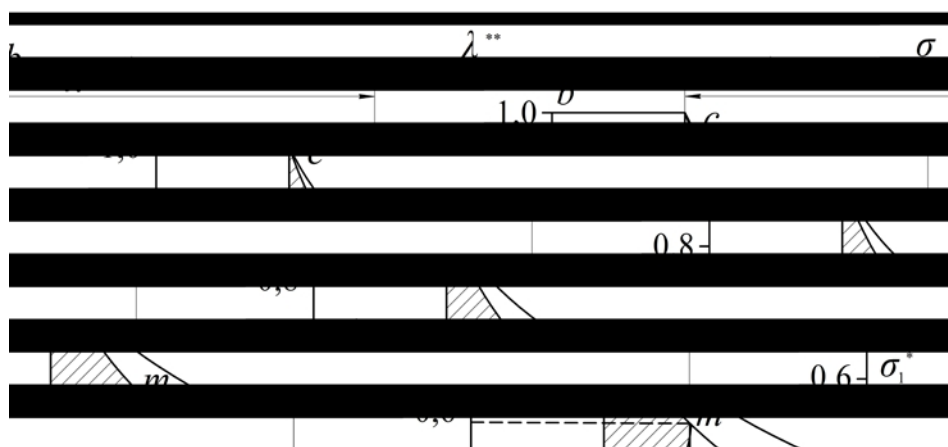


Рисунок 5 –  $p-V$  ( $\sigma - \lambda$ ) диаграмма процесса срабатывания ударного ПА

Таблица 1 – Компоненты потерь работоспособности сжатого воздуха

№ п/п	Вид потерь	Изображение в $\sigma - \lambda$ координатах	Расчётная формула
1	2	3	4
1	Полная работоспособность сжатого воздуха в накопительном резервуаре	$S_{idcl}$	$\bar{E}_s = \lambda_{01} [\ln 1/\sigma_a - (1 - \sigma_a)]$
2	Полная работа расширения воздуха в рабочей полости	$S_{ecel}$	$\bar{E}_s = \frac{\lambda_{01}}{k-1} \left[ 1 - \sigma_a^{\frac{k-1}{k}} \right] - \lambda_{01} \left( \frac{1 - \sigma_a^{1/k}}{\sigma_a^{1/k}} - 1 \right) \sigma_a$
3	Потеря работоспособности из-за несоответствия фактического процесса расширения идеальному	$S_{ecde}$	$\Delta \bar{E}_{\text{нп}} = \lambda_{01} \left[ \ln 1/\sigma_a - (1 - \sigma_a) - \frac{1 - \sigma_a^{1/k}}{k-1} + \sigma_a \left( \frac{1 - \sigma_a^{1/k}}{\sigma_a^{1/k}} - 1 \right) \right]$



1	2	3	4
4	Потеря работоспособности из-за неполноты расширения	$S_{nmen}$	$\Delta \bar{E}_{np} = \frac{(\lambda_{01} + \lambda^*) \sigma_1^*}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_{01} + \lambda^*}{\lambda_{01} + \lambda^{**}} \right)^{k-1} \right] - (\lambda^{**} - \lambda^*) \sigma_a,$ <p>Где <math>\lambda^{**} = \frac{\lambda_{01} (1 - \sigma_a^{1/k})}{\sigma_a^{k-1}}</math>;</p> <p><math>\lambda^*</math> – безразмерная координата расположения заготовки</p>
5	Работа расширения сжатого воздуха при срабатывании ударного ПА	$S_{lcmn}$	$\bar{E}_{pac} = \frac{\lambda_{01}}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{\lambda_{01}}{\lambda_{01} + \lambda^*} \right)^{k-1} \right] - \lambda^* \sigma_a$
6	Работа вытеснения сжатого воздуха из выхлопной полости	$S_{lkmn}$	$\bar{R}_B = \frac{1}{\Pi_{21}} [\varphi + \sigma_a (1 - \varphi)] \frac{1 + \lambda_{02}}{k-1} \times \left[ \left( \frac{\lambda_{02} + 1}{\lambda_{02} + 1 - \lambda^*} \right)^{k-1} - 1 \right] - \lambda^* \sigma_a$
7	Полезная работа расширения сжатого воздуха в рабочей полости	$S_{kcmk}$	$\bar{R} = \bar{E}_{pac} - \bar{R}_B$

В основе расчётных формул табл. 1 лежат зависимости (4) и (5).

Количественные значения компонент энергозатрат применительно к безразмерным параметрам  $\beta = 0,0175$ ,  $\lambda_{01} = 0,8$ ,  $\varphi = 0,1$  даны в виде процентной диаграммы на рис. 6.

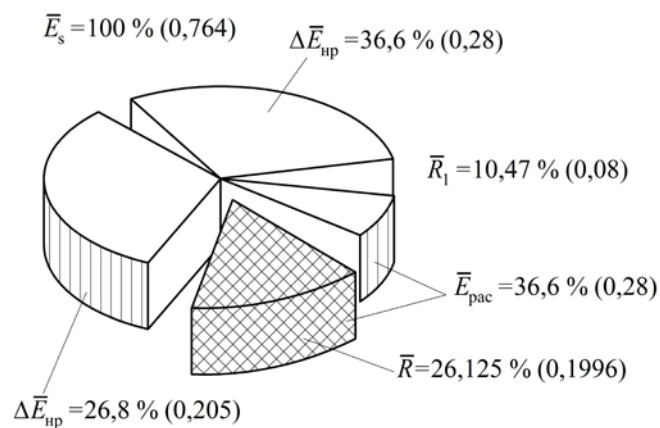


Рисунок 6 – Процентная диаграмма энергопотерь сжатого воздуха в ударном ПА при  $\beta = 0,0175$ ,  $\varphi = 0,1$  и  $\lambda_{01} = 0,8$

Из диаграммы на рис. 6 следует, что непроизводительные потери, на которые можно влиять путём рационального выбора параметров ПА, являются потери, связанные с неполнотой расширения ( $\Delta \bar{E}_{\text{нр}}$ ) и непроизводительной работой выталкивания сжатого воздуха из выхлопной полости ( $\bar{R}_1$ ).

Эксергический КПД ударного пневмоагрегата может быть определён как

$$\eta_s = \frac{\bar{R}}{\bar{E}_s}. \quad (13)$$

Графики-номограммы и расчётные формулы, устанавливающие зависимость основных кинематических параметров ударного ПА ( $\lambda^*$  – безразмерной координаты достижения максимальной скорости удара и  $v^*$  – максимальной безразмерной скорости удара при координате  $\lambda^*$ ) от основных критериев подобия  $\lambda_{01}$ ,  $\varphi$  и  $\sigma_a$  даны в работе [2] и представлены на рис. 7 и в виде зависимости (14).

$$\lambda^* = \frac{\left\{1 - [\varphi + \sigma_a(1 - \varphi)]^{1/k}\right\}(\lambda_{01} + \lambda_{02}\lambda_{01})}{\lambda_{01} + [\varphi + \sigma_a(1 - \varphi)]^{1/k}(1 + \lambda_{02})}. \quad (14)$$

Именно при этих значениях  $\lambda^*$  достигается не только максимальная скорость удара  $v^*$ , но и до минимума снижаются непроизводительные затраты работоспособности, связанные с неполнотой расширения воздуха в рабочей полости.

Зависимость основных энергетических показателей ударного ПА  $\eta_s$ ,  $\bar{M}$  и  $\bar{R}$  от основных критериев динамического подобия  $\lambda_{01}$  и  $\varphi$  представлена на рис. 8 в виде графиков- номограмм, которые построены при координате расположения заготовки, соответствующей оптимальному значению  $\lambda^*$  (14).

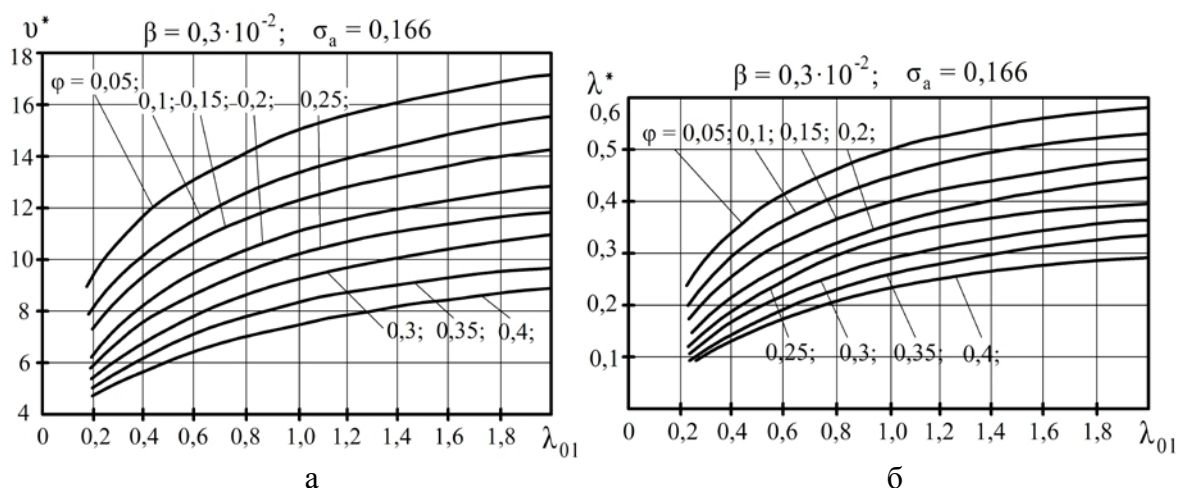


Рисунок 7 – Зависимость максимальной безразмерной скорости удара  $v^*$  (а) и координаты реализации максимальной скорости  $\lambda^*$  (б) от критериев подобия  $\lambda_{01}$  и  $\varphi$  при  $\sigma_a = 0,166$

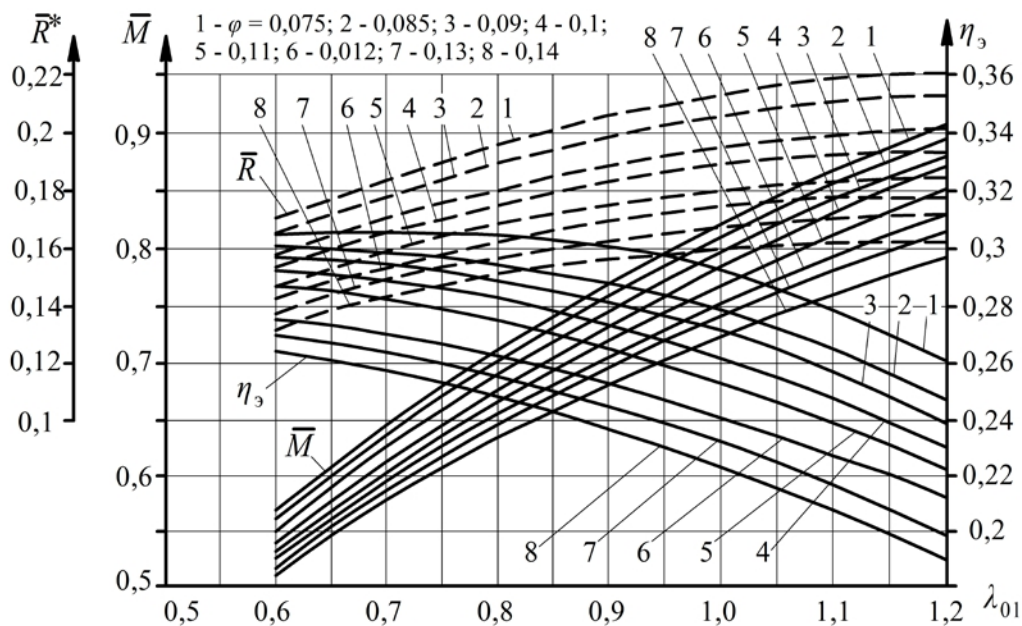


Рисунок 8 – Зависимости энергетических показателей ударного ПА от основных критериев динамического подобия

Графики-номограммы на рис. 8 позволяют расширить возможности оперативно-го инженерного анализа на основе выделения критериев динамического подобия и распространить его на оценку энергетических характеристик проектируемого ударного ПА.

**Выводы.** Изложенная методика и результаты анализа энергетических характеристик ударного ПА позволяют выявить основные источники непроизводительных энергозатрат и определить в пространстве безразмерных критериев динамического подобия область, обеспечивающую наиболее эффективную реализацию работоспособности сжатого воздуха.

#### Литература

1. Атаманов Ю.Л. Использование пневмоагрегата со встроенным резервуаром в ударных пневмомеханизмах клеймения металлопроката [текст] / Ю.Л. Атаманов, Г.А. Крутиков, М.Г. Стрижак // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2013. – №4/7(64). – С. 32–35.
2. Атаманов Ю.Л. Инженерная методика расчёта кинематических параметров ударного пневмоагрегата со встроенным резервуаром [текст] / Ю.Л. Атаманов, Г.А. Крутиков, М.Г. Стрижак // Східно-європейський журнал передових технологій. – 2013. – №5/7(65). – С. 54–58.
3. Бродянский В.М. Эксергический метод термодинамического анализа. – М.: Машиностроение. – 1985. – 272 с.
4. Перельцвайг М.И. Исследование динамики ударного пневматического поршневого привода // М.И. Перельцвайг. Анализ и синтез машин-автоматов. – М.: Наука, 1964. – С. 164–170.

5. Цейтлин Ю.А., Мурзин В.А. Пневматические установки шахт. – М.:Недра, 1985. – 354 с.

Bibliography (transliterated)

1. Atamanov Yu.L. Ispolzovanie pnevmoagregata so vstroennyim rezervurom v udarnykh pnevmomehanizmakh kleymeniya metalloprokata [tekst] Yu.L. Atamanov, G.A. Krutikov, M.G. Strizhak *Shldno-Evropeyskiy zhurnal peredovih tehnologiy*. – 2013. – #4/7(64). – P. 32–35.

2. Atamanov Yu. L. Inzhenernaya metodika raschYota kinematicheskikh parametrov udarnogo pnevmoagregata so vstroennyim rezervurom [tekst] Yu.L. Atamanov, G.A. Krutikov, M.G. Strizhak *Shldno-Evropeyskiy zhurnal peredovih tehnologiy*. – 2013. – #5/7(65). – P. 54–58.

3. Brodyanskiy V.M. Eksnergicheskiy metod termodinamicheskogo analiza. – М.: Mashinostroenie. – 1985. – 272 p.

4. Pereltsvayg M.I. Issledovanie dinamiki udarnogo pnevmaticheskogo porshneвого privoda M.I. Pereltsvayg. *Analiz i sintez mashin-avtomatov*. – М.: Nauka, 1964. – P. 164–170 p.

5. Tseytlin Yu.A., Murzin V.A. Pnevmaticheskie ustanovki shaht. – М.:Nedra, 1985. – 354 p.

УДК 621.05

Атаманов Ю.Л., Крутіков Г.А., Стрижак М.Г.

**АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК УДАРНИХ ПНЕВМОАГРЕГАТИВ З ВБУДОВАНИМ РЕЗЕРВУАРОМ**

Викладена методика і результати аналізу енергетичних характеристик ударного ПА, що дозволяють виявити основні джерела непродуктивних енерговитрат і визначити в просторі безрозмірних критеріїв динамічної подоби область, що забезпечує найбільш ефективну реалізацію працездатності стисненого повітря.

Atamanov J., Krutikov G., Strizhak M.

**ANALYSIS OF THE ENERGY CHARACTERISTICS OF THE SHOCK PNEUMOUNT WITH INTEGRATED RESERVOIR**

The technique and the results of analysis of the energy characteristics of the shock PA, allowing to identify the main sources of energy and identify unproductive in the space of dimensionless criteria of dynamic similarity region, providing the most efficient implementation of compressed air efficiency.

Вурье Б.А., Гордюхин А.А.

## СИНТЕЗ МНОГОРЕЖИМНЫХ ГИДРОПНЕВМОАГРЕГАТОВ

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

**2. Постановка проблемы.** Автоматизированное проектирование многорежимных гидропневмоагрегатов связано с проведением таких этапов как: математическое моделирование описания работы системы управления в виде графа операций, описывающего различные контуры работы системы; выделения контуров в графе операций; составление минимального описания системы управления в виде матрицы соответствий; получения минимальной системы уравнений, описывающих схему; реализация уравнений средствами гидропневмоавтоматики с целью получения минимальной схемы.

**3. Литературный обзор.** При синтезе систем гидропневмоагрегатов используется стандартная позиционная структура, имеющая известные преимущества, основным недостатком которой является сложность схем. Частичная минимизация стандартной позиционной структуры была предложена в работах Юдицкого С.А., Goedecke W., Belforte G., и др. [1–3].

Метод полной минимизации стандартной позиционной структуры был впервые предложен Черкашенко М.В. [4]. Он основан на синтезе минимального графа операций и синтезе уравнений с использованием матрицы соответствий [4,5].

**4. Основная часть.** В настоящей работе рассмотрены этапы автоматизированного проектирования рациональных схем автоматических манипуляторов. Показана возможность синтеза многорежимных схем гидропневмоагрегатов. Метод проектирования покажем на примере синтеза пневматической системы управления автоматического манипулятора.

Работа манипулятора осуществляется следующим образом.

Исполнительными устройствами манипулятора служат пневматические цилиндры Ц1-Ц5. Взаимодействие входных и исполнительных устройств показано в табл. 1. Описание работы манипулятора представим в виде графа операций [1].

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

операцій к другим. Виходний набір  $z_v$  , содержит входи узлов, которые изменили свои значения на данном переходе.

Таблица 1 – Взаимодействие входных и исполнительных устройств

Исполнительные устройства		Входные сигналы	
Обозначение	Наименование	Исходное положение	Конечное положение
Ц1	Выдвижение руки	$x_2$	$x_3$
Ц2	Захват	$x_4$	$x_5$
Ц3	Подъем руки	$x_6$	$x_7$
Ц4	Поворот руки		
Ц5	Отвод заготовки		

$x_1$  – кнопка пуска;  $\bar{x}_{10}$  – непредвиденная ситуация (отсутствие детали, неправильное месторасположение и т.п.)

В основу алгоритма выделения контуров в орграфе в данном случае положено нахождения определителя матрицы и выбор из множества слагаемых подмножества, которое отвечает множеству контуров рассматриваемого орграфа.

Пусть задан граф операций  $G$  (рис. 1).

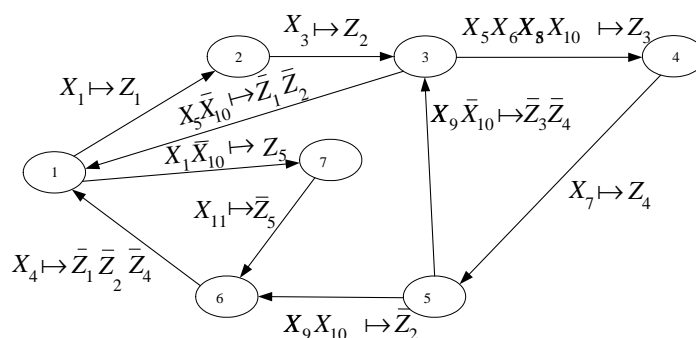


Рисунок 1 – Граф операций манипулятора

Матрица смежности его вершин

$$R = \begin{pmatrix} 0 & x_1 \mapsto z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 x_{10} \mapsto z_3 \\ 0 & 0 & x_3 \mapsto z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_5 \bar{x}_{10} \mapsto \bar{z}_1 \bar{z}_2 & 0 & 0 & x_5 x_{10} \mapsto z_3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & x_7 \mapsto z_4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_9 \bar{x}_{11} \mapsto \bar{z}_3 \bar{z}_4 & 0 & 0 & 0 & x_9 x_{11} \mapsto z_1 & 0 \\ x_3 \mapsto \bar{z}_1 \bar{z}_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_7 \mapsto \bar{z}_3 & 0 \end{pmatrix}$$

Приводим заданную матрицу  $R$  к виду  $R \cup E$ , где  $E$  – единичная матрица, и вычисляем ее определитель

$$R = \begin{pmatrix} 1 & x_1 \mapsto z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_1 x_{10} \mapsto z_3 \\ 0 & 1 & x_3 \mapsto z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ x_5 \bar{x}_{10} \mapsto \bar{z}_1 z_2 & 0 & 1 & x_5 x_{10} \mapsto z_3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & x_7 \mapsto z_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & x_9 \bar{x}_{11} \mapsto \bar{z}_3 \bar{z}_4 & 0 & 1 & x_9 x_{11} \mapsto z_1 & 0 \\ x_3 \mapsto \bar{z}_1 \bar{z}_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_7 \mapsto \bar{z}_3 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\Delta = 1 + (x_1 \mapsto z_1)(x_3 \mapsto z_2)(x_5 x_{10} \mapsto z_3)(x_7 \mapsto z_4)(x_9 x_{11} \mapsto z_1)(x_3 \mapsto \bar{z}_1 \bar{z}_4) + (x_5 x_{10} \mapsto z_3)(x_7 \mapsto z_4)(x_9 \bar{x}_{11} \mapsto \bar{z}_3 \bar{z}_4) + (x_1 \mapsto z_1)(x_3 \mapsto z_2)(x_5 \bar{x}_{10} \mapsto \bar{z}_1 z_2) - (x_1 x_{10} \mapsto z_3)(x_7 \mapsto \bar{z}_3)(x_3 \mapsto \bar{z}_1 \bar{z}_4) - (x_1 x_{10} \mapsto z_3)(x_7 \mapsto \bar{z}_3)(x_3 \mapsto \bar{z}_1 \bar{z}_4)(x_5 x_{10} \mapsto z_3)(x_7 \mapsto z_4)(x_9 \bar{x}_{11} \mapsto \bar{z}_3 \bar{z}_4).$$

Контуры (или группа контуров, которые не имеют пересекающихся вершин отвечают слагаемым определителя  $\Delta$  матрицы  $R \cup E$ , так как в соответствии с определением слагаемые определителя находят как  $\sum_{u_{1\alpha} u_{2\beta} \dots u_{n\omega}}$ , где  $u_{1\alpha}$  и т.д. – соответствующие элементы матрицы  $\alpha, \beta, \dots, \omega$  пробегают все возможные значения ( $A(!)$  перестановок из чисел  $1 \dots n$ ), т.е. каждое слагаемое содержит по одному элементу из каждой строки и каждого столбца матрицы  $R \cup E$ .

В то же время любая подматрица  $R'$  (где  $\cup R' = R$ ), отвечающая одному контуру или группе контуров, не имеющих вершин, которые пересекаются, содержит также не больше одного элемента в каждой строке и столбце, поскольку в каждую вершину контура входит и из нее выходит одна дуга. Итак, контуры или группы контуров, которые не имеют пересекающихся вершин, отвечают слагаемым, образованным элементами  $U \in u_{ij}$  и единицами главной диагонали.

Для выделения из слагаемых определителя  $\Delta$  подмножества слагаемых, которые отвечают контурам графа  $G$ , необходимо выбрать такие слагаемые, в которых

$$t_{\min} = n - 1, \tag{1}$$

где  $t_{\min}$  – минимальное число транспозиций (основных перестановок) матрицы  $E = \parallel u_{ii} \parallel$ , необходимое для получения рассматриваемого слагаемого.

Под транспозицией понимается операция обмена вторыми индексами двух элементов матрицы смежности вершин графа. Так, для элементов  $u_{ij}$  и  $u_{\xi\zeta}$  после применения операции транспозиции получаем  $u_{i\zeta}$  и  $u_{\xi j}$ .

Можно показать, что контур, который содержит  $n$  вершин, может быть синтезирован  $n - 1$  транспозицией. Итак, слагаемые, которые отвечают группам контуров, не удовлетворяют условию (1), поскольку в этом случае  $n - t_{\min} > 1$ .

Минимальное число транспозиций для синтеза одного контура может быть получено последовательным сканированием строк подматрицы  $R'$ , отвечающей ему, и транспозицией элемента  $u_{ij}$  на соответствующее место.

Например, слагаемое  $(x_1 \mapsto z_1)(x_3 \mapsto z_2)(x_5x_{10} \mapsto z_3)(x_7 \mapsto z_4)(x_9x_{11} \mapsto z_1)(x_3 \mapsto \bar{z}_1\bar{z}_4)$  может быть получено из матрицы  $E = \|u_{ii}\|$  в результате пяти транспозиций, указанных

в следующих преобразованиях:  $\begin{pmatrix} u_{11}u_{22}u_{33}u_{44}u_{55}u_{66} \\ u_{12}u_{21}u_{33}u_{44}u_{55}u_{61} \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} u_{12}u_{21}u_{33}u_{44}u_{55}u_{66} \\ u_{12}u_{23}u_{31}u_{44}u_{55}u_{66} \end{pmatrix};$   
 $\begin{pmatrix} u_{12}u_{23}u_{31}u_{44}u_{55}u_{66} \\ u_{12}u_{23}u_{34}u_{41}u_{55}u_{66} \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} u_{12}u_{23}u_{34}u_{41}u_{55}u_{66} \\ u_{12}u_{23}u_{34}u_{45}u_{51}u_{66} \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} u_{12}u_{23}u_{34}u_{45}u_{51}u_{66} \\ u_{12}u_{23}u_{34}u_{45}u_{56}u_{61} \end{pmatrix}.$

Итак, слагаемое, которое рассматривается, удовлетворяет условию (1), и элементы данного слагаемого отвечают элементам, нагружающим дуги одного контура графа.

Аналогично находим, что элементам, нагружающим ребра контуров графа, отвечают следующие слагаемые:  $(x_5x_{10} \mapsto z_3)(x_7 \mapsto z_4)(x_9\bar{x}_{11} \mapsto \bar{z}_3\bar{z}_4),$   
 $(x_1 \mapsto z_1)(x_3 \mapsto z_2)(x_5\bar{x}_{10} \mapsto \bar{z}_1\bar{z}_2), (x_1x_{10} \mapsto z_3)(x_7 \mapsto \bar{z}_3)(x_3 \mapsto \bar{z}_1\bar{z}_4).$

Лишь  $(x_1x_{10} \mapsto z_3)(x_7 \mapsto \bar{z}_3)(x_3 \mapsto \bar{z}_1\bar{z}_4)(x_5x_{10} \mapsto z_3)(x_7 \mapsto z_4)(x_9\bar{x}_{11} \mapsto \bar{z}_3\bar{z}_4)$  не удовлетворяет условию (1) и отвечает двум контурам с непересекающимися вершинами. Итак, все слагаемые определителя, которые удовлетворяют условию (1), являются контурами.

Построим матрицу [5] соответствий для контура, включающего вершины 1,2,3,4,5,6, которая имеет вид

	$x_1x_2$	$x_3x_6$	$x_5x_6x_8x_{10}$	$x_7$	$x_6x_9$	$x_4x_7$
$x_2x_4x_6x_8 \mapsto \emptyset$	0	0	0	0	0	1
$x_1x_2, x_4x_6x_8 \mapsto z_1$	<b>1</b>	0	0	0	0	1
$x_3, x_4x_6x_8 \mapsto z_2$	0	<b>1</b>	0	0	0	1
$x_5x_6x_8x_{10}x_3 \mapsto z_3$	0	1	<b>1</b>	0	0	0
$x_7, x_3x_5x_8 \mapsto z_4$	0	1	0	<b>1</b>	0	0
$x_9x_{10}, x_3x_5x_7 \mapsto \bar{z}_2$	0	1	0	1	<b>1</b>	0
$x_4, x_3x_7x_9 \mapsto \bar{z}_1\bar{z}_3\bar{z}_4$	0	1	0	1	1	<b>1</b>

Здесь жирные единицы соответствуют переходам, а наклонные – требующие устранения. Поэтому во втором столбце добавлен сигнал  $x_6$ , а в последнем – сигнал  $x_7$ . Из матрицы и по графу с условием переключения режимов получаем следующую систему уравнений:

$$z_1 = x_1x_2; \quad z_2 = x_3x_6; \quad z_3 = x_5x_6x_8x_{10}; \quad z_4 = x_7; \quad z_5 = x_1\bar{x}_{10}; \quad \bar{z}_1 = x_4x_7 + x_5\bar{x}_{10};$$

$$\bar{z}_2 = x_9x_{10} + x_5\bar{x}_{10}; \quad \bar{z}_3 = x_4x_7 + x_9\bar{x}_{10}; \quad \bar{z}_4 = x_4x_7 + x_9\bar{x}_{10}; \quad \bar{z}_5 = x_{11}.$$

Далее следует определить наиболее повторяющиеся фрагменты уравнений, т.е. выделить их общие части, а именно ввести в систему уравнений множество  $W$  наиболее часто повторяющихся общих частей. При автоматизированном проектировании следует построить матрицу  $R_{G_m}$  непосредственно по элементарным конъюнкциям системы уравнений. Строки и столбцы матрицы соответствуют переменным, а на пересечении строки и столбца ставится 1, если переменная входит 1 раз в конъюнкцию, 2 –



если входит 2 раза и т.д. Матрица  $R_{G_m}$  симметрична относительно главной диагонали и имеет вид

$$R_{G_m} = \begin{matrix} & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 & x_7 & x_8 & x_9 & x_{10} & \bar{x}_{10} & x_{11} \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \\ x_{10} \\ \bar{x}_{10} \\ x_{11} \end{matrix} & \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & & & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 2 & 0 & 0 \\ & & & & & & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ & & & & & & & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ & & & & & & & & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & 0 & 1 & 2 & 0 \\ & & & & & & & & & & 0 & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & 0 & 0 \\ & & & & & & & & & & & & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

Из матрицы видно, что наиболее часто повторяются выражения  $x_4x_7 - 3$  раза,  $x_5\bar{x}_{10}$  и  $x_9\bar{x}_{10} - 2$  раза и т.д. Преобразованная система уравнений имеет вид  $w_1 = x_4x_7$ ;  $w_2 = x_5\bar{x}_{10}$ ;  $w_3 = x_9\bar{x}_{10}$ ;  $z_1 = x_1x_2$ ;  $z_2 = x_3x_6$ ;  $z_3 = x_5x_6x_8x_{10}$ ;  $z_4 = x_7$ ;  $z_5 = x_1\bar{x}_{10}$ ;  $\bar{z}_1 = w_1 + w_2$ ;  $\bar{z}_2 = x_9x_{10} + w_2$ ;  $\bar{z}_3 = \bar{z}_4 = w_1 + w_3$ ;  $\bar{z}_5 = x_{11}$ .

По полученной системе уравнений построим схему манипулятора (рис. 2) [5,6].

Таким образом, представленный метод автоматизированного проектирования систем управления пневмоагрегатов является эффективным и позволяет получить технико-экономический эффект.

### Литература

1. Юдицкий С.А. К вопросу описания и синтеза дискретных систем промышленной автоматики// Техническая кибернетика.– 1976.– №1.– С. 131–141.
2. Belforte G. Progettazione di circuiti pneumatici par sistemi flessibili e con intelligenza artificiale: aspetti energetici// Fluid apparecchiature idrauliche e pneumatiche.– 1983.– N225.– P. 65–69.
3. Goedecke W.D. Bemerkungen zum gesprach taktkett contra lodic?// Olhydraulic and pneumatik.– 1978.– N12.– P. 678–680.
4. Cherkashenko M. and ets. Synthesis of discrete control systems of industrial robots// Automation and Remote Control (USA).– 1981.– V42, N5.– P. 676–680.

5. Черкашенко М.В. Метод логического проектирования дискретных систем управления машин-автоматов с пневмо- или гидроприводом. Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления.– М.: Машиностроение, 1981. Вып. 8.– С. 181–189.

6. Черкашенко М.В. Синтез минимальных схем гидропнеumoагрегатов / Под ред. Вурье Б.А.– М.: Пневмогидромашины.– 2013.– 265 с.

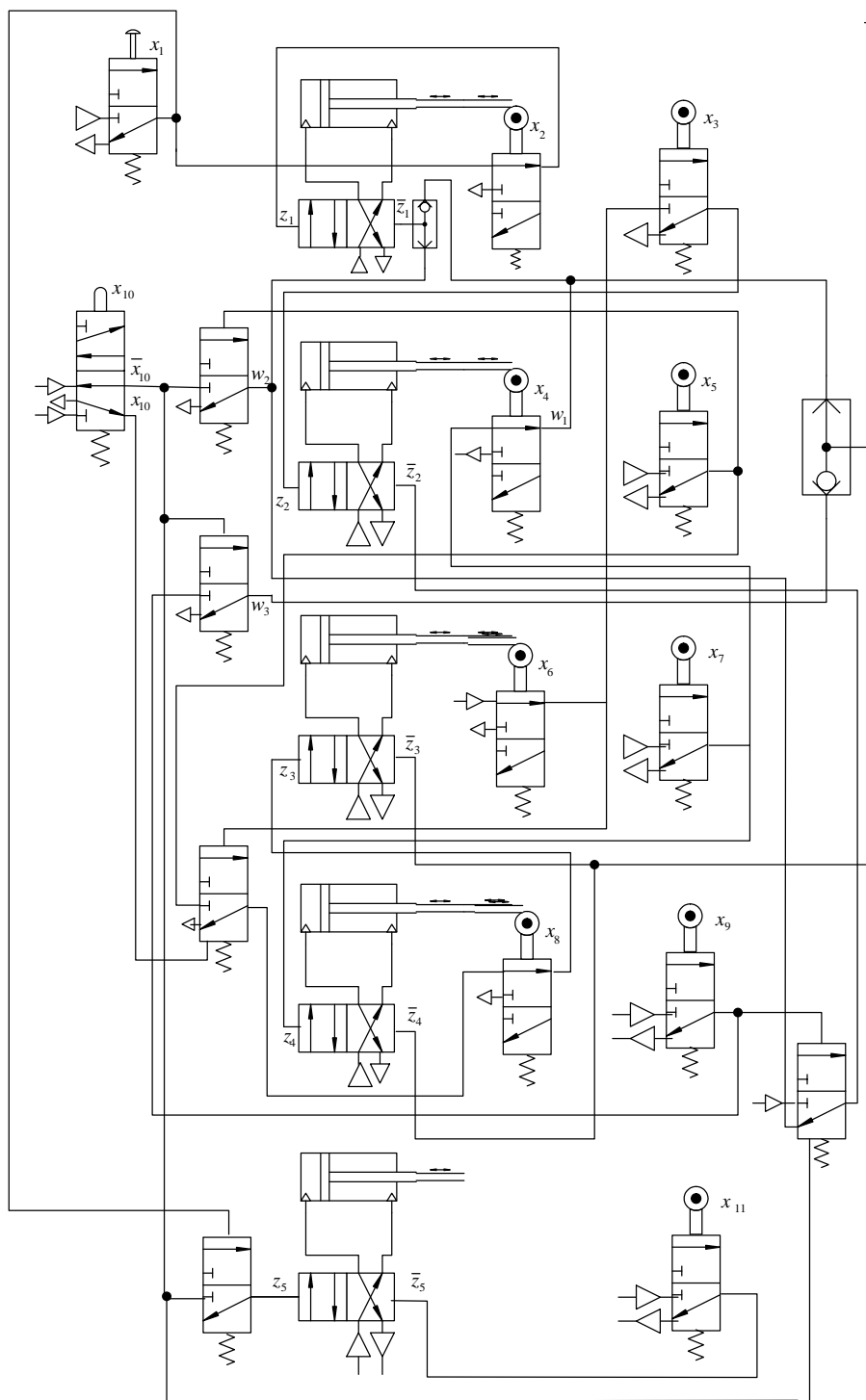


Рисунок 2 – Пневматическая схема манипулятора

Bibliography (transliterated)

1. Yuditskiy S.A. K voprosu opisaniya i sinteza diskretnyih sistem promyshlennoy avtomatiki Tehnicheskaya kibernetika.– 1976.– #1.– P. 131–141.
2. Belforte G. Progettazione di circuiti pneumatici par sistemi flessibili e con intelligenza artificiale: aspetti energetici Fluid apparecchiature idrauliche e pneumatiche.– 1983.– N225.– P. 65–69.
3. Goedecke W.D. Bemerkungen zum gesprach taktkett contra lodic? Olhydraulic and pneumatik.– 1978.– N12.– P. 678–680.
4. Cherkashenko M. and ets. Synthesis of discrete control systems of industrial robots Automation and Remote Control (USA).– 1981.– V42, N5.– P. 676–680.
5. Cherkashenko M.V. Metod logicheskogo proektirovaniya diskretnyih sistem upravleniya mashin-avtomatov s pnevmo- ili gidroprivodom. Pnevmatika i gidravlika. Privodyi i sistemy upravleniya.– M.: Mashinostroenie, 1981. Vyip. 8.– P. 181–189.
6. Cherkashenko M.V. Sintez minimalnyih shem gidropnevmoagregatov Pod red. Vure B.A.– M.: Pnevmo gidromashiny.– 2013.– 265 p.

УДК 621.225

Вур'є Б.О., Гордюхин О.О.

**СИНТЕЗ БАГАТОРЕЖИМНИХ ГІДРОПНЕВМОАГРЕГАТІВ**

Розглянуто етапи автоматизованого проектування раціональних схем автоматичних маніпуляторів. Показана можливість синтезу багаторежимних схем гідропневмоагрегатів.

Vurye B.A. Gorduhin A.A.

**SYNTHESIS OF MULTIMODE HYDROPNEUMOUNITS**

Stages of the automated designing of rational schemes of automatic manipulators are considered examined. The opportunity of synthesis of multimode schemes of hydropneumounits is shown.

УДК 623.4

Оксенич Н.В., Долженко И.Ю., Комар Ю.Е., Мельник С.А., Беличенко А.В.

## АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ФОРМИРОВАНИЯ ОБЛИКА КОМПЛЕКСОВ ОСНОВНОГО ВООРУЖЕНИЯ ТАНКОВ

### Введение

Формирование облика танка как сложной технической системы всегда происходило на стыке трех факторов, имманентно оказывающих влияние на конструкцию машины. Это - огневая мощь, подвижность и защищенность. Параметры огневой мощи танка неразрывно связаны с системой основного вооружения танка – танковым пушечным комплексом (ТПК). Следуя из задач, которые ставятся перед таким объектом как танк, определились требования и к средствам поражения.

В данной публикации рассмотрены существующие схемы построения требований к элементам, формирующим огневую мощь танков, а также их реализация в конкретных образцах.

Предложенная в работе [1] схема синтеза совокупного опыта в проектировании с использованием аппарата теории размерности и подобия различных высокотехнологичных образцов техники может и должна быть экстраполирована на объекты бронетанковой техники.

### 1. Базовые требования к основному вооружению танка

Непрерывная хронологическая трансформация требований и изменение характера современных боевых столкновений формировали ряд ограничений для ТПК основного боевого танка. Однако в последние 25–30 лет произошла некоторая стабилизация базовых доминирующих требований к ТПК:

А. Оптимизация характеристик ТПК по выстрелу с бронебойным оперенным подкалиберным снарядом (БОПС) как основного средства поражения танка из условия максимально достижимого кинетического воздействия на защищенную цель: максимальное могущество и минимальная потеря скорости на дистанциях до 2...2,5 км.

Б. Калибр – не менее 120...125 мм, обеспечивающий уровень дульной энергии не менее 5 МДж.

В. Обеспечение уравниваемости качающейся части при относительном удлинении ствола в пределах 40...55.

Г. Установка ТПК из условий минимизации забронированного объема в целом и боевого отделения в частности.

Д. Совместимость всех типов выстрелов с автоматизированной боеукладкой и автоматом заряжания.

Е. Экономическая целесообразность.

С формальных позиций, исходя из вышеприведенного, проектное задание по модернизации или разработке нового образца ТП на основании данного набора требований формулируется в виде вариационной задачи согласно пункту «А» с условными ограничениями «Б»–«Е».

Одной из актуальных задач в области модернизации ТПК является повышение бронепробиваемости БОПС в связи с повышением защищенности объектов бронетехники до 800 ... 1000 мм гомогенной брони в эквиваленте [3].

Таким образом, пути решения данной задачи ограничиваются набором конструктивных мероприятий, направленных на улучшение внешне- и внутрибаллистических характеристик ТПК:

- а) увеличение калибра;
- б) увеличением удлинения ствола (длина ствола в калибрах);
- в) повышением (либо управлением) давления в процессе выстрела;
- г) совершенствование материалов и геометрии сердечника полетной части БОПС;
- д) совершенствованием аэродинамики БОПС.

Экстенсивное наращивание могущества танковых пушек за счет увеличения калибра свыше 125 мм, а равно как и удлинения ствола свыше 55 входит в конфликт с некоторыми определяющими облик основного танка параметрами, вследствие чего возникают проблемы компоновочного характера, такие как: обязательное наличие автомата заряжания вследствие роста массы выстрела, рост бронированного объема, проблемы уравнивания орудия и пр.

Максимальные рабочие давления в ТПК во время работы выстрелом типа БОПС на данный момент достигают 710 МПа [4], что практически исчерпывает прочностные возможности конструкционных материалов для труб (стали типа 30ХН2МФА), а также отрицательно влияет на живучесть орудия. Стоит отметить, что проблема живучести ствола ТПК как самого изнашиваемого элемента конструкции может быть успешно решена посредством нанесения на внутреннюю поверхность соответствующих защитных покрытий [5].

Ведутся работы в деле разработки и производства высококалорийных твердых метательных веществ, продолжают разработки порохов с низкими значениями молекулярной массы компонентов, что прогрессивно скажется на параметрах горения, а значит и на кинетической энергии, как основной полезной функции БОПС. Сюда же можно отнести работы по локальному уменьшению максимального давления и «размазывания» его вдоль всего цикла выстрела (тем самым обеспечивается рост интегрального значения внутрибаллистической работы пороховых газов).

В области совершенствования параметров БОПС, по-видимому, наблюдается немалые резервы для модернизации: наращивание удлинения и массы полетной части, снижение ее аэродинамического сопротивления на траектории, введение в конструкцию ведущего по стволу устройства неметаллических материалов снижающих его «паразитную» массу. [4].

Принципы детерминированной классификации по безразмерным параметрам подобия (критериям) доказали свою состоятельность [8] и перспективность использования ввиду замены полуэмпирических оценок фундаментальным аппаратом теории размерности и подобия.

Далее приведено сравнение по ключевым параметрам основных образцов отечественных и зарубежных образцов БОПС как одного из главных элементов ТПК с использованием критериев подобия, принципы формирования и аппликация которых на различные группы объектов техники подробно описаны в работах [1 и др.].

## **2. Сопоставительный анализ ТПК по критерию энергетического совершенства**

Для ТПК при использовании БОПС запись критерия энергетического совершенства выражается в виде [1]:

$$\eta_E = \frac{E_k}{E_n} = \frac{m_{cn} w_0^2}{2 \cdot m_n Q_n},$$

где  $m_{cn}$  - масса полетной части снаряда,  $w_0$  - начальная скорость снаряда,  $Q_n$  - низшая удельная теплотворная способность (калорийность) порохового заряда,  $m_n$  - масса порохового заряда.

В данном классе снарядов доминирующим фактором траекторного процесса является волновое сопротивление, определяемое главным образом геометрией полетной части БОПС в целом и удлинением  $l$  в частности, которое, в связи с этим, используется в качестве критериальной координаты (ось абсцисс).

Анализируя диаграмму на рис. 1, можно отметить преобладание энергетической функции (ось ординат) у комплексов семейства 2А46/КБА3 (группа 1) что связано с преобладанием скоростных характеристик перед комплексами на базе ТПК L44, L55/M256 (группа 2). Следует отметить, что данный параметр не является достаточным для составления каких-либо заключений о состоятельности системы, а лишь позволяет определить некоторый промежуточный показатель полноты превращения потенциальной энергии порохового заряда в кинетическую энергию снаряда.

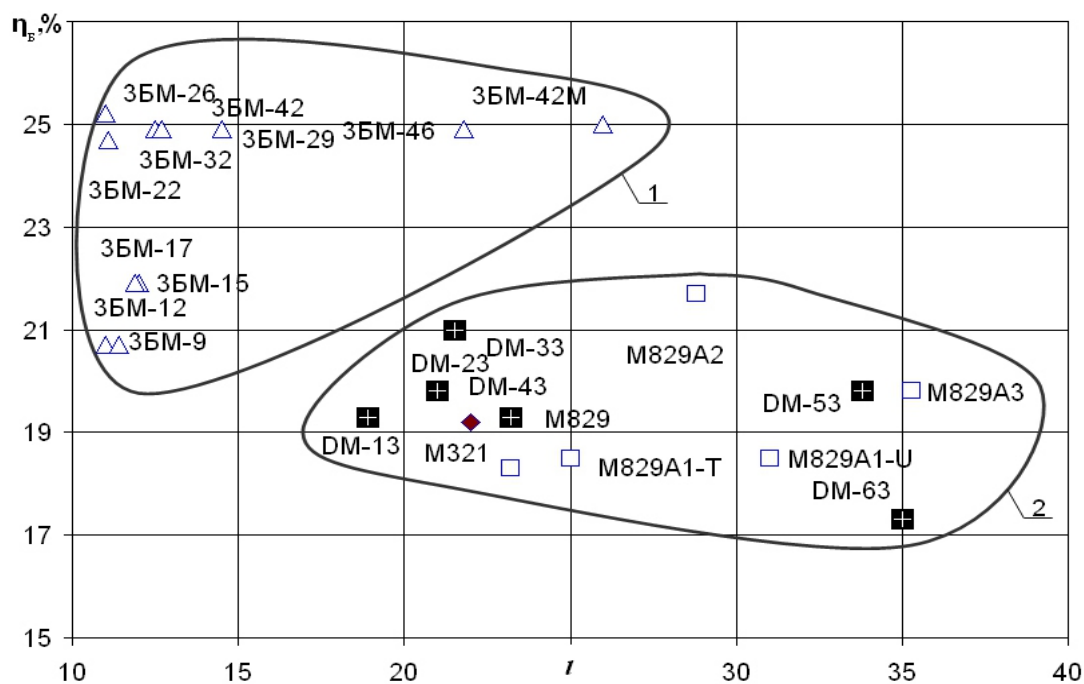


Рисунок 1 – Зависимость  $\eta_a$  от удлинения БЛА (страны-производители:

△ – СССР/Россия, ■ – Германия, □ – США, ◆ – Израиль)

### 3. Критериальные оценки ТПК на основе критерия бронепробития

Оценка полезной функции для ТПК с БОПС может быть выражена показателем конечного воздействия (бронепробития) [2]:

$$B = K \frac{2m_{cn} w_0^2}{\sigma \rho d_{cn}^2} \cos^{1.5} \alpha,$$

где  $m_{сн}$  – масса ПЧ БОПС,  $w_c^2$  – скорость ПЧ у цели,  $d_c$  – характерный размер БОПС,  $K$  – эмпирический коэффициент линейности,  $\sigma$  – предел прочности преграды на сжатие,  $\alpha$  – угол наклона преграды к нормали.

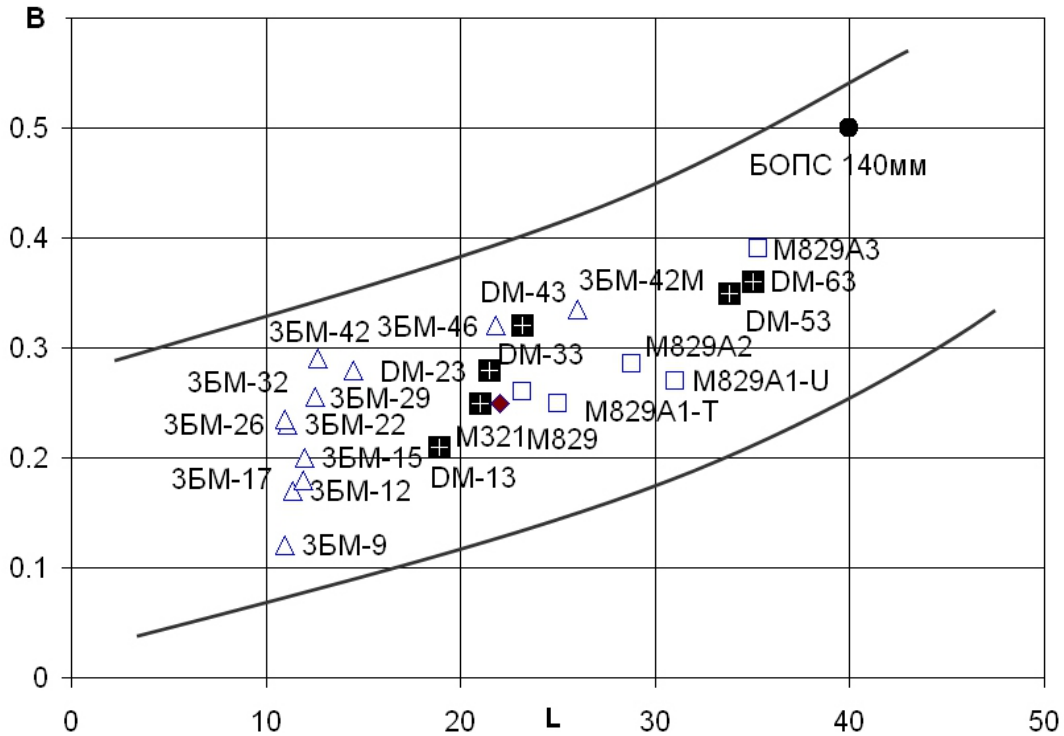


Рисунок 2 – Зависимость  $B$  от удлинения БОПС

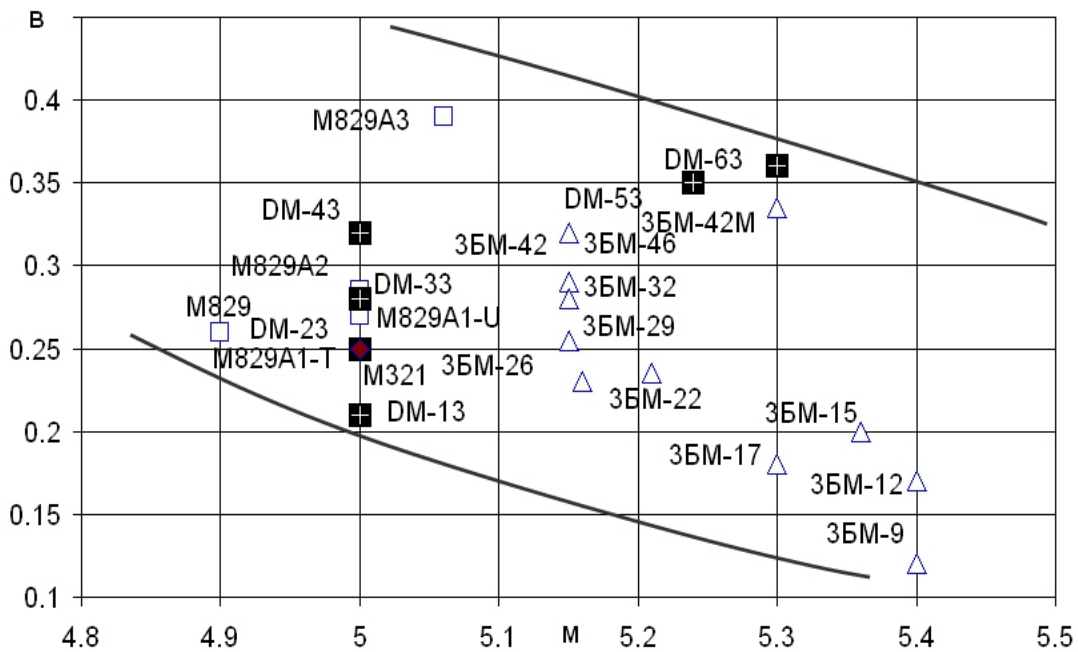


Рисунок 3 – Зависимость  $B$  от числа Маха у среза ствола  $M_{ст}$

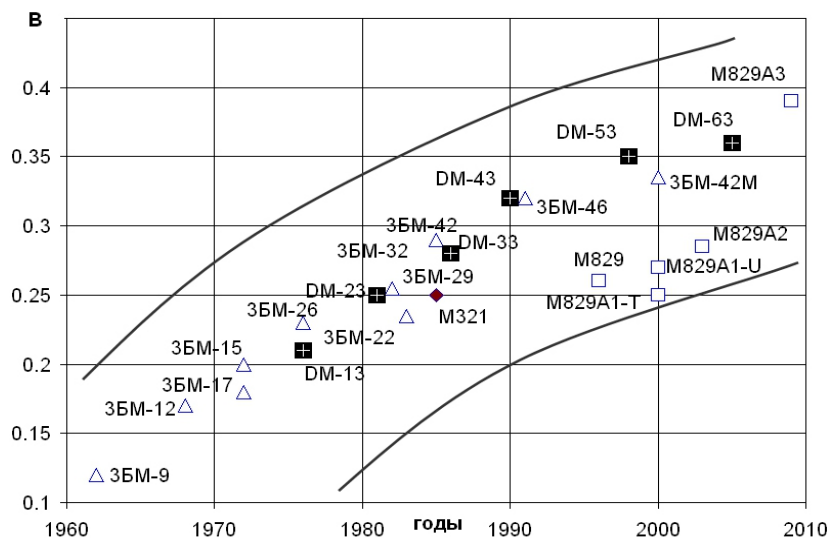


Рисунок 4 – Хронологическое развитие полезной функции БОПС

Диаграмма (рисунок 2) явственно демонстрирует зависимость полезной функции от удлинения БОПС. Данная тенденция характерна для СК с БОПС со времен их появления и имеет две основные причины:

- 1) при прочих равных условиях БОПС с бóльшим удлинением будет иметь меньшее поперечное сечение, а значит меньшую площадь контакта с преградой, и как следствие – воздействовать на нее с бóльшим напряжением, что означает рост величины бронепробития;
- 2) уменьшение площади миделевого сечения приводит к снижению силы аэродинамического сопротивления:

$$X = C_x \frac{\rho w^2}{2} S_M,$$

где  $C_x$  – коэффициент аэродинамического сопротивления,  $\rho$  – плотность воздуха,  $w$  – скорость ПЧ БОПС,  $S_M$  – площадь миделевого сечения.

Особенно отчетливо стремление к реализации системного принципа увеличения удлинения ПЧ БОПС характерно для комплексов производства Германии (рисунок 5, показаны ПЧ БОПС с ведущими системами) [6].

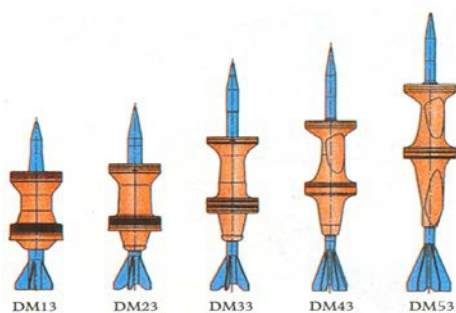


Рисунок 5 – Пример геометрической трансформации облика БОПС с целью повышения бронепробития



Диспозиція в критеріальному пространстві  $B(M_{CT})$  отражає парадоксальну ситуацію, коли якби з ростом початкової швидкості зменшується критерій кінцевого впливу, що має наступне пояснення.

– Група БОПС виробництва СРСР (вип. БМ-9, БМ-12, БМ-15, БМ-22 і др.), яка має екстремальні в класі початкові швидкості ( $w_0 = 1750 \dots 1785 \frac{м}{с}$ ), тим не менше втрачає їх швидше, ніж іноземні БОПС більшого аеродинамічного досконалості, що призводить до погіршених показників кінцевого впливу.

– В сучасних БОПС для виготовлення елементів кінцевого впливу ПЧ використовуються матеріали високої густоти, такі як карбід вольфрама ( $\rho_{WC} = 18500 \frac{кг}{м^3}$ ) і обеднений уран ( $\rho_U = 19500 \frac{кг}{м^3}$ ), що, очікується збільшує  $m_{сн}$  при інших рівних геометричних характеристиках.

Також необхідно відзначити, що діаграма (рис. 3) не виробляє тенденції до зменшення  $M_{CT}$  через те, що вип. БМ-9, БМ-12, БМ-15, БМ-22 і пр. представляють перше покоління БОПС, тоді як в сучасних західних зразках (лінійки М829 і DM) проявляється очевидне прагнення до зростання початкової швидкості [6, 7].

### **Висновки**

1. Проведене дослідження вказує на можливу багатовекторність модернізації ТПК. Очевидно, вдосконалення характеристик частин комплексу «пушка-боєприпас» повинно відбуватися паралельно.

2. Показано, що аеродинамічні та пробивні параметри польотної частини БОПС стоять нарівні за пріоритетністю з енергетичними показниками танкової пушки як пускового пристрою для вистрелу кінетичними снарядами.

3. Розглянуті та проаналізовані характеристики БОПС для ТПК вітчизняного та зарубіжного виробництва за критеріями броньового пробиття та енергетичного досконалості.

### **Література**

1. Амброжевич А.В. Метод оцінки енергетичного досконалості імпульсних теплових машин з газообразним робочим тілом / І.Ю. Долженко, А.В. Коломійцев і др. // Авіаційно-космічна техніка і технологія. – №3 (45). – 2008. – С. 5–10.

2. Бусяк Ю.М. Шляхи підвищення могутності броньових оперених підкаліберних снарядів / Л.К. Магерамов, Ю.К. Чернов і др. // Артилерійське і стрілецьке озброєння. – №1 (10). – 2004. – С. 18–21.

3. Сведения о БОПС. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [www.teledyne.com](http://www.teledyne.com).

4. Борисюк М.Д. Метод формування аерогазодинамічного вигляду перспективного броньового опереного підкаліберного снаряда / І.Ю. Долженко, Ю.К. Чернов і др. // Артилерійське і стрілецьке озброєння. – 2010. – № 3/36. – С. 3–8.

5. Мельник С.А. Деякі методи підвищення живучості стволів танкових пушек / Ю.К. Чернов, Ю.Е. Комар і др. // Артилерійське і стрілецьке озброєння. – 2007. – №3/24. – С. 55–57.

6. Сведения о БОПС. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.darpa.mil](http://www.darpa.mil).
7. Сведения о БОПС. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.bvtv.narod.ru](http://www.bvtv.narod.ru).
8. Кирпичев М.В. Теория подобия. – М.: Изд-во АН СССР, 1953. – 96 с.

Bibliography (transliterated)

1. Ambrozhevich A.V. Metod otsenki energeticheskogo sovershenstva impulsnykh teplovykh mashin s gazoobraznyim rabochim telom I.Yu. Dolzhenko, A.V. Kolomyitsev i dr. Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya. – #3 (45). – 2008. – P. 5–10.
2. Busyak Yu.M. Puti povysheniya moguschestva broneboynykh operennykh podkalibernykh snaryadov L.K. Mageramov, Yu.K. Chernov i dr. Artilleriyskoe i strelkovoe vooruzhenie. #1 (10). – 2004. – P. 18–21.
3. Svedeniya o BOPS. [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: [www.teledyne.com](http://www.teledyne.com).
4. Borisyuk M.D. Metod formirovaniya aerogazodinamicheskogo oblika perspektivnogo broneboynogo operennogo podkalibernogo snaryada I.Yu. Dolzhenko, Yu.K. Chernov i dr. Artilleriyskoe i strelkovoe vooruzhenie. – 2010. – № 3/36. – P. 3–8.
5. Melnik S.A. Nekotorye metody povysheniya zhivuchesti stvolov tankovykh pushek Yu.K. Chernov, Yu.E. Komar i dr. Artilleriyskoe i strelkovoe vooruzhenie. – 2007. #3/24. – P. 55–57.
6. Svedeniya o BOPS. [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: [www.darpa.mil](http://www.darpa.mil).
7. Svedeniya o BOPS. [Elektronnyy resurs]. – Rezhim dostupa: [www.bvtv.narod.ru](http://www.bvtv.narod.ru).
8. Kirpichev M.V. Teoriya podobiya. – M.: Izd-vo AN SSSR, 1953. – 96 p.

УДК 623.4

Оксенич М.В., Долженко І.Ю., Комар Ю.Є., Мельник С.О., Беліченко О.В.

**АНАЛІЗ ПРИНЦИПІВ ФОРМУВАННЯ ВИГЛЯДУ КОМПЛЕКСІВ  
ОСНОВНОГО ОЗБРОЄННЯ ТАНКІВ**

Проведений критеріальний аналіз характеристик бронебійних оперених підкаліберних снарядів (БОПС) на базі апарату теорії розмірності та подібності дозволив визначити основні напрямки модернізації танкових гарматних комплексів, а також синтезувати накопичений досвід у сфері проектування таких об'єктів.

Oksenich N.V., Dolzhenko I.Y., Komar Y.E., Melnik S.A., Belichenko A.V.

**ANALYSIS OF PRINCIPLES OF MAIN TANK ARMAMENT APPEARANCE  
FORMING**

Lead criterion analysis of characteristics APFSDS cartridges on the basis of the device of the theory of dimension and similarity has allowed to determine the basic directions of modernization of tank gun complexes and also to synthesize the saved up experience in sphere of designing of such objects.

Кіщенко В.А.

## **ВИЗНАЧЕННЯ ВОСКУ І ВОСКОПОДІБНИХ СПОЛУК МЕТОДОМ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ХРОМАТОГРАФІЇ**

### **Вступ**

Присутність воскоподібних сполук в рослинних оліях обумовлює ступінь їхньої прозорості. Через близьку з ацилгліцеридами густину воску довгий час знаходяться у стані суспензії, що надає олії каламутності та погіршує органолептичні показники готової продукції. Воскоподібним сполукам в олії притаманна певна стійкість, що створює труднощі під час їх видалення. Стандартизовані методи визначення неомілювальних речовин, до яких належать і воски, які діють на цей час в Україні та інших країнах, відрізняються між собою застосованими розчинниками, умовами промивання екстракту та ін.

Різні сполуки, що містяться в жирах поряд з триацилгліцеридами жирних кислот, можна розподілити на дві групи. Одні з них називають домішками, а інші сполуками, що супутні триацилгліцеридам жирів. Речовини цієї групи завжди містяться в нерафінованих оліях і жирах, тому що є складовими частинами клітин відповідних жирових тканин. При виділенні з тканин жир ацилгліцериди захоплюють багато компонентів клітин. Супутніх сполук дуже багато. Однак вміст їх у жирах невеликий: в рослинних оліях і жирах близько 3–4 %, а в жирах наземних тварин в декілька разів менше. Одними з супутніх речовин є воски і воскоподібні сполуки.

**Мета роботи** дослідження воску і воскоподібних сполук в соняшниковій олії методом високотемпературної газорідної хроматографії. Розробити метод контролю щодо визначення вмісту восків у рослинних оліях.

### **Виклад основного матеріалу**

Восками називають ліпіди, основою яких є складні ефіри вищих спиртів та вищих жирних кислот. Натуральні воски являють собою суміш складних ефірів вищих спиртів та жирних кислот. Одночасно вони можуть містити у вільному стані спирти та кислоти.

Значна частина восків це тверді, пружнопластичні, іноді за кімнатної температури навіть крихкі речовини. Дуже небагато восків мають за кімнатної температури рідку консистенцію.

В рослинах воски зустрічаються особливо часто. Вони покривають у вигляді тонкого нальоту або плівки стовбури, листя та плоди рослин. На листях деяких пальм шар воску досягає товщини 3–5 мм та може бути джерелом промислового видобування.

Воски нерозчинні у воді та не змочуються нею, а достатньо товсті шари їх паронепроникні. Цими фізичними властивостями обумовлена локалізація восків на поверхні окремих частин рослин, де вони захищають їх від втрати вологи та механічних пошкоджень.

Тверді воски, за деякими виключеннями, важко розчинні в багатьох розчинниках. Розчинення їх відбувається тільки при нагріванні. Рідкі воски, що входять до складу жирів деяких морських тварин, наприклад спермацетове масло, легко розчиняються у звичайних розчинниках жирів [1,2].

З рослинних восків відомі: карнаубський віск, що добувається з листя бразильської пальми *Copernicia cerifera*, канделільський та ін.

Карнаубський віск – це тверда, ламка маса, що розтирається в порошок. Колір від сірувато-жовтого до зеленувато-жовтого, іноді темно-коричневий.

Карнаубський віск складається з ефірів головним чином насичених вищих жирних кислот, що містять в молекулі 24 та більше атомів вуглецю (карнаубова, церотинова кислоти), зі спиртами цериловим та мелісиловим.

Жирних кислот у воску близько 48% мас., неомилюємих – до 55 %мас.

В соняшниковій олії воски є завдяки тому, що переходять з насінневої оболонки в процесі видалення олії. Кажучи про вміст восків в різних соняшникових оліях одні автори для суміші форпресової та екстракційної олії називають 0,14 %, інші – 0,02 %; для пресової олії наводиться цифра 0,03 %, для форпресової 0,05–0,10 % та для екстракційної – 0,10–0,15 %.

Дані про жирнокислотний склад восків та про можливий вміст їх в плодовій оболонці також не однакові. За Кауфманом, до складу восків соняшникової олії входять арахінова (43,9 %), бегенова (26,6 %), лігноцеринова (10,3 %), церотинова (8,2 %) та октокозанова (11,0 %) кислоти. За даними Гійоме та Друе, воски соняшникових олій містять міристинову (3,3 %), пальмітинову (7,1 %), олеїнову (3,1 %), стеаринову (5,1 %), лінолеву (18,1 %), арахісову (33,6 %), бегенову (15,0 %), лігноцеринову (5,8 %), церотинову (2,6 %), нонадецилову (1,8 %), медуллінову (0,5 %) та ізомедуллінову (0,7 %) кислоти. Хагоні та Переді виявили у восках пальмітинову та олеїнову (41 %), стеаринову (8,7 %), лінолеву (24,6 %), арахісову (4,5 %), бегенову (4,7 %) та церотинову (16,5 %) кислоти.

У ВНДІЖ було досліджено вміст восків в ліпідах ядра, лузги та плівки високоолійного насіння соняшника. Вміст воскоподібних речовин складав для лузги 0,42–0,46 %, плівки – 1,0 % та ядра – близько 0,002 %. Таким чином, прийнявши загальний вміст воскоподібних речовин за 100 %, джерела накопичення восків в олії можна характеризувати приблизними цифрами: лузга близько 83 %, плівка близько 16 %, ядро близько 1 % [3,4,5].

В таблиці 1 наведені результати порівняльних визначень жирнокислотного складу восків.

Таблиця 1 – Жирнокислотний склад восків

Кислоти	Вміст кислот в їх суміші, % мас.		
	Ліпіди ядра	Ліпіди плівки	Ліпіди лузги
Пальмітинова	7,5	15,1	20,3
Стеаринова	4,6	7,2	13,5
Олеїнова	25,5	36,4	24,5
Лінолева	61,8	40,1	12,1
Арахінова	сліди	сліди	17,5
Бегенова	0,6	1,1	7,4
Лігноцеринова	сліди	сліди	4,7

Ліпіди плівки містять майже в 2 рази більше пальмітинової та стеаринової кислот і в 1,4 рази олеїнової кислоти в порівнянні з ліпідами ядра, але в 1,4 раза менше лінолевої кислоти. В ліпідах лузги міститься значно більше пальмітинової та стеаринової кислот в порівнянні з ліпідами плівки і значно менше олеїнової та лінолевої кислот.

Очевидно, ліпіди насінневої оболонки за жирнокислотним складом займають проміжне місце між ліпідами ядра та плодової оболонки.

До тваринних восків належать бджолиний, що виділяється восковими залозами бджіл, вовняний, що накопичується у великій кількості у вовні овець, спермацетове масло та спермацет, що видобуваються з жиру, який знаходиться в черепній коробці та туші кашалота. Бджолиний віск отримують витоплюванням або екстракцією з бджолиних сот після видалення з них меду. Колір сирого бджолиного воску від світло-жовтого до коричнево-червоного, запах присмний медовий. При кімнатній температурі віск твердий, в'язкий, при охолодженні стає ламким, при нагріванні – пластичним.

Бджолиний віск у воді не розчиняється. На холоді дуже мало розчинний в етанолі. При кип'ятінні в етанолі розчиняються головним чином вільні жирні кислоти та забарвлюючі речовини, що містяться у воску. Віск повністю розчиняється при нагріванні в аліловому спирті, ацетоні, хлороформі, бензолі, бензині, в жирах. Важко гідролізується спиртовим розчином гідроксиду калію. Кислотне число воску знаходиться в межах 16–24 мг КОН/г. Вміст у воску спиртів близько 38–40 % мас. До їх складу належать спирти: неоцероловий, цериловий, монтаніловий, мірициловий та переважно мелісиловий. До складу жирних кислот бджолиного воску входять пальмітинова, церотинова, монтанова, мелісинова та неоцеротилова кислоти.

Якісні показники соняшникового воску у порівнянні з показниками бджолиного та карнаубського восків наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Показники якості восків

Показники	Віск		
	соняшниковий	карнаубський	бджолиний
Кислотне число, мг КОН/г	1,72–1,98	1,0–8,0	20,0–23,0
Число омилення, мг КОН/г	98,1	78,0–86,0	96,0–107,0
Ефірне число, мг КОН/г	96,11	–	–
Йодне число, % J <sub>2</sub>	0,76–1,04	9,0–13,0	7,0–10,0
Неомилені речовини, %	63,0–65,0	53,0–55,0	50,0–52,0
Температура плавлення, °С	77,0–79,0	82,0–84,0	63,0–64,0
Густина при 15 °С, г/см <sup>3</sup>	0,9355	0,9900	0,9600

На основі даних цієї таблиці можна зробити висновок, що віск з соняшnikової олії містить найменшу кількість вільних жирних кислот, має низьке йодне число та високе ефірне число, що свідчить про достатню ступінь його чистоти. За температурою плавлення він наближається до карнаубського воску.

Воск і воскоподібні сполуки вилучали з соняшникової олії за допомогою колонкової хроматографії з використанням набивних колонок із силікагелем. Визначали воскоподібні сполуки методом капілярної газової хроматографії з внутрішнім стандартом (гексатриоктаном), який завчасно додавали до рослинної олії.

Склад підготовлених проб досліджували методом високотемпературної газорідної хроматографії (ГРХ). Для обробки експериментальних даних застосовано програмні пакети Galaxie, Agilent Technologies Chemstation, Microsoft Office Excel.

Хроматографічне визначення восків проведено на газовому хроматографі СР 3800 виробництва фірми Varian.

Детектор полум'яно-іонізаційний (ПІД): температура – 420 °С; потік водню – 30 мл/хв; потік повітря – 350 мл/хв; допоміжний потік – 20 мл/хв; допоміжний газ-носій – азот. Об'єм введеної проби – 1,5–3,0 мкл.

Капілярна колонка VF-5HT з нерухомою неполярною фазою – (5 %-феніл)-диметилполісилоксаном: довжина 15 м, діаметр 0,32 мм, товщина плівки 0,1 мкм, високотемпературна (максимальна температура – 400 °С).

Температурний режим термостата колонки

швидкість (°С /хв.)	температура, °С	час, хв.
початкова	170	1,0
б	380	20

Інжекційна система з діленням потоку (*split*): температура – 410 °С; коефіцієнт ділення потоку (*split ratio*) – 1:100.

Воскоподібні речовини виділяли за допомогою колонкової хроматографії із застосуванням набивних колонок із силікагелем. Визначали воскоподібні речовини за допомогою капілярної газової хроматографії з внутрішнім стандартом, який перед тим додавали до олії. В якості внутрішнього стандарту використано гексатриоктан (парафін C<sub>36</sub>). При приготуванні зразка до дослідження пробу олії нагрівали до 130 °С, розмішували її, щоб повністю розчинилися кристали воску. Зважують наважку олії від 4,0 г до 4,5 г олії, додають 3 см<sup>3</sup> внутрішнього стандарту і розбавляють отриману суміш 10 см<sup>3</sup> розчинником н-гексану з хлороформом у співвідношенні 90:10. Розмішують до отримання однорідного розчину. Наносять 2 см<sup>3</sup> цього розчину в колонку.

Для промивання колонки використано 160 см<sup>3</sup> розчинника н-гексану у хлороформі у співвідношенні 7:3. Перші 10–15 хв промивають колонку повільно (1 крапля за секунду), потім можна швидше. Процес фільтрування крізь колонку триває 1,5 год. Фільтрат збирають у велику ротаційну колбу місткістю 250 см<sup>3</sup>. Перед використанням колбу обполіскують невеликими порціями хлороформу.

Відганяють суміш гексану з хлороформом на ротаційному випарнику за температури 60 °С та вакуумі до сухого залишку. З великої ротаційної колби вміст кількісно переносять хлороформом у маленьку колбу для відгонки, заздалегідь промиту хлороформом. Отриманий розчин знову відганяють (до залишку від 0,1 см<sup>3</sup> до 2 см<sup>3</sup>) і перерозчиняють у 1 см<sup>3</sup> хлороформу.

Аналіз воскоподібних речовин проводили на газовому хроматографі.

HP 6890 фірми *HEWLETT PACKARD*, для хроматографічного розділення використовується високотемпературна капілярна колонка VF-5HT, довжиною 15 м, з внутрішнім діаметром 0,32 мм і товщиною плівки фази 0.1 мкм. Хроматограми наведено на рис. 1–4.

Виявлено (рис. 2–4), що повністю вилучити воски з олії технологічно неможливо. Експериментально підтверджено, що кількість восків в рослинних оліях коливається в межах від 10 до 30 мг/кг (рис. 3–4). Такий вміст восків у соняшниковій олії не впливає на її якість (прозорість, каламутність).

### Висновок

Ефективним методом визначення восків і воскоподібних сполук є метод ГРХ з високотемпературною колонкою.

Розроблено методику якісного і кількісного визначення восків в оліях методом ГРХ. Встановлено технологічні умови ГРХ для визначення восків, а саме: градієнтне програмування температури, температура інжектора та детектора. Методика включена до державного стандарту України «Олії. Методи визначення воскоподібних речовин».

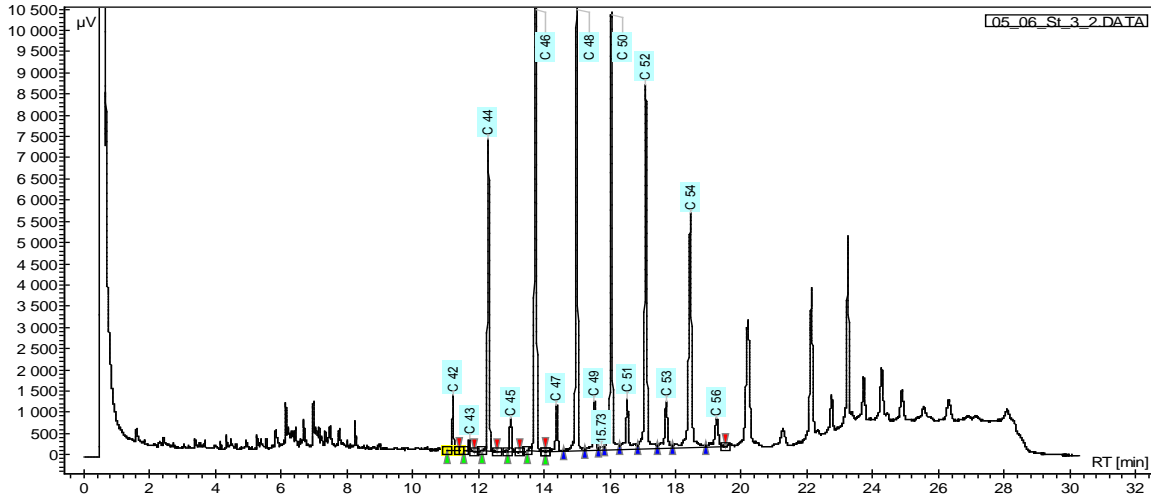


Рисунок 1 – Хроматограма стандарту воску соняшникового

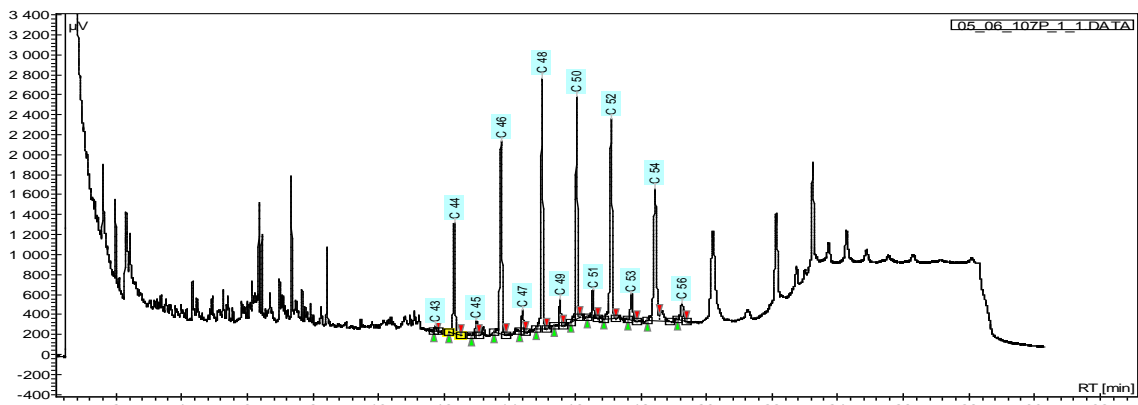


Рисунок 2 – Хроматограма воску з олії соняшкової (без видалення восків)

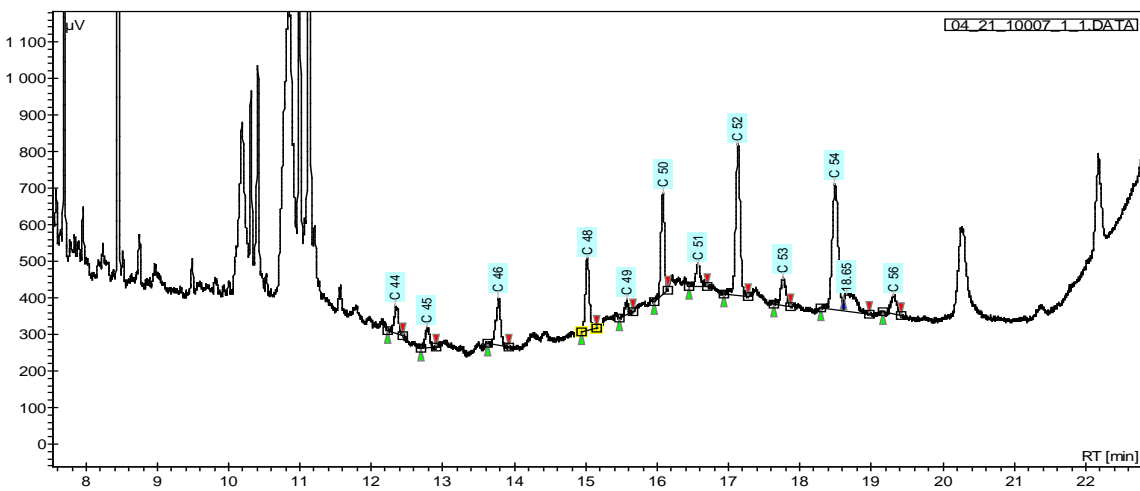


Рисунок 3 – Хроматограма восків з олії соняшкової з низьким вмістом восків

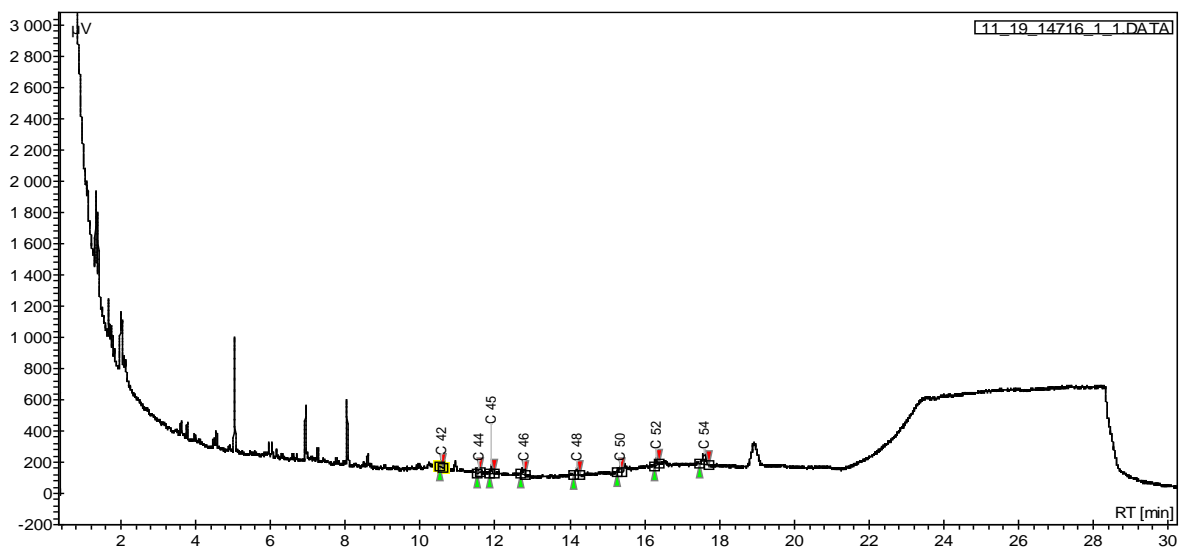


Рисунок 4 – Хроматограма восків з олії соняшникової з дуже низьким вмістом восків

### Література

1. Осейко М. І. Технологія рослинних олій : [підручник] / Осейко М. І. – К. : Варта, 2006. – 280 с.
2. Олії та жири: склад, методи одержання, якість / М. Осейко, А. Українець, С. Усатюк [та ін.] // Харчова і переробна промисловість. – 2004. – №5. – С. 17–19.
3. Технология переработки жиров / [Н.С. Арутюнян, Е.П. Корнена, Л.И. Янова [и др.]; под ред. Н.С. Арутюняна. – [3-е изд.] – М.: Пищепромиздат, 1999. – 452 с.
4. Лисицин А.Н. Масложировые технологии: теория, практика, перспективы / А.Н. Лисицин, В.Н. Григорьева // Масложировая промышленность. – 2002. – №3. – С. 8–11.
5. О'Брайен Р. Жиры и масла. Производство, состав и свойства, применение / Р. О'Брайен; пер. с англ. 2-го изд. В.Д. Широкова, Д.А. Бабейкиной, Н.С. Селивановой, Н.В. Магды. – С.Пб.: Профессия. – 2007. – 751 с.

### Bibliography (transliterated)

1. Oseyko M.I. Tehnologiya roslinnych oliy : [pIdruchnik] Oseyko M.I. – K. : Varta, 2006. – 280 p.
2. Oliyi ta zhiri: sklad, metodi oderzhannya, yakist M. Oseyko, A. UkraYinets, S. Usatyuk [ta in.] /Harchova i pererobna promislovist. – 2004. – #5. – P. 17–19.
3. Tehnologiya pererabotki zhirov [N.S. Arutyunyan, E.P. Kornena, L.I. Yanova [i dr.]; pod red. N.S. Arutyunyana. – [3-e izd.] – M.: Pischepromizdat, 1999. – 452 p.
4. Lisitsin A.N. Maslozhirovyie tehnologii: teoriya, praktika, perspektivy /A.N. Lisitsin, V.N. Grigoreva Maslozhirovaya promyishlennost. – 2002. – #3. – P. 8–11.



5. O'Brayen R. Zhiryi i masla. Proizvodstvo, sostav i svoystva, primenenie / R. O'Brayen; per. s angl. 2-go izd. V.D. Shirokova, D.A. Babeykinoy, N.S. Selivanovoy, N.V. Magdyi. – S.Pb.: Professiya. – 2007. – 751 p.

УДК 664:665.1/7:539:542/543

Кіщенко В.А.

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВОСКОВ И ВОСКОПОДОБНЫХ ВЕЩЕСТВ  
МЕТОДОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ХРОМАТОГРАФИИ**

В статье изложены результаты исследований содержания восков и воскоподобных веществ в подсолнечном масле методом газожидкостной хроматографии с использованием высокотемпературной колонки. Изложено методику выделения восков с методом колоночной хроматографии с использованием набивных колонок с силикагелем.

Kishchenko V.A.

**DETERMINFTION OF WAXES AND WAX-LIKE COMPOUNDS  
BY MEAN HIGH-TEMPERATURE CHROMATOGRAPHY**

In the article the results of studies of wax and wax-like compounds content in sunflower seed oil be mean gas-liquid chromatography with using high-temperature column are presented. The method of extraction of waxes with using of column's chromatography on the silicagel stuffed columns.

УДК 664:665.1/7:539:542/543

Левчук І.В.

**ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛІХЛОРОВАНИХ БІФЕНІЛІВ (ПХБ) В ОЛІЯХ ТА ЖИРАХ****Вступ**

Україна є експортером рослинних олій, олійних культур та олієжировмістивних продуктів, які використовуються у виробництві дієтичних, лікувально-профілактичних продуктів і добавок, в технологіях парфумерно-косметичної та олієжирової продукції. В останні 30 років приділяється підвищена увага аналізу групи стійких органічних забруднювачів (СОЗ). Багато хто які з них були відомі вже давно і широко використовувалися в промисловості і сільському господарстві більшості країн. Ці сполуки відносяться до класу хлорорганічних сполук і мають низку специфічних ознак:

- біокумуляція – за рахунок того, що розчинність у воді низька і висока в оліях і жирах;
- глобальна поширеність за рахунок здатності переноситися на великі відстані;
- надзвичайна стійкість до фізичних, хімічних і біологічних змін;
- здатність надавати токсичну дію на організми у вкрай малих дозах.

Тому все більше уваги приділяється контролю, зокрема, рослинних олій, олієжирових і олієжировмістивних продуктів, на вміст органічних екотоксикантів – пестицидів, поліхлорованих біфенілів (ПХБ).

Так як хлорорганічні пестициди, поліхлоровані біфеніли ПХБ відносяться до класу хлорорганічних сполук та мають ряд специфічних властивостей, а саме біокумуляція за рахунок того, що ПХБ мають високої розчинності в жирах так само як хлорорганічні пестициди. Тому підвищується ризик надходження токсичних речовин у продукти харчування та продовольчу сировину, ускладнюється оперативне управління екологічною ситуацією в цілому.

**Мета роботи** удосконалити методику визначення поліхлорованих біфенілів методом скринінгу; здійснення конгенер-специфічного визначення ПХБ; та оптимізації умов твердофазної екстракції для очистки проб на колонці з сорбентом для подальшого сумісного визначення пестицидів та ПХБ в оліях та жирах.

**Виклад основного матеріалу**

Глобальне забруднення навколишнього середовища та несприятлива екологічна ситуація в промислових районах обумовлюють необхідність постійного еколого-аналітичного контролю (ЕАК) забруднення повітря, якості води та накопичення небезпечних сполук у ґрунті та донних осадах. У відповідності з різними міжнародними угодами близько 60 хімічних речовин (пріоритетні забруднювачі) увійшли до списків, що передбачають обмеження їх розповсюдження. З них 12 органічних сполук, потрапили під дію Стокгольмської конвенції про стійкі органічні забруднювачі (СОЗ) – це дев'ять хлорорганічних пестицидів (ХОП): алдрин, ендрін, діелдрин, мірекс, ДДТ, гексахлорбензол, гептахлор, токсафен, хлордан; промислові продукти: поліхлоровані біфеніли (ПХБ); а також продукти ненавмисного виробництва: поліхлоровані дібензо-п – діоксини (ПХДД) і поліхлоровані дібензофурані (ПХДФ), звані діоксинами.

В даний час UNEP (United Nations Environmental Project) особливо виділяє групу з 12 сполук, на які слід звертати першочергову увагу при екологічних дослідженнях. Ця так звана «брудна дюжина» включає в себе наступні речовини: поліхлоровані біфеніли (ПХБ), поліхлоровані дібензо-*p*-діоксин (ПХДД), поліхлоровані дібензофурані (ПХДФ), алдрин, діелдрин, дихлор-дифеніл-трихлоретан (ДДТ), ендрин, хлордан, гексахлорбензол (ГХБ), мірекс, токсафен і гептахлор [1]. Цей список був складений в результаті великої кількості міжнародних консультацій та форумів. Головним підсумком цієї роботи стало прийняття і підписання 23 травня 2002 року в Стокгольмі Глобальної міжнародної конвенції про заборону СОЗ.

Стокгольмська Конвенція містить цілий ряд пропозицій і заходів щодо вивчення впливу на здоров'я людини, тварин, рослин, вивчення шляхів поширення цих речовин, а також заборона їх виробництва та використання. Частиною цієї програми є концепція еколого-аналітичного контролю, яка передбачає здійснення досліджень з виявлення й оцінки джерел забруднення, визначення рівнів забруднення природних і харчових об'єктів в результаті антропогенного впливу (прямого, непрямого або катастрофічного) на навколишнє середовище і людину.

Серед СОЗ ПХБ є одними з найпоширеніших. Вони масово вироблялися і використовувалися, починаючи з 1929 року. З тих пір і до припинення їх промислового випуску в 1986 році в світі було вироблено близько 2 мільйонів тонн ПХБ.

ПХБ відносяться до класу ароматичних сполук, що складаються з двох бензольних кілець, з'єднаних через між'ядерний зв'язок С-С і заміщених від одного до десяти атомами хлору в орто-, мета- або пара- положеннях (рис. 1). Існує 209 індивідуальних конгенерів ПХБ, що відрізняються числом і положенням атомів хлору в молекулі (I), що мають спільну формулу:  $C_{12}H_{10-n}Cl_n$ , де  $n=1-10$ .

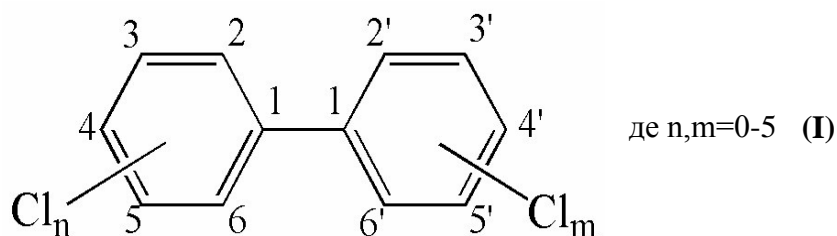
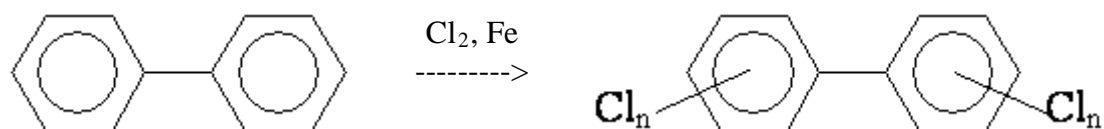


Рисунок 1 – Структура молекул поліхлорованих біфенілів

За своїми фізико-хімічними властивостями конгенерів ПХБ близькі до діоксинів. Розміри молекули (I) знаходяться в діапазоні 9–10,5 Å в довжину і близько 3 Å завширшки. ПХБ мають ряд унікальних фізичних і хімічних властивостей: винятковими теплофізичними і електроізоляційними характеристиками, термостійкістю, інертністю по відношенню до кислот і лугів, вогнестійкістю, розчинністю в жирах, маслах і органічних розчинниках, високою сумісністю зі смолами, відмінною адгезійною здатністю [2]. Це викликало їх найширше застосування в якості діелектриків в трансформаторах і конденсаторах, гідравлічних рідин, теплоносіїв та холодоагентів, мастильних олив, компонентів фарб, лаків і клейових композицій, пластифікаторів і наповнювачів у пластмасах і еластомерах, антипіренів, розчинників [1–3].

В основі промислового отримання ПХБ лежить заміщене хлорування біфенілу в присутності каталізатору електрофільного заміщення (зазвичай Fe) [3].



Ступінь хлорування залежить від тривалості реакції, яке становить від 12 до 36 год. Реакція електрофільного заміщення проходить неспецифічно, тому продукт містить суміш великого числа індивідуальних ПХБ – від 30 до 100 сполук. Більшість з них містять від 3 до 8 атомів хлору, хоча є і невеликі кількості як більш, так і менш хлорованих ПХБ. Ці суміші відомі під різними фірмовими назвами – Арохлор (США), Канехлор (Японія), Хлорфен (Німеччина), Делор (Словаччина), Фенохлор (Франція), Фенхлор (Італія) Совол і совтола (СРСР, Росія), склад яких регламентований (табл. 1).

Таблиця 1 – Приблизний склад технічних сумішей Арохлорів (у %)

Емпірична формула	Число атомів хлору	АРОХЛОР					
		1221	1232*	1242	1248	1254	1260
$C_{12}H_{10}$	0	10					
$C_{12}H_9Cl$	1	50	26	1			
$C_{12}H_8Cl_2$	2	35	29	13	1		
$C_{12}H_7Cl_3$	3	4	24	45	22	1	
$C_{12}H_6Cl_4$	4	1	15	31	49	15	
$C_{12}H_5Cl_5$	5			10	27	53	12
$C_{12}H_4Cl_6$	6				2	26	42
$C_{12}H_3Cl_7$	7					4	38
$C_{12}H_2Cl_8$	8						7
$C_{12}HCl_9$	9						1
Приблизна молекулярна маса		200,9	232,2	266,5	299,5	328,4	375,7

\*6 % не ідентифікованих сполук

Характер і динаміка розподілу ПХБ в навколишньому середовищі багато в чому визначаються їх фізичними властивостями, такими як хімічна інертність, досить висока щільність парів і здатність сорбуватися на частинках. Незважаючи на поступове скорочення застосування ПХБ у господарській діяльності, вони продовжують забруднювати навколишнє середовище, і в даний час ці токсичні продукти, що поширилися по всій Земній кулі, присутні в організмі кожного з нас [1,3,4]. Тому в організмах людини і тварин накопичуються найбільш небезпечні високохлоровані ПХБ [3].

За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я [5], основними шляхами надходження ПХБ в навколишнє середовище є наступні:

- випаровування з пластифікаторів;

- виділення при спалюванні побутових і промислових відходів, а також при загорянні трансформаторів, конденсаторів і іншого промислового устаткування, в якому використовуються ПХБ;
- витоку з іншими промисловими відходами; вивіз ПХБ на звалища і поля аерації;
- інші неконтрольовані шляхи.

Забруднення навколишнього середовища відбувається головним чином за першими трьома каналами.

Існують великі відмінності в токсичності, властивостях біокумуляції і біоперетворення для різних конгенерів ПХБ. Конгенерів, що не містять атоми хлору в орто-положеннях молекули (орто-незаміщені ПХБ), можуть брати планарну конфігурацію, яка енергетично найбільш вигідна [8] (рис. 2). Такі конгенери ізостереоізомерні ПХДД і ПХДФ. Молекули орто-незаміщених ПХБ є найбільш токсичними і надають дію, аналогічну дії ПХДД і ПХДФ.

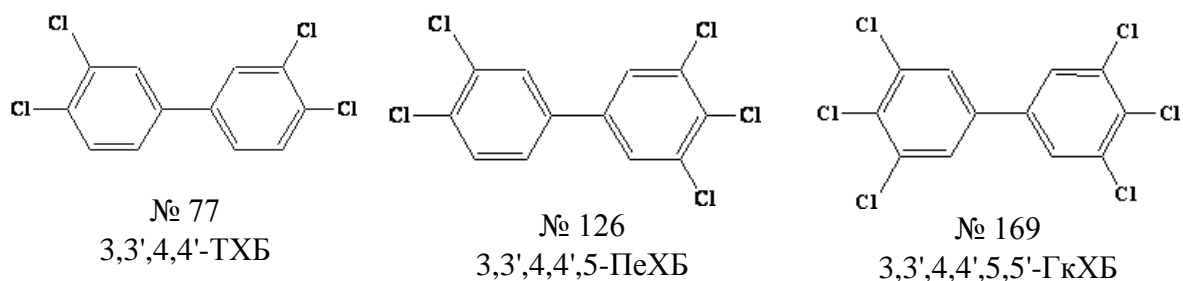


Рисунок 2 – Структура найбільш токсичних орто-незаміщених конгенерів поліхлорованих біфенілів

Конгенерів з одним атомом хлору в орто-положенні (моно-орто-заміщені ПХБ) демонструють відхилення від планарної конфігурації. Їх діоксиноподібна токсичність нижче, ніж у орто-незаміщених. Конгенерів з двома і більше атомами хлору в орто-положеннях молекули приймають глобулярну конфігурацію і володіють дуже низькою токсичністю діоксинового типу [9].

Для порівняння біологічної активності різних конгенерів ПХБ в 1987 році була запропонована концепція еквівалентів токсичності TEF – Toxic Equivalent Factor. Відповідно до цього підходу, токсичність або біологічна активність певного конгенерів виражається щодо активності 2,3,7,8 – ТХДД.

Механізм дії орто-незаміщених і моно- орто- заміщених ПХБ аналогічний механізму впливу 2,3,7,8-тетрахлордибензо-п-діоксину (2,3,7,8 – ТХДД).

Останні дослідження патогенезу впливу діоксиноподібних сполук на організм людини привели до створення концепції «діоксинової хвороби», найбільш повно описує спостережувані процеси і зміни [10].

Сучасні методи та підходи, які використовуються аналітиками при аналізі об'єктів навколишнього середовища на утримання ПХБ, дозволяють визначати всі конгенери, незважаючи на те, що жодна хроматографічна колонка не може в даний час розділити всі 209 компонентів ПХБ. Домінуючими методами є:

- 1) газо-рідинна хроматографія (ГРХ) з використанням селективного до хлорвмісних сполук електронно-захоплюючого детектора (ЕЗД) [3,11];

2) поєднання ГРХ-МС [12,13]; і для визначення планарних ПХБ (№ 77, 81, 126, 169) поєднання ГРХ з МС високою роздільною здатністю [14].

Названі методи дозволяють вирішувати будь-які проблеми, пов'язані з детектуванням ПХБ, незалежно від характеру природної матриці.

Вибір методу визначення залежить від кінцевої мети дослідження. Якщо необхідно знати сумарне або групове утримання ПХБ, то використовують досить нескладні методи. Якщо ж ставиться завдання ідентифікації, кількісного визначення конкретного зразка, тоді застосовуються більш складні і дорогі методи конгенерів – специфічного визначення найбільш токсичних представників ПХБ. Таким чином, перелік контролюваних забруднювачів в об'єктах навколишнього середовища постійно розширюється, що в свою чергу вимагає удосконалення методів і розробки методик виконання вимірювань (МВВ), дозволяють визначати з необхідною точністю і надійністю небезпечні для людини з'єднання. Очевидно, що створення ефективної системи екологічного моніторингу стає все більш складною і багатоплановою проблемою.

На сьогоднішній день визначення ПХБ в оліях і жирах є актуальною проблемою. Нами проводиться дослідження скринінгового і підтверджувального визначення ПХБ в оліях і жирах.

Кількісне визначення поліхлорованих біфенілів ПХБ здійснюється шляхом порівняння хроматографічного профілю досліджуваного зразка з профілем стандартних технічних сумішей. Таке дослідження здійснюється, як правило, методами газорідинної хроматографії з електронно-захоплюючим детектором (ГРХ/ЕЗД) і газорідинної хроматографії з мас-селективним детектором (ГРХ/МС), який дозволяє здійснювати ідентифікацію на основі структурної інформації по молекулярним мас-спектрам. На хроматографічній колонці ПХБ не розділяється на індивідуальні ізомери, вони елюються у вигляді кластерів, які рідко досягають базової лінії. Для градування використано різні суміші «Арохлор», щоб знайти, той, який більше всього підходить по загальному вигляду на пробу, що аналізується. Ідентифікація здійснюється виключно за часом утримання. При визначенні індивідуальних конгенерів необхідно конгенер-специфічне визначення ПХБ.

За своїми фізико-хімічними властивостями конгенери ПХБ близькі до діоксинів. Крім того, разом з ПХБ можуть елююватись і інші забруднювачі такі як поліхлортерфеніли, бутил-монохлордіфенілові ефіри, ізопропіл-хлорбіфеніли, хлорбензоли, хлороганічні пестициди, які не ідентифікуються, але включаються в загальну «суму ПХБ». Тому на теперішній день нами проводиться оптимізація умов екстракції та фракціонування екстракту, очистки проб на колонці з силікагелем.

Олії та ліпидовмісні продукти широко використовуються у технологіях дієтичних, лікувально-профілактичних, парфумерно-косметичних та олієжировмісних харчових продуктів. Тому все більше уваги приділяється контролю, зокрема, олій, олійної сировини і ліпидовмісних продуктів, на вміст органічних екотоксикантів: пестицидів, поліциклічних ароматичних вуглеводнів (ПАВ), поліхлорованих біфенілів (ПХБ).

Так як хлорорганічні пестициди, ПХБ відносяться до класу хлорорганічних сполук та мають ряд специфічних властивостей, а саме біокумуляції за рахунок того, що ПХБ мають високу розчинність в жирах так само як хлорорганічні пестициди. Метод ГРХ/МС дозволяє здійснювати ідентифікацію на основі структурної інформації по молекулярним мас-спектрам. При визначенні індивідуальних конгенерів необхідно конгенер-специфічне визначення ПХБ (табл. 2).

У результаті досліджень методом скринінгу в риб'ячому жирі виявлено №7 ДДД– представник групи хлорорганічних пестицидів, №9 ПХБ 138, №1,5,6,11,12 ПАВ, та № 2,3,4,8,10,13 фталати. Отримані дані компонентного складу риб'ячого жиру спонукають до подальшого проведення підтверджуючих та кількісних досліджень вище зазначених компонентів.

У даному випадку кількісне визначення ПХБ здійснюється порівнянням хроматографічного профілю аналізованого зразка з профілем стандартних технічних сумішей, а при визначенні конгенерів, стандартні розчини окремих конгенерів. Якщо зразок забруднений технічними ПХБ в присутності мінеральної олії то на хроматографічній колонці ПХБ не розділяються на індивідуальні ізомери, вони елюються у вигляді кластерів, рідко досягаючи базової лінії. У випадках, коли проба містить тільки одну технічну суміш, ця методика дає задовільні результати, але якщо проба забруднена двома або більше технічними сумішами в невідомому співвідношенні, то жодна з технічних сумішей " Арохлор " не може бути взята в якості стандарту, і результати виходять недостатньо точними. Крім того, разом з ПХБ елюються інші забруднювачі такі як поліхлортерфеніли, іноді бутил – монохлордіфенілові ефіри, ізопропіл-хлорбіфеніли, хлорбензоли, хлорорганічні пестициди, що не ідентифікуються, але включаються в загальну "суму ПХБ". Незважаючи на неточність метод простий і зручний.

Таблиця 2 – Компонентний склад риб'ячого жиру

№	Назва компоненту	Бібліотека AMDIS	Бібліотека NIST	Коефіцієнт співпадання даних бібліотек
		% ідентичності	% ідентичності	
1	Нафталін	96	93	1
2	Диметилфталат	93	92	1
3	Диетилфталат	89	79	1
4	Трибутилфосфат	93	82	1
5	Антрацен	91	88	1
6	Хризен	95	90	1
7	<b>ДДД</b>	<b>96</b>	<b>93</b>	<b>1</b>
8	Диізобутилфталат	60	85	2
9	<b>РСВ 138</b>	<b>80</b>	<b>88</b>	<b>1</b>
10	Ди-п-бутилфталат	73	88	3
11	Флуарантрен	75	68	1
12	Бенз(а)пірен	85	82	1
13	Біс(2-етилгексил) фталат	83	72	8

Для такого роду аналізу можна також використовувати мас- спектрометричний детектор (МС), який помітно збільшує селективність. Він має не менш високу чутливість, ніж ЕЗД (електорнозахоплюючий детектор), і дозволяє здійснювати ідентифікацію на підставі структурної інформації по молекулярним і осколковим іонам в мас-спектрі. Висока чутливість в ГЖХ – МС досягається при використанні селективного

детектування обраних іонів. Характерна картина ізотопного розподілу хлоромісних іонів дає додаткові можливості для ідентифікації.

### Висновок

Доведено, що концепція "суми ПХБ" має ряд недоліків як з точки зору їх визначення в технічних сумішах, так і з точки зору токсикології.

Доведено необхідність здійснення оптимізації умов твердофазної екстракції та фракціонування екстракту, очистки проб на колонці з комбінованим сорбентом для подальшого сумісного визначення пестицидів та ПХБ в оліях та жирах.

### Література

1. Юфит С.С. Яды вокруг нас. Цикл лекций. Москва: Джеймс, 2001.
2. Занавескин Л.Н., Аверьянов В.А. // Успехи химии, 1998, 67 (8), с. 788–800.
3. Клюев Н.А., Бродский Е.С. Определение полихлорированных бифенилов в окружающей среде и биоте. Полихлорированные бифенилы. Супертоксиканты XXI века. Инф. выпуск № 5 ВИНТИ, Москва, 2000, с. 31–63.
4. Boyle R.H., Hignland J.H. // Environment, 1979, 21(5), p. 6–8.
5. Гигиенические критерии состояния окружающей среды. Протокол №2. Полихлорированные бифенилы и трифенилы. Совместное издание Программы ООН по окружающей среде и Всемирной организации здравоохранения, Женева, 1980.
6. Прокофьев А.К. // Успехи химии, 1990, т. 59, в. 11, с. 1799–1818.
7. Питьева вода. Санитарные правила и нормы. 2.1.4.559-96, М., 1996, –110 с.
8. McKinney J.D., Gottschalk K.E., Pedersen L. 1983. // J. Mol. Struct., 105: 427–438.
9. Leonards P. PCBs in mustelids. Analysis, food chain transfer and critical levels. Vrije Universiteit. Academisch Proefschrift. Amsterdam, 1997. 210 p.
10. Епифанцев А.В., Румак В.С., Софронов Г.А. // Медицинский академический журнал, 2002, 2, N2, с. 69–82.
11. EPA Method 8082A. Polychlorinated biphenyls (PCBs) by gas chromatography. 1999. 59 p.
12. Heidman W.A. // Chromatographia, 1986, N 71, p. 363–372.
13. Бродский Е.С., Клюев Н.А., Тарасова О.Г., Жильников В.Г., Шестак Н.М. // Гидрологический журнал, 1992, т. 28, № 6, с. 104–107.
14. EPA Method 1668. Chlorinated biphenyls congeners in water, soil, sediment and tissue by HRGC/HRMS. 1999. 133 p.

### Bibliography (transliterated)

1. Yufit S.S. Yadyi vokrug nas. Tsikl lektsiy. Moskva: Dzheymys, 2001.
2. Zanaveskin L.N., Averyanov V.A. Uspehi himii, 1998, 67 (8), p. 788–800.
3. Klyuev N.A., Brodskiy E.S. Opredelenie polihlorirovannyih bifenilov v okruzhayuschey srede i biote. Polihlorirovannyye bifenilyi. Supertoksikanty XXI veka. Inf. vyipusk # 5 VINITI, Moskva, 2000, p. 31–63.
4. Boyle R.H., Hignland J.H. Environment, 1979, 21(5), p. 6–8.



5. Gigienicheskie kriterii sostoyaniya okruzhayushey sredy. Protokol #2. Polihlorirovannyye bifenily i trifenily. Sovmestnoe izdanie Programmy OON po okruzhayushey srede i Vsemirnoy organizatsii zdavooohraneniya, Zheneva, 1980.
6. Prokofv A.K. // Uspehi himii, 1990, t. 59, v. 11, p. 1799–1818.
7. Pitevaya voda. Sanitarnyye pravila i normy. 2.1.4.559-96, M., 1996, –110 p.
8. McKinney J.D., Gottschalk K.E., Pedersen L. 1983. J. Mol. Struct, 105: P. 427–438.
9. Leonards P. PCBs in mustelids. Analysis, food chain transfer and critical levels. Vrije Universiteit. Academisch Proefschrift. Amsterdam, 1997. 210 p.
10. Epifantsev A.V., Rumak V.S., Sofronov G.A. Meditsinskiy akademicheskyy zhurnal, 2002, 2, N2, p. 69–82.
11. EPA Method 8082A. Polychlorinated biphenyls (PCBs) by gas chromatography. 1999. 59 p.
12. Heidman W.A. Chromatographia, 1986, N 71, p. 363–372.
13. Brodskiy E.S., Klyuev N.A., Tarasova O.G., Zhilnikov V.G., Shestak N.M. Gidrologicheskyy zhurnal, 1992, t. 28, # 6, p. 104–107.
14. EPA Method 1668. Chlorinated biphenyls congeners in water, soil, sediment and tissue by HRGC/HRMS. 1999. 133 p.

УДК 664:665.1/7:539:542/543

Левчук И.В.

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛИХЛОРИРОВАННЫХ БИФЕНИЛОВ (ПХБ) В МАСЛАХ И ЖИРАХ**

Показана актуальность определения ПХБ в маслах и жирах. Показана актуальность определения ПХБ в маслах и жирах. Обоснована необходимость решения проблемы канцерогенной безопасности масложировых и жиросодержащих пищевых продуктах с надежным контролем стойких органических загрязнителей – полихлорированный бифенилов.

Levchuk I.V.

### **DETERMINATION OF POLYCHLORINATED BIPHENYLS IN THE OILS AND FATS**

The actuality of determination of polychlorinated biphenyls (PCBs) in oils and fats is pointed. The necessity of solving the problem of carcinogenic safety of oils fats and fat containing food products with reliable control of sustainable organic pollutants polychlorinated biphenyls argueded.

УДК 621-05 (477.54-25)

Киприч К.К., Ковалив В.И., Малахов В.А.

### АНАЛИЗ ДИНАМИКИ РЫНКА ЛЕГКОБРОНИРОВАННОЙ ТЕХНИКИ РАЗВИВАЮЩИХСЯ СТРАН

В современную эпоху легкобронированная техника имеет очень большее значение для вооруженных сил развивающихся государств, поскольку тяжелая бронетехника, становясь все более сложной и, как результат, все более дорогой, является недоступной для большинства развивающихся стран, и те при решении вопросов своей национальной обороны на суше делают упор именно на легкобронированную технику – боевые машины пехоты, бронетранспортеры, бронированные автомобили.

В последние десять-двенадцать лет ситуация на рынке легкобронированной техники развивающихся стран два раза кардинально менялась: если, по данным Исследовательской службы Конгресса США, в начале 2000-х годов наблюдалось снижение объема общемирового экспорта бронетранспортеров и бронированных автомобилей в развивающиеся страны, то в середине – резкое повышение, а в конце – опять снижение (рис. 1).

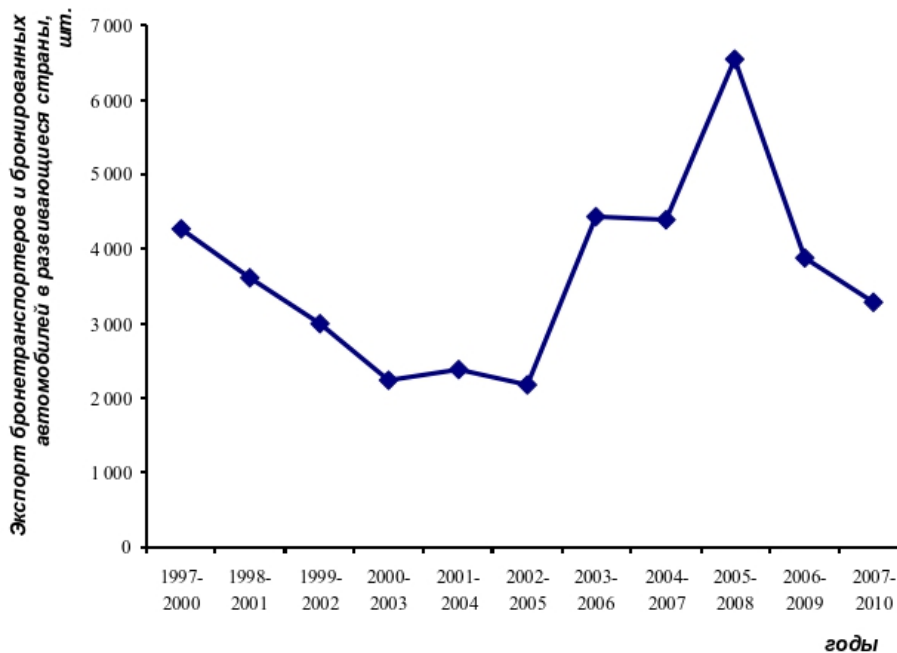


Рисунок 1 – Динамика общемирового экспорта бронетранспортеров и бронированных автомобилей в развивающиеся страны в 1997-2010 гг. (по докладом Исследовательской службы Конгресса США за 2003-й [2], 2004-й [3], 2005-й [4], 2006 й [5], 2007-й [6], 2008-й [7], 2009-й [8], 2010-й [9] и 2011-й [10] годы)

Примерно такая же картина складывается по данным Регистра обычных вооружений ООН [0], относящимся к импорту импорта бронетранспортеров и бронированных автомобилей (рис. 2), которые, однако, являются менее точными, поскольку они основаны на сведениях, предоставляемых правительствами различных государств, а такие сведения предоставляют в ООН не все правительства.

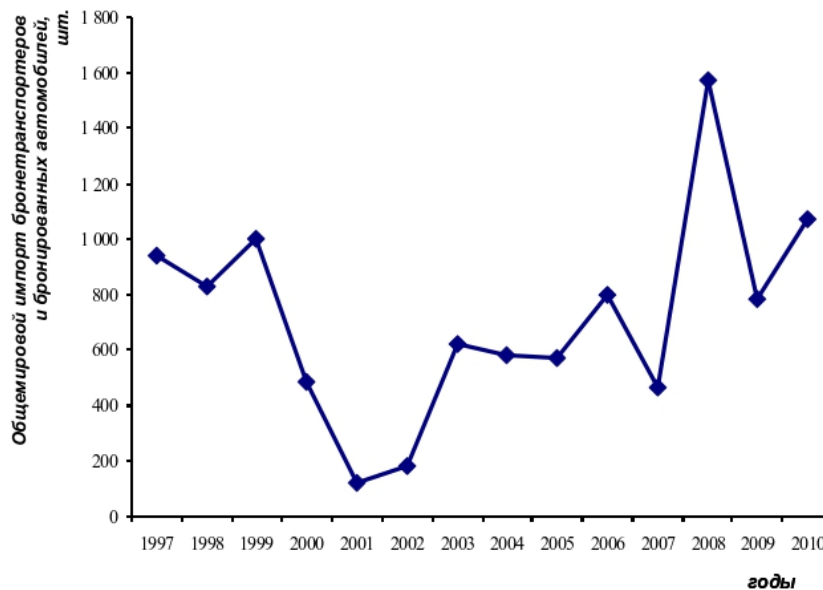


Рисунок 2 – Динаміка загальносвітового імпорту бронетранспортерів та бронюваних автомобілів в 1997–2010 гг. (по даним Регістра звичайних озброєнь ООН [1])

Если проанализировать объемы экспорта бронетранспортеров и бронированных автомобилей в развивающиеся страны различными государствами-экспортерами (рис. 3), то выяснится, что на данном рынке в настоящее время лидирует Китай, который на протяжении ряда последних лет уверенно наращивает объемы своего экспорта легкобронированной техники в развивающиеся страны. Россия, совершив большой рывок вверх на данном рынке в середине 2000-х годов, затем резко сдала свои позиции, но впоследствии снова стала увеличивать экспорт бронетранспортеров и бронированных автомобилей в эти страны. Определенных успехов на данном рынке в последние годы прошлого десятилетия добились четыре ведущие западноевропейские страны – Франция, Великобритания, Германия и Италия. Характерно, что такой крупнейший мировой экспортер оружия, как Соединенные Штаты Америки (США), в течение нескольких последних лет стабильно сдавали свои позиции. Также допустили снижение объемов в последние годы и европейские страны, не входящие в вышеупомянутую четверку.

Рынок развивающихся стран географически делится Исследовательской службой Конгресса США на Ближний Восток (в него входят Алжир, Бахрейн, Египет, Израиль, Иордания, Ирак, Иран, Йемен, Катар, Кувейт, Ливан, Ливия, Марокко, Объединенные Арабские Эмираты, Оман, Саудовская Аравия, Сирия, Тунис), Азию (азиатские страны за исключением тех, которые относятся к Ближнему Востоку), Африку (африканские страны за исключением тех, которые относятся к Ближнему Востоку) и Латинскую Америку.

В Азии на рынке легкой бронетехники развивающихся стран первое место в «единоличном зачете» занимает Россия. Также большую роль на этом рынке играют четыре ведущие западноевропейские страны – Франция, Великобритания, Германия и Италия – и Китай. Роль США на данном рынке незначительна (рис. 4).

На Ближнем Востоке наблюдается картина общего снижения объема поставок бронетранспортеров и бронированных автомобилей. Некоторых успехов на данном рынке в последние годы удалось добиться лишь четырем ведущим западноевропейским странам – Франции, Великобритании, Германии и Италии – и России, которая – после

крупного успеха в 2005–2008 года сначала резко снизила объемы своих поставок, на затем снова стала их наращивать.

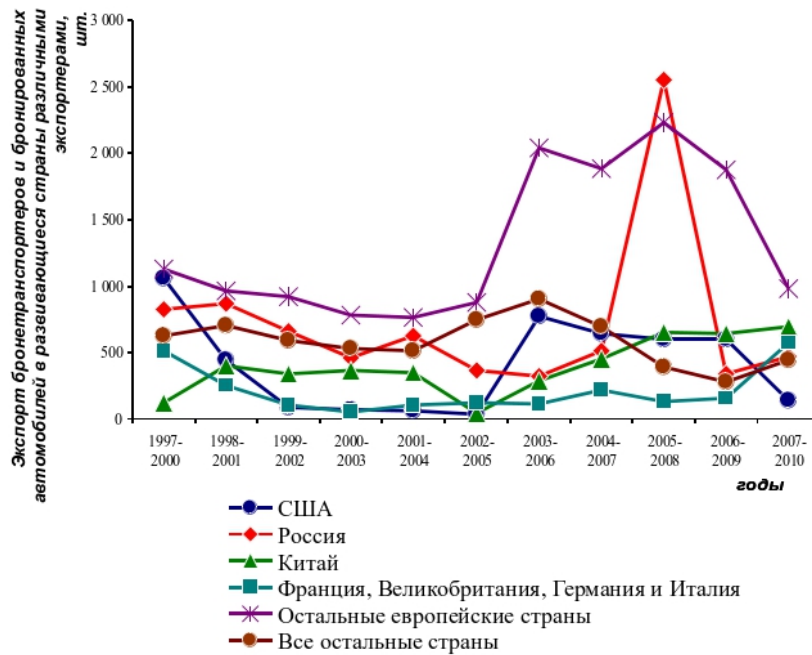


Рисунок 3 – Динамика экспорта бронетранспортеров и бронированных автомобилей в развивающиеся страны различными экспортерами в 1997–2010 гг. (по докладам Исследовательской службы Конгресса США за 2003-й [2], 2004-й [3], 2005-й [4], 2006-й [5], 2007-й [6], 2008-й [7], 2009-й [8], 2010-й [9] и 2011-й [10] годы)

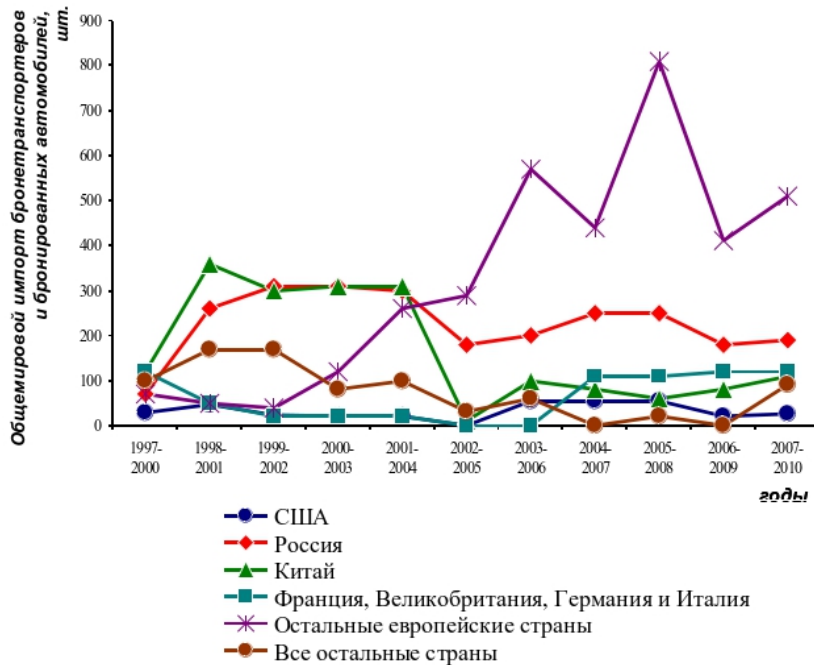


Рисунок 4 – Динамика экспорта бронетранспортеров и бронированных автомобилей в развивающиеся страны Азии различными экспортерами в 1997–2010 гг. (по докладам Исследовательской службы Конгресса США за 2003-й [2], 2004-й [3], 2005-й [4], 2006-й [5], 2007-й [6], 2008-й [7], 2009-й [8], 2010-й [9] и 2011-й [10] годы)

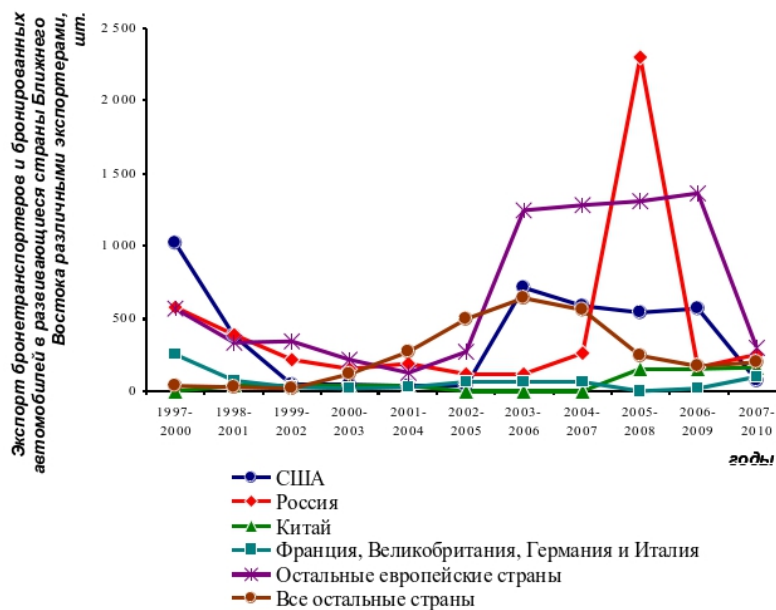


Рисунок 5 – Динамика экспорта бронетранспортеров и бронированных автомобилей в развивающиеся страны Ближнего Востока различными экспортерами в 1997–2010 гг. (по докладам Исследовательской службы Конгресса США за 2003-й [2], 2004-й [3], 2005-й [4], 2006-й [5], 2007-й [6], 2008-й [7], 2009-й [8], 2010-й [9] и 2011-й [10] годы)

На рынке легкой бронетехники развивающихся стран Латинской Америки после «затишья» в первой половине 2000-х годов резко увеличились поставки бронетранспортеров и бронированных автомобилей из стран вышеупомянутой европейской «четверки», других европейских стран, а также из Китая и США. Однако такой крупный мировой экспортер оружия, как Россия, в течение уже целого ряда лет не может завоевать себе сколько-нибудь значительные позиции на данном рынке (рис. 6).



Рисунок 6 – Динамика экспорта бронетранспортеров и бронированных автомобилей в развивающиеся страны Латинской Америки различными экспортерами в 1997–2010 гг. (по докладам Исследовательской службы Конгресса США за 2003-й [2], 2004-й [3], 2005-й [4], 2006-й [5], 2007-й [6], 2008-й [7], 2009-й [8], 2010-й [9] и 2011-й [10] годы)

На рынке легкойбронированной техники развивающихся стран в Африке уверенно доминирует Китай, который несколько снизил объемы своих поставок в последние годы, однако по-прежнему далеко опережает своих конкурентов. В последние годы резко увеличились объемы поставок из стран вышеупомянутой европейской «четверки» и некоторых других европейских стран. Россия на данном рынке в последние годы представлена слабо, а США не представлены вообще (рис. 7).

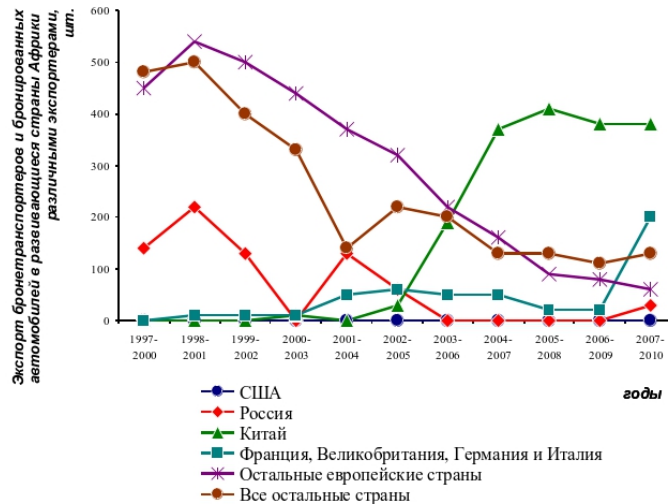


Рисунок 7 – Динаміка експорту бронетранспортерів та бронірованих автомобілів в розвиваючіся країни Африки різними експортерами в 1997–2010 гг. (по докладам Исследовательской службы Конгресса США за 2003-й [2], 2004-й [3], 2005-й [4], 2006-й [5], 2007-й [6], 2008-й [7], 2009-й [8], 2010-й [9] и 2011-й [10] годы)

Если проанализировать общие объемы экспорта бронетранспортеров и бронированных автомобилей в развивающиеся страны различных регионов, то выясняется, что в последние годы происходил небольшой рост поставок легкой бронетехники в Азию, Африку и Латинскую Америку, а объемы экспорта на Ближний Восток, до недавнего времени являвшегося самым емким рынком, резко сократились приблизительно до уровня других регионов. При этом следует отметить, что страны Латинской Америки, на протяжении ряда лет вообще не закупавшие легкой бронетехники, в конце прошлого десятилетия снова стали ее импортировать (рис. 8).

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

- в последние годы происходит снижение объемов общемирового экспорта бронетранспортеров и бронированных автомобилей в развивающиеся страны;
- ведущими экспортерами легкой бронетехники в развивающиеся страны являются Китай и Россия, а также страны ведущей западноевропейской «четверки» – Франция, Великобритания, Германия и Италия; при этом России не удалось добиться каких-либо успехов на рынке Латинской Америки, а Китай, будучи представленным на всех региональных рынках, значительно опережает всех своих конкурентов на рынке Африки;
- США, являясь одним из крупнейших экспортеров оружия в мире, на рынке легкой бронетехники развивающихся стран добились в последние годы экспортных успехов лишь в Латинской Америке;
- после того, как на Ближнем Востоке в последние годы резко снизились объемы импорта легкойбронированной техники, емкость всех четырех региональных рынков

легкой бронетехники развивающихся стран – то есть Азии, Ближнего Востока, Латинской Америки и Африки – стала сопоставимой.

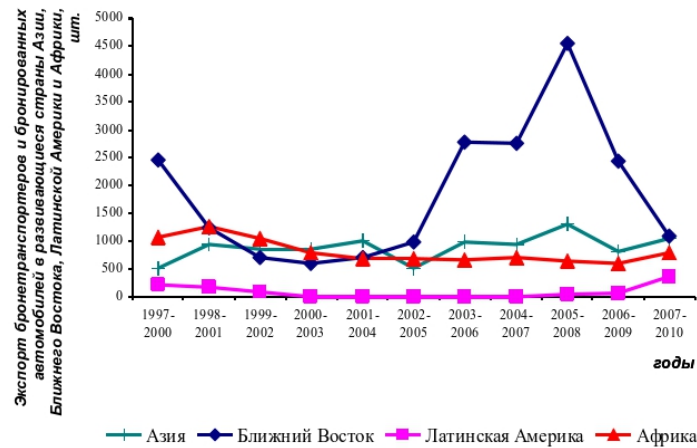


Рисунок 8 – Динамика экспорта бронетранспортеров и бронированных автомобилей в развивающиеся страны Азии, Ближнего Востока и Африки в 1997–2010 гг. (по докладам Исследовательской службы Конгресса США за 2003-й [2], 2004-й [3], 2005-й [4], 2006-й [5], 2007-й [6], 2008-й [7], 2009-й [8], 2010-й [9] и 2011-й [10] годы)

### Литература

1. Регистр обычных вооружений на официальном веб-сайте Организации Объединенных Наций. – [www.un-register.org](http://www.un-register.org).
2. Conventional Arms Transfers to Developing Nations, 1995–2002. CRS Report for Congress // Congressional Research Service. The Library of Congress. September 22, 2003. – 84 p.
3. Conventional Arms Transfers to Developing Nations, 1996–2003. CRS Report for Congress // Congressional Research Service. The Library of Congress. August 26, 2004. – 87 p.
4. Conventional Arms Transfers to Developing Nations, 1997–2004. CRS Report for Congress // Congressional Research Service. The Library of Congress. August 29, 2005. – 86 p.
5. Conventional Arms Transfers to Developing Nations, 1998–2005. CRS Report for Congress // Congressional Research Service. The Library of Congress. October 23, 2006. – 91 p.
6. Conventional Arms Transfers to Developing Nations, 1999–2006. CRS Report for Congress // Congressional Research Service. The Library of Congress. September 26, 2007. – 92 p.
7. Conventional Arms Transfers to Developing Nations, 2000–2007. CRS Report for Congress // Congressional Research Service. The Library of Congress. October 23, 2008. – 75 p.
8. Conventional Arms Transfers to Developing Nations, 2001–2008. CRS Report for Congress // Congressional Research Service. The Library of Congress. September 4, 2009. – 84 p.

9. Conventional Arms Transfers to Developing Nations, 2002–2009. CRS Report for Congress // Congressional Research Service. The Library of Congress. September 10, 2010. – 84 p.

10. Conventional Arms Transfers to Developing Nations, 2003–2010. CRS Report for Congress // Congressional Research Service. The Library of Congress. September 22, 2011. – 84 p.

Bibliography (transliterated)

1. Registr obychnyih vooruzheniy na ofitsialnom veb-sayte Organizatsii Ob'edinennyih Natsiy. – [www.un-register.org](http://www.un-register.org).

2. Conventional Arms Transfers to Developing Nations, 1995–2002. CRS Report for Congress Congressional Research Service. The Library of Congress. September 22, 2003.– 84 p.

3. Conventional Arms Transfers to Developing Nations, 1996–2003. CRS Report for Congress Congressional Research Service. The Library of Congress. August 26, 2004. – 87 p.

4. Conventional Arms Transfers to Developing Nations, 1997–2004. CRS Report for Congress Congressional Research Service. The Library of Congress. August 29, 2005. – 86 p.

5. Conventional Arms Transfers to Developing Nations, 1998–2005. CRS Report for Congress Congressional Research Service. The Library of Congress. October 23, 2006. – 91 p.

6. Conventional Arms Transfers to Developing Nations, 1999–2006. CRS Report for Congress Congressional Research Service. The Library of Congress. September 26, 2007.– 92 p.

7. Conventional Arms Transfers to Developing Nations, 2000–2007. CRS Report for Congress Congressional Research Service. The Library of Congress. October 23, 2008. – 75 p.

8. Conventional Arms Transfers to Developing Nations, 2001–2008. CRS Report for Congress Congressional Research Service. The Library of Congress. September 4, 2009.– 84 p.

9. Conventional Arms Transfers to Developing Nations, 2002–2009. CRS Report for Congress Congressional Research Service. The Library of Congress. September 10, 2010.– 84 p.

10. Conventional Arms Transfers to Developing Nations, 2003–2010. CRS Report for Congress Congressional Research Service. The Library of Congress. September 22, 2011.– 84 p.

УДК 621-05 (477.54-25)

Кіпріч К.К., Ковалів В.І., Малахов В.А.

**АНАЛІЗ ДИНАМІКИ РИНКА ЛЕГКОБРОНЬОВАНОЇ ТЕХНІКИ КРАЇН,  
ЩО РОЗВИВАЮТЬСЯ**

У статті проведено аналіз ситуації на ринку легкоброньованої техніки країн, що розвиваються, з'ясовано, хто є провідними експортерами на цьому ринку та на його регіональних частинах, визначені зміни у обсягах експорту легкоброньованої техніки на регіональних ринках країн, що розвиваються.

Kiprich K.K., Kovaliv V.I., Malakhov V.A.

**ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF THE LIGHT ARMoured VEHICLE  
MARKET OF DEVELOPING COUNTRIES**

The article provides an analysis of the situation in the light armoured vehicle market of developing countries, determines the leading exporters in this market and its regional parts, and determines the changes in the scope of export of light armoured vehicles to the regional markets of developing countries.



Киприч К.К., Ковалив В.И., Малахов В.А.

**АНАЛИЗ ТЕНДЕНЦИЙ ИЗМЕНЕНИЯ ОБОРОННЫХ РАСХОДОВ СТРАН АЗИАТСКО-ТИХООКЕАНСКОГО РЕГИОНА**

Расходы на оборону в Азиатско-Тихоокеанском регионе, как и в других странах, испытали на себе сильное давление мирового экономического кризиса. Как видно из сравнения официальной информации относительно оборонных бюджетов и экономических данных стран данного региона, основная масса стран уменьшила в 2012 году свои оборонные расходы по сравнению со средней величиной за предыдущее десятилетие. Причем такая страна, как Сингапур, снизила их значительно, почти в 3 раза.

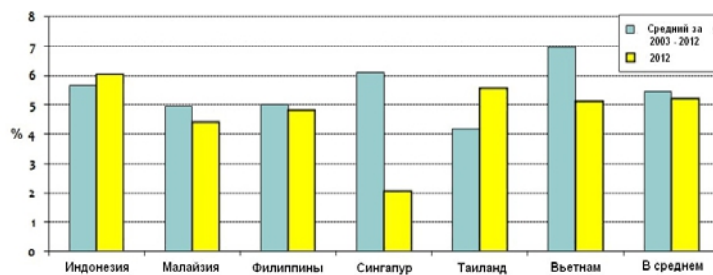


Рисунок 1 – Рост ВВП в 2012 году в сравнении со средним ростом ВВП за 10 лет (с 2003 по 2012 годы)

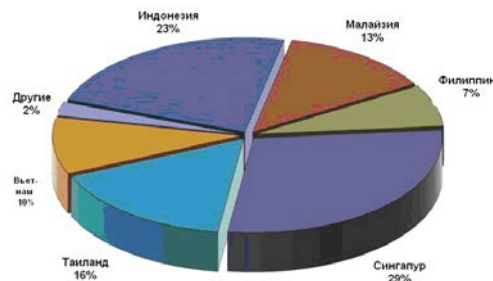


Рисунок 2 – Долевое участие в расходах на оборону стран Юго-Восточной Азии в 2012 году (в USD) [1]

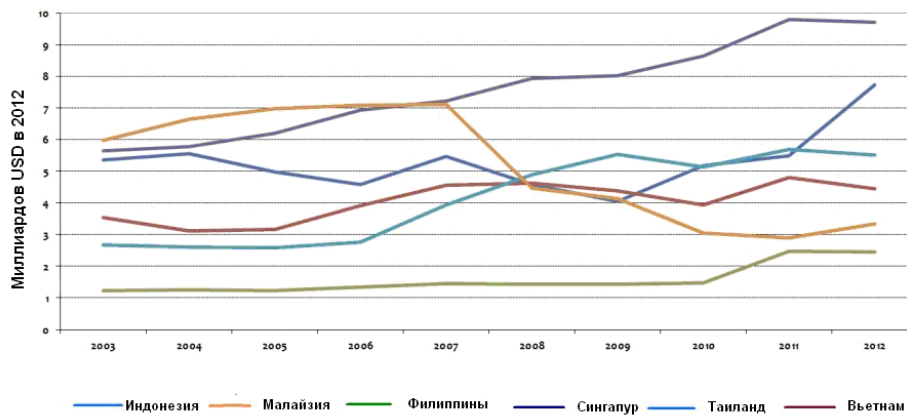


Рисунок 3 – Оборонный бюджет стран Юго-Восточной Азии в 2003–2012 годах [1], [2]

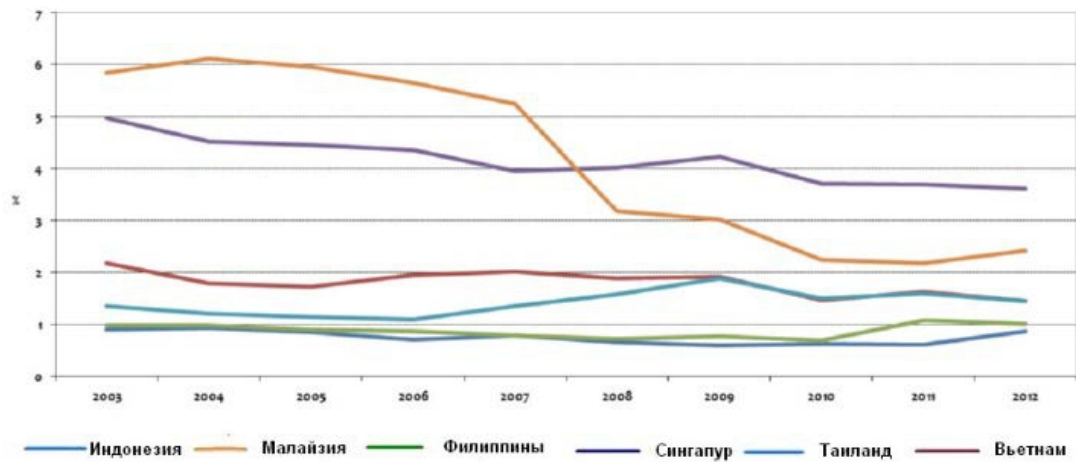


Рисунок 4 – Доля ВВП, израсходованная на оборону [1], [2]

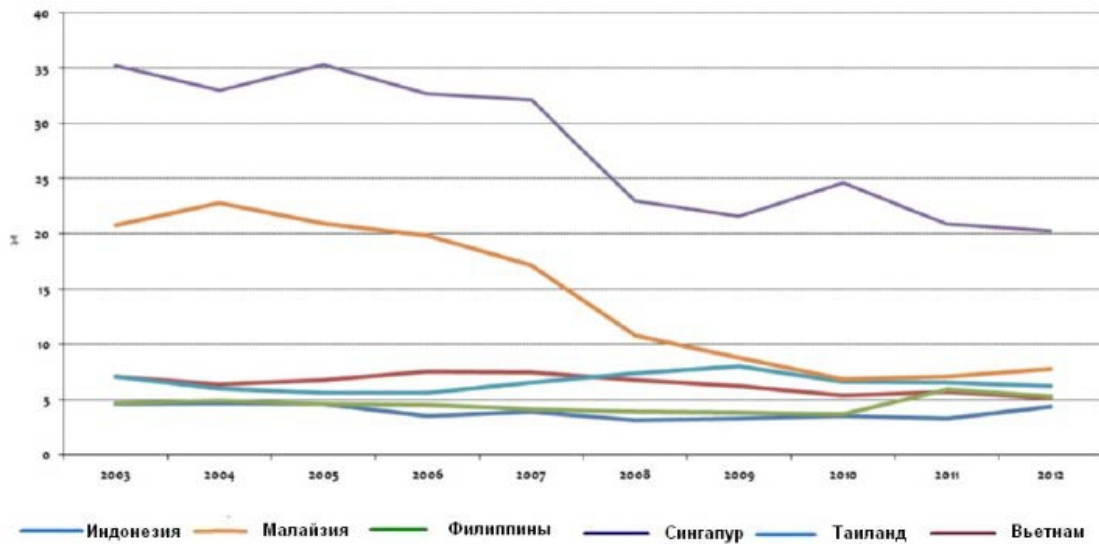


Рисунок 5 – Доля государственных расходов на оборону [2], [3]

Однако в регионе есть две страны, которые не только не уменьшили оборонные расходы, но даже увеличили их – это Индонезия и Таиланд. Рассмотрим более подробно экономические показатели этих двух стран.

## ИНДОНЕЗИЯ

<b>Название страны</b>	Индонезия	<b>Местная валюта</b>	Рупия
<b>Столица</b>	Джакарта	<b>Финансовый год</b>	1 января – 31 декабря
<b>Население</b>	244,5 миллионов	<b>Экономика</b>	Развивающаяся страна с рыночной экономикой
<b>Площадь страны</b>	1 905 000 км <sup>2</sup>	<b>Промышленность</b>	Нефтяная, газовая, цементная, горнодобывающая, химических удобрений, резиновая, туризм, деревообрабатывающая, швейная и текстильная

**Економіка**

За последние 10 лет рост экономики в Индонезии составил в среднем 5,7 % в год в реальном выражении. В 2012 года экономика выросла на шесть процентов, так как дешевые продукты питания и цены на сырьевые товары стимулировали потребительские расходы. С глобальным восстановлением экономического роста ожидается медленный рост увеличения экспорта. Прогнозируется рост экономики Индонезии на 6,6 % в год до 2017 г., в соответствии с данными Международного Валютного Фонда, из-за больших потребительских расходов, устойчивого роста долгосрочных капиталовложений и увеличение объема иностранных инвестиций [4].

**Расходы на оборону**

В 2012 году оборонный бюджет Индонезии составил 72,5 триллиона IDR или 7,7 миллиардов USD в текущий период, что составляет 50,7 % реального увеличения оборонного бюджета в 2011 году. В 2012 году Министерство обороны Индонезии подписало контракт с Южной Кореей на покупку трех ударных дизельных подводных лодок класса CHANG BOGO. Также было заявлено о приобретении 103 танков Леопард 2A6, 50 боевых машин пехоты Marder 1A3 и 10 боевых машин обеспечения из запасов сухопутных войск ФРГ. Кроме того, Индонезия планирует закупить восемь штурмовых вертолетов Boeing AH-64D Apache Longbow и 24 истребителей F-16C/D. [3], [5]

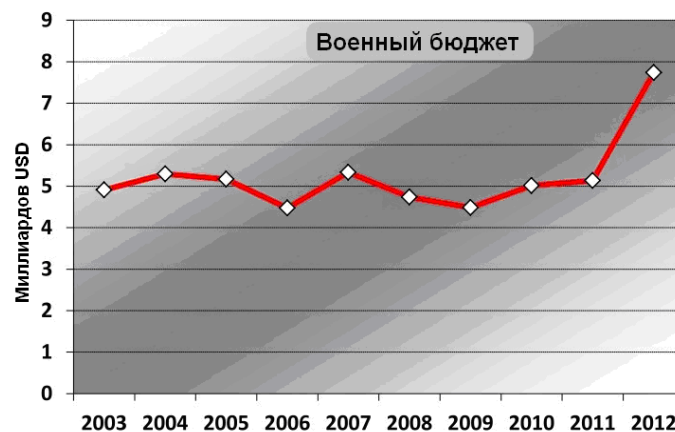


Рисунок 6 – Изменения военного бюджета Индонезии за 10 лет (с 2003 по 2012 годы)

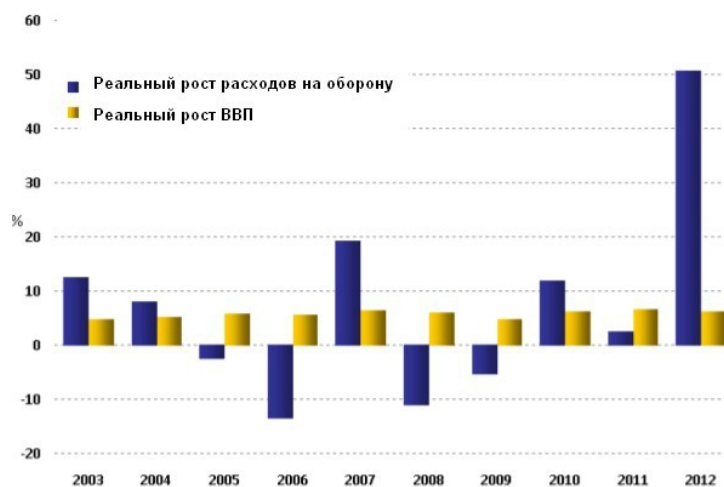


Рисунок 7 – Рост расходов Индонезии на оборону по сравнению с ростом ВВП





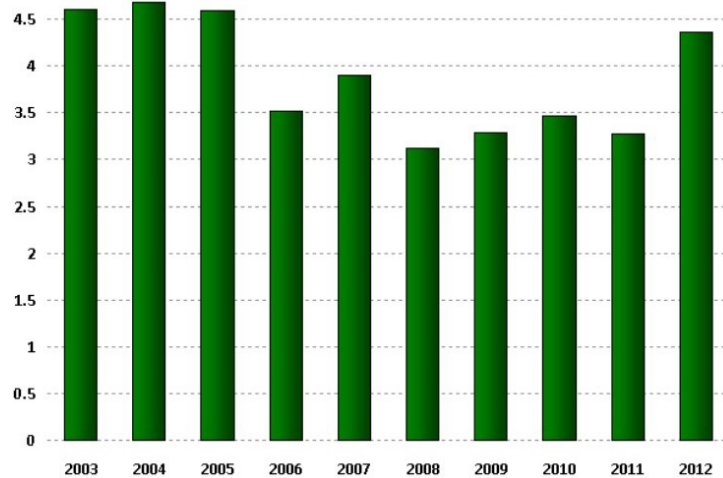


Рисунок 8 – Изменение государственных расходов Индонезии на оборону

## ТАИЛАНД

<b>Название страны</b>	Таиланд	<b>Местная валюта</b>	Бат
<b>Столица</b>	Бангкок	<b>Финансовый год</b>	1 октября–30 сентября
<b>Население</b>	64,5 миллиона	<b>Экономика</b>	Развивающаяся страна с рыночной экономикой
<b>Площадь страны</b>	513 000 км <sup>2</sup>	<b>Промышленность</b>	Туризм, текстильная, цементная, сельскохозяйственная, мебельная, электронная, пластмассовая и оловянная

### Экономика

За последние 10 лет рост экономики в Таиланде составил в среднем 4,2 % в год в реальном выражении. После практического нулевого роста в 2011 году, экономика Таиланда выросла на 5,6 % в 2012 году. Расходы на восстановление после наводнений в конце 2011 года, большие потребительские расходы и сверхбыстрое расширение долгосрочных капиталовложений на 20 лет обеспечило экономический рост в 2012 году. Несмотря на завершение восстановления, ожидается, что экономика Таиланда будет расти до пяти процентов в год до 2017 года, по данным Международного Валютного Фонда, основанным на расширении экспортного сектора и больших потребительских расходах как следствие увеличивающегося чистого дохода.

### Расходы на оборону

В 2012 году оборонный бюджет Таиланда составил 167,5 миллиардов бат или 5,5 миллиардов USD в текущий период, что составляет 3,6 % реального снижения оборонного бюджета по сравнению с 2011 годом. В сентябре 2011 году Королевской армией Таиланда заключен контракт с Украиной, который предусматривает поставку 49 основных боевых танков Оплот на общую сумму более 200 миллионов USD. В сентябре 2012 года Королевскими ВВС Таиланда подписала контракт с компанией Eurocopter на поставку четырех вертолетов EC725, с дальнейшим расширением поставки еще на шесть машин. Поставка вертолетов, которые будут предназначены для поисково-

спасательных работ, ожидается в 2015 году. Также в сентябре 2012 года Королевская армия Таиланда получила одобрение кабинета министров на приобретение восьми легких/штурмовых вертолетов AS 500 Fenrec у компании Eurocopter, а Королевские ВМС Таиланда закупят два многоцелевых фрегата в течение следующих трех лет.

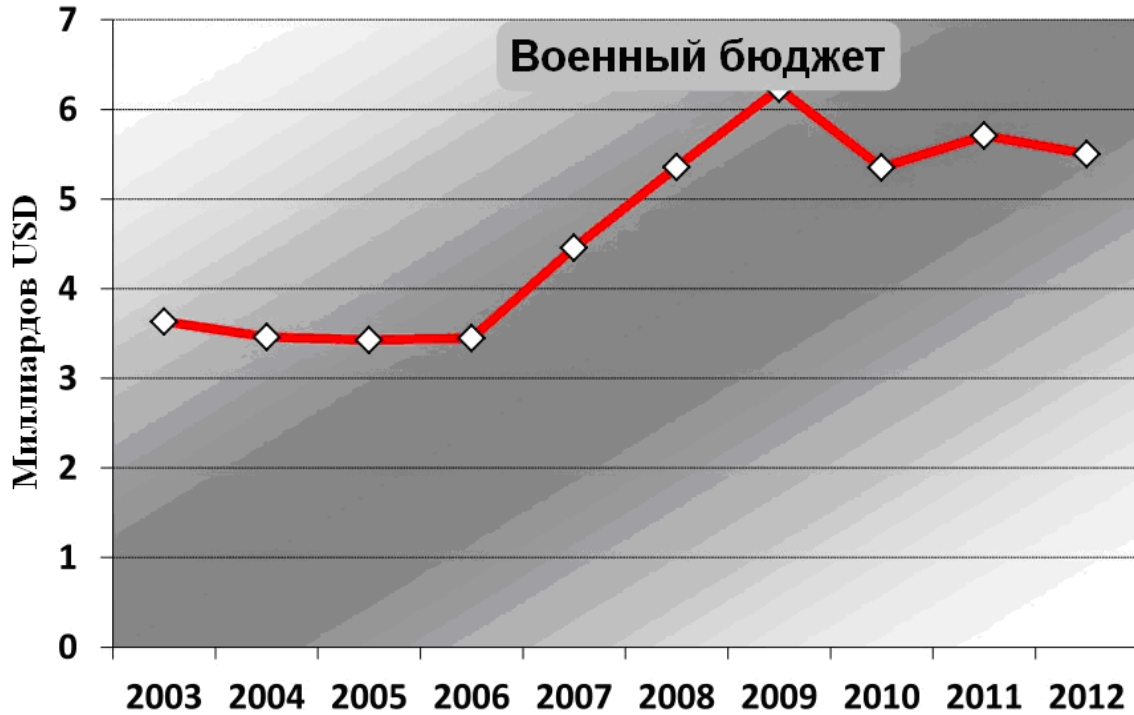


Рисунок 9 – Изменения военного бюджета Таиланда за 10 лет (с 2003 по 2012 годы)

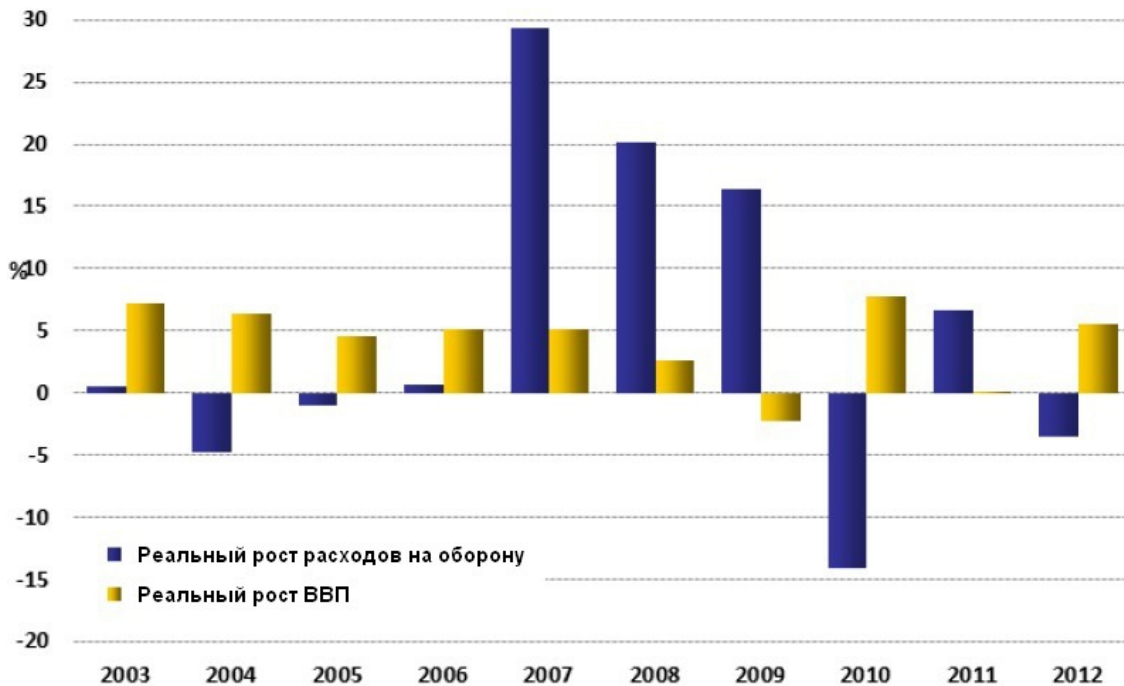


Рисунок 10 – Рост расходов Таиланда на оборону по сравнению с ростом ВВП

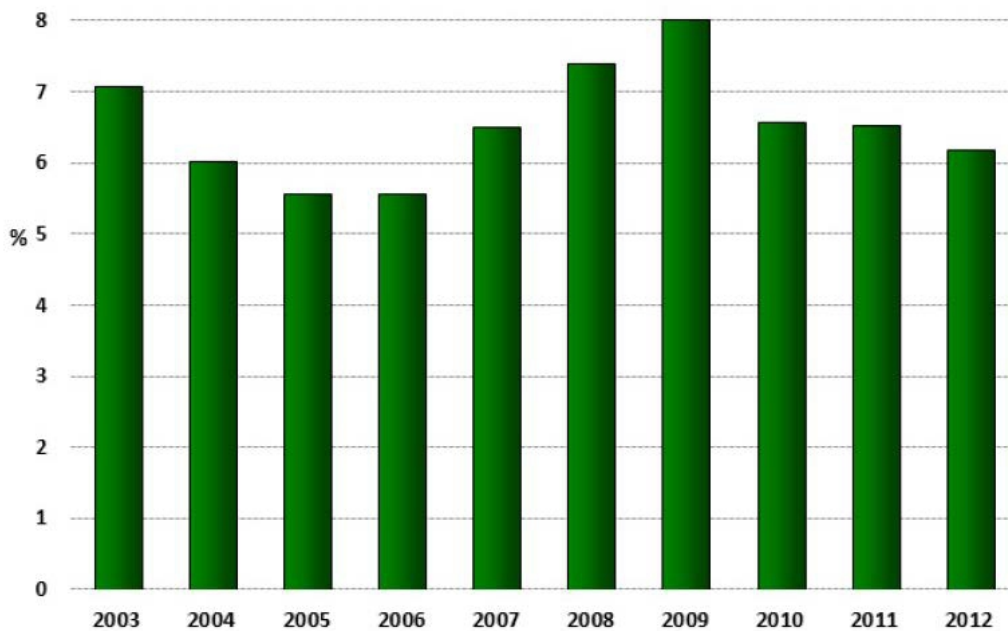


Рисунок 11 – Изменение государственных расходов Таиланда на оборону

На основании вышеизложенного, можно сделать следующие выводы:

- в странах Юго-Восточной Азии, в частности, Индонезии и Таиланде, отмечается значительный рост военных расходов в 2012 году и значительные государственные инвестиции в восстановление экономики после стихийных бедствий;
- потребительские расходы и инвестиции станут движущей силой экономического роста в регионе, поскольку неопределенности в Евроне негативно отразятся на региональном экспорте до 2017 года;
- региональные расходы на оборону существенно изменились в 2012 году, поскольку наблюдалось снижение темпов восстановления мировой экономики. Например, такая страна как Индонезия продолжает демонстрировать значительный рост в расходах на оборону, в то время как Таиланд уменьшил расходы на оборону в 2012 году. Другие страны региона продолжали демонстрировать относительную стабильность в своих военных расходах;
- наблюдается тенденция к проведению модернизации существующего вооружения разными темпами;
- Юго-Восточная Азия остается привлекательным рынком вооружений для оборонных предприятий.

#### Литература

1. The International Institute for Strategic Studies: The Military Balance 2012. Volume: 2012, ISBN: 978-1857436426, Date: 07 March 2012.
2. International Monetary fund Publication: 2a. Indonesia: Financial Sector Assessment Program Publication Date: December 18, 2012, Series: Country Report No. 12/335, 2b. Thailand: Staff Report for the 2012 Article IV Consultation, Series: Country Report No. 12/124, ISBN/ISSN: 9781475561685/2227-8907.
3. Indonesia Government Budget, <http://www.tradingeconomics.com/indonesia/government-budget>.
4. Defence Economic Trends in the Asia-Pacific 2013.



5. The Economist: The World In 2012.

Bibliography (transliterated)

1. The International Institute for Strategic Studies: The Military Balance 2012. Volume: 2012, ISBN: 978-1857436426, Date: 07 March 2012.
2. International Monetary fund Publication: 2a. Indonesia: Financial Sector Assessment Program Publication Date: December 18, 2012, Series: Country Report No. 12/335, 2b. Thailand: Staff Report for the 2012 Article IV Consultation, Series: Country Report No. 12/124, ISBN/ISSN: 9781475561685/2227-8907.
3. Indonesia Government Budget, <http://www.tradingeconomics.com/indonesia/government-budget>.
4. Defence Economic Trends in the Asia-Pacific 2013.
5. The Economist: The World In 2012.

УДК 621-05 (477.54-25)

Кіпріч К.К., Ковалів В.І., Малахов В.А.

**АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ ЗМІНИ ОБОРОННИХ ВИТРАТ КРАЇН  
АЗІАТСЬКО-ТИХООКЕАНСЬКОГО РЕГІОНУ**

У статті проведено аналіз тенденцій зміни витрат в галузі оборони деяких країн азійсько-тихоокеанського регіону, з'ясовано зміни витрат на оборону в 2012 році. Завдяки зниженню темпів відновлення світового економічного підйому, відзначається значне зростання військових витрат в 2012 році, значними державними інвестиціями та витратами на відновлення економіки після стихійних лих у країнах Південно-східної Азії, зокрема в Індонезії та Таїланді.

Kiprich K.K., Kovaliv V.I., Malakhov V.A.

**TREND ANALYSIS OF CHANGES IN DEFENSE SPENDING  
OF ASIA-PACIFIC COUNTRIES**

The paper analyzes the trends of changes in defense spending of some countries of the Asia-Pacific region and determines the changes in defense spending in 2012. Due to reduction of the of the global economic development recovery rate, there is a significant increase in military spending in 2012, large public investments and expenditures economic recovery after disasters in South-East Asia, especially in Indonesia and Thailand.

«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 Суг; размер шрифта – 12; межстрочный интервал – 1.

**ПОРЯДОК РАЗМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛА:**

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

**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**