

*Товажнянский Л.Л., Ульев Л.М., Мельниковская Л.А., Зулин Б.Д.*

**Термодинамически обоснованный энергосберегающий потенциал установки АВТ А12/2 в режиме работы без вакуумного блока (3–13)**

*Анилко О.Б., Новиков А.И., Савченко В.А.*

**О влиянии фактора уноса на термическое сопротивление отложений на теплопередающей поверхности теплообменника (14–17)**

*Черкашенко М.В., Крутиков Г.А.*

**Синтез энергосберегающих пневмоагрегатов (18–27)**

*Болюх В.Ф., Назаренко С.А.*

**Системный подход мультидисциплинарной оптимизации электромеханических преобразователей ударного действия (28–36)**

*Некрасов П.О.*

**Дослідження кінетики процесу отримання структурованих ліпідів методом ферментативної трансетерифікації жирів (37–43)**

*Рассоха А.Н., Черкашина А.Н., Алешко С.Е.*

**Агрегативная седиментационная устойчивость дисперсных наполнителей в фурано-эпоксидных реакционных системах (44–50)**

*Черкашенко М.В., Салыга Т.С.*

**К вопросу синтеза схем пневмогидроагрегатов (51–56)**

*Нзюка А.М., Трошин А.Г., Ведь В.Е.*

**Перспективы промышленного использования автомобильных покрышек в цементном производстве (57–60)**

*Ефимов А.В., Каверцев В.Л., Гаркуша Т.А.*

**Методы и модели автоматизированной диагностики технического состояния оборудования, планирования ремонтов и расчета коэффициентов готовности энергоблоков ТЭС и АЭС (61–68)**

*Маляренко В.А., Яковлев О.И.*

**Фулерени – нова структура молекулярної побудови речовини для акумулювання водню (69–75)**

*Потанина Т.В.*

**Методологические подходы к решению задачи управления распределением нагрузок между энергоблоками электростанций (76–84)**

*Левченко С.А., Баташова Н.А., Мных А.С.*

**О выборе структуры модели комбинированной системы отопления (85–88)**

*Сторінка редколегії (89)*

УДК 658.26:665.63:338.45

Товажнянский Л.Л., Ульев Л.М., Мельниковская Л.А., Зулин Б.Д.

## ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИ ОБОСНОВАННЫЙ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ ПОТЕНЦИАЛ УСТАНОВКИ АВТ А12/2 В РЕЖИМЕ РАБОТЫ БЕЗ ВАКУУМНОГО БЛОКА

**Введение.** Проблема обеспечения украинской экономики энергоносителями – одна из самых актуальных в наше время. Газ, нефть, уголь и даже электроэнергию приходится импортировать. Ежегодно на это затрачивается около 8 млрд. дол., на что идет 2/3 всего товарного экспорта. Дефицит энергоносителей влечет за собой много последствий: недобор урожая, систематическое отключение населенных пунктов от электропитания и т.д.

Научно-технический прогресс, улучшение качества продукции, улучшение условий труда, интенсификация всего общественного производства определяются развитием энергетики страны, основой которой является топливная база и предприятия по переработке топлива.

Увеличение объемов производства, которое ожидается на протяжении ближайших десяти лет, обуславливает возрастание спроса на энергию и электроэнергию. Несмотря на то, что установленная мощность переработки предприятий Украины является высокой, реальная рабочая мощность снижается. Возникает потребность в реабилитации существующих установок и оборудования. Это относится ко всем отраслям экономики государства, в том числе, и к нефтеперерабатывающей промышленности.

Установки атмосферно-вакуумной трубчатки (АВТ) являются основой всех нефтеперерабатывающих заводов, т.к. вся сырая нефть проходит через эти установки [1]. Поэтому особое внимание следует уделить повышению эффективности работы существующих АВТ и уменьшению удельных затрат на переработку нефти.

В последнее десятилетие, в связи с увеличением стоимости энергоносителей, стали широко применяться при реконструкции систем теплообмена на нефтеперерабатывающих заводах методы интеграции процессов [2–5].

В работе [6] были приведены результаты экстракции данных, сбор которых осуществлялся с помощью стационарных и переносных термометров и расходомеров. После замеров и уточнения данных в программе HYSYS (Unisim Design) были получены наиболее точные данные о технологических потоках установки АВТ А12/2, с мощностью переработки 2 млн. т. сырой нефти в год, в режиме работы без вакуумного блока. Схема установки приведена в вышеуказанной работе [6].

### **Определение энергосберегающего потенциала установки АВТ А12/2.**

Технологические данные, полученные в работе [6] и необходимые для тепловой интеграции процесса переработки нефти, представлены в потоковой таблице [7] (табл. 1).

Используя технологическую схему установки АВТ А12/2, можно отдельно представить блок подогрева сырой нефти в теплообменных аппаратах перед ее подачей в первые атмосферные ректификационные колонны К-1 и К-1а. Этот блок является основой системы рекуперации теплоты на установке (рис. 1) [8–10]. Мы видим, что в системе рекуперации тепловой энергии преобладает противоточная схема организации теплообмена между горячими и холодными технологическими потоками.

**ЕНЕРГЕТИКА ТЕПЛОТЕХНОЛОГІЇ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ**

Таблица 1 – Поточковые данные технологических потоков, включенных в интеграцию для режима работы АВТ А12/2 без вакуумного блока в зимнее время

№	Название потока	Тип	$t_s$ , °C	$t_T$ , °C	$G$ , т/ч	$C$ , кДж/(кг·K)	$r$ , кДж/кг	$CP$ , кВт/К	$\Delta H$ , кВт	$\alpha$ , кВт/(м <sup>2</sup> ·K)
1	Переток К-1,1а в К-3	гор	173	54	8,20	2,11		4,81	571,93	0,4
2,1	Охлаждение паров бензина К-1, 1а	гор	145	50	29,69	2,52		20,78	1974,36	0,1
2,2	Охлаждение газа из К-1, 1а	гор	145	40	2,78	2,52		1,95	204,33	0,1
2,3	Конденсация паров бензина К-1, 1а	гор	50	50	29,69		75		618,53	1
2,4	Охлаждение бензина К-1, 1а	гор	50	40	29,69	2,11		17,40	174,01	0,4
3,1	Охлаждение паров бензина К-3	гор	157	46	17,40	2,52		12,18	1351,98	0,1
3,2	Конденсация паров бензина К-3	гор	46	46	17,40		75		362,50	1
3,3	Охлаждение водяных паров К-3	гор	157	100	1,05	2,00		0,58	32,96	0,12
3,4	Конденсация водяных паров К-3	гор	100	100	1,05		2256		658,00	2
3,5	Охлаждение воды К-3	гор	100	46	1,05	4,19		1,22	65,99	0,8
4	Дизельное топливо	гор	229	200	71,11	2,70		68,29	1980,27	0,2
		гор	200	100	71,11	2,42		58,81	5880,67	0,2
		гор	100	58	71,11	2,10		51,76	2174,05	0,2
5	Циркуляционное орошение К-3	гор	165	74	75,79	2,11		55,87	5083,79	0,15
6	Циркуляционное орошение К-2,2а	гор	295	144	30,73	2,11		29,85	4507,90	0,15
7	Мазут	гор	360	300	133,08	2,90		150,01	9000,85	0,15
		гор	300	250	133,1	2,71		135,78	6789,08	0,15
		гор	250	200	133,1	2,54		122,99	6149,54	0,15
		гор	200	150	133,1	2,36		109,87	5493,37	0,15
		гор	150	90	133,1	2,17		95,69	5741,42	0,15
8	Солевой р-р с ЭЛОУ	гор	115	40	15,05	4,21		17,14	1285,61	0,8
9	Сырая нефть	хол	10	50	250,85	1,95		142,55	5701,96	0,1
		хол	50	118	250,85	2,10		170,22	11574,78	0,1
10	Обессоленная нефть	хол	112	150	248,34	2,28		192,17	7302,34	0,15
		хол	150	200	248,34	2,47		214,40	10720,07	0,15
		хол	200	214	248,34	2,65		231,36	3239,06	0,15
11	Отбензиненная нефть в АЗАЧП П-1	хол	214	250	56,00	2,75		54,87	1975,49	0,15
		хол	250	300	56,00	2,84		59,75	2987,44	
		хол	300	371	56,00	3,18		66,73	4737,86	
	Отбензиненная нефть в АЗВЧП П-1	хол	214	250	26,00	2,75		25,48	917,19	0,15
		хол	250	300	26,00	2,84		27,74	1387,03	
		хол	300	310	26,00	2,97		29,42	294,16	
12	Отбензиненная нефть в ЛЗ П-2	хол	214	250	64,00	2,75		62,71	2257,71	0,15
		хол	250	300	64,00	2,84		68,28	3414,22	
		хол	300	370	64,00	3,18		76,17	5331,73	
	Отбензиненная нефть в ПЗ П-2	хол	214	250	64,00	2,75		62,71	2257,71	0,15
		хол	250	300	64,00	2,84		68,28	3414,22	
		хол	300	370	64,00	3,18		76,17	5331,73	
13	Мазут через ВЗВЧП П-1	хол	360	407	53,29	2,90		65,68	3086,84	0,15
14	Вода на ЭЛОУ	хол	10	80	12,54	4,20		14,60	1021,87	0,8
15	Перегрев пара в П-1	хол	135	450	1,05	2,69		2,60	819,88	0,6
16	Газ к печам	хол	31	80	3,00	2,52		2,10	102,90	0,1
17	Мазут в печи	хол	49	80	3,79	2,05		2,32	71,80	0,1

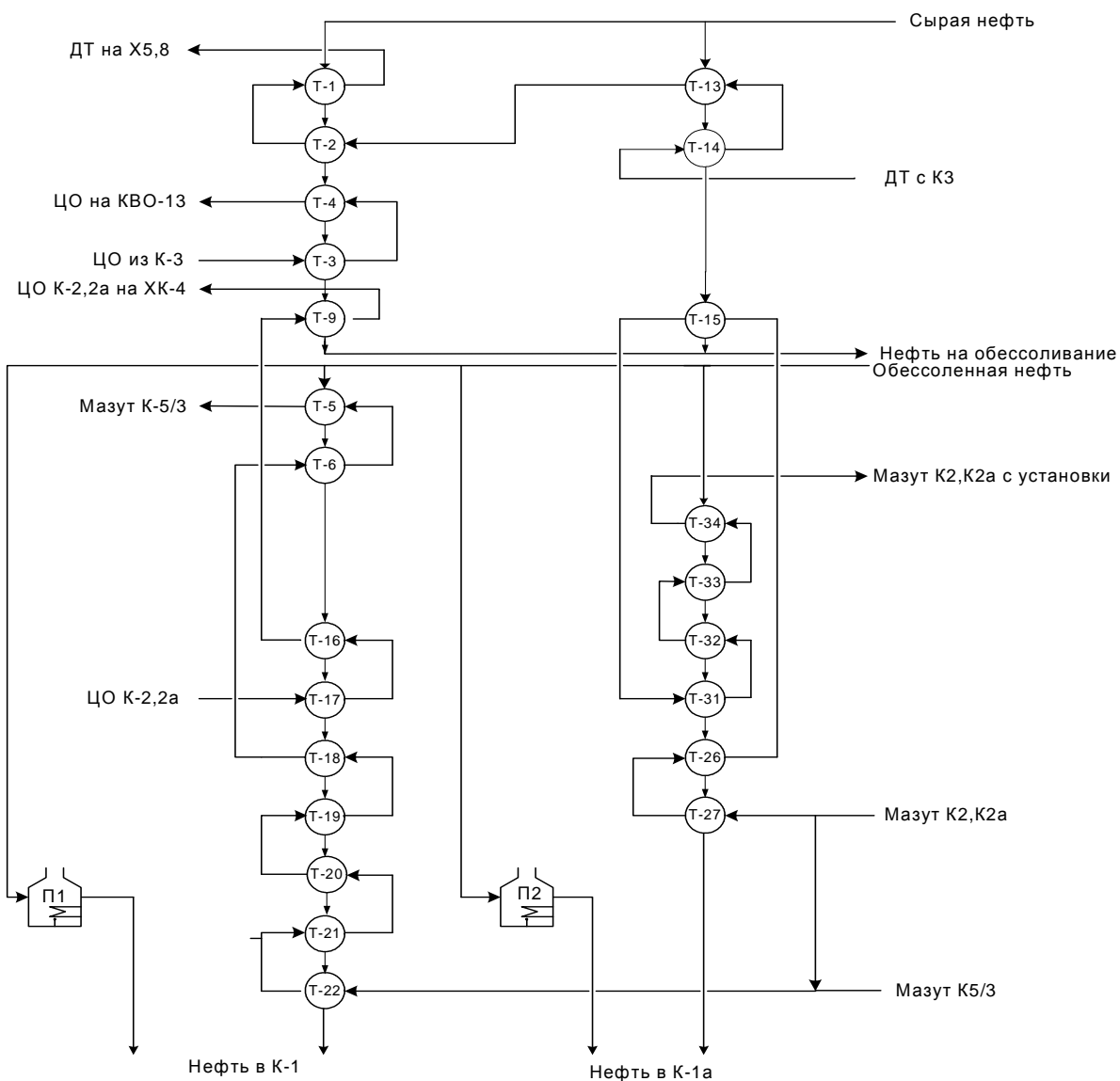


Рисунок 1 – Технологическая схема блока подогрева сырой нефти перед поступлением в атмосферную колонну для режима работы без вакуумного блока  
 ДТ – дизельное топливо, К – ректификационные колонны, КВО – конденсаторы воздушного охлаждения, П – трубчатые печи, Х – холодильник, ХК – холодильник конденсатор, ЦО – циркуляционное орошение

Применение таких схем основывается на теории и практике противоточного теплообмена, когда температура холодного теплоносителя меняется в сторону самого горячего теплоносителя и наоборот, что обеспечивает вертикальный теплообмен [7] на всем протяжении движения теплоносителей в теплообменном аппарате. Эта идея совершенно необоснованно переносится на синтез тепловых сетей, которые являются системами более высокого порядка, нежели одиночные теплообменники, и, как правило, рекуперативные теплообменные системы, построенные на этом правиле, не являются оптимальными с точки зрения возможной мощности рекуперации тепловой энергии и окупаемости проекта в целом. В таких системах может наблюдаться большой перекрестный теплообмен, приводящий к завышенной площади поверхности теплообмена [7].

Более удобно для представления теплообменных связей использовать сеточную диаграмму, на которой нанесены все необходимые технологические данные и теплообменное оборудование (рис. 2).

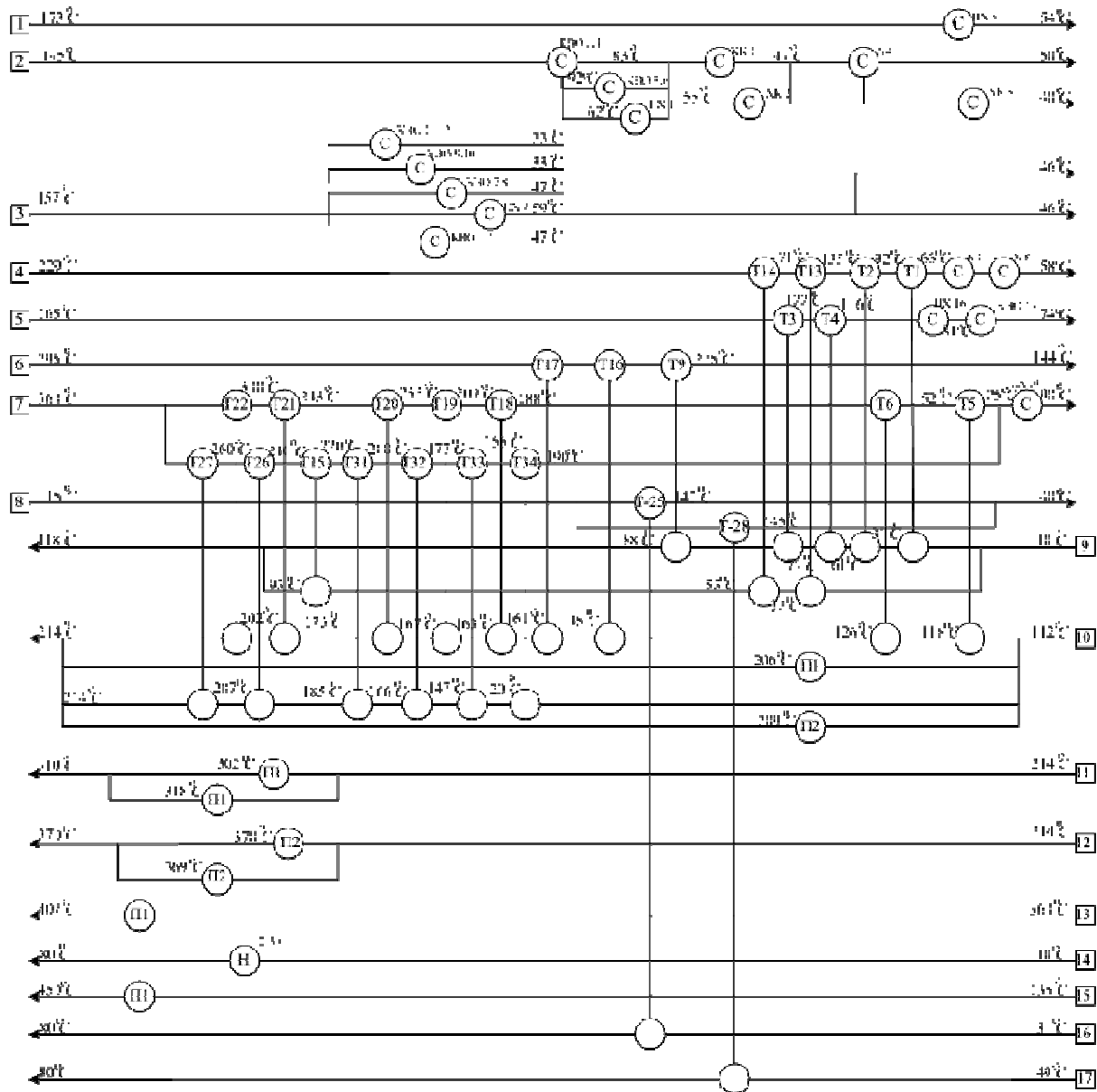


Рисунок 2 – Сеточная диаграмма существующего процесса:

С – холодильник; Н – паровой нагреватель, Т – теплообменный аппарат; П – трубчатые печи

На технологических потоках показаны температуры теплоносителей до и после теплообменников.  
Номера потоков соответствуют номерам в таблице 1

С помощью сеточной диаграммы, а также по измеренным температурам технологических потоков и значениям их потоковых теплоемкостей, мы можем определить тепловую мощность, которая рекуперирована в системе теплообмена установки АВТ А12/2 в режиме работы без вакуумного блока.

Суммарное изменение потоковой энтальпии горячих потоков в системе рекуперативного теплообмена установки составляет величину ~39 МВт. Рекуперация тепло-

вой энергии, рассчитанная по суммарному изменению энтальпии холодных потоков, составляет значение  $\sim 33$  МВт. Значительное различие между величинами мощности, которую отдают горячие потоки, и мощности, идущей на нагрев холодных потоков, в системе рекуперации объясняется тепловыми потерями в окружающую среду. Разность этих значений показывает, что потери на теплообменном оборудовании составляют величину около 6 МВт. Причем тепловые потери происходят как от горячих потоков, так и от нагретых холодных потоков, что подтверждает вычисление мощности рекуперации теплоты по нагрузкам индивидуальных теплообменных аппаратов в системе рекуперации. Эта величина составляет значение  $\sim 33$  МВт.

Используя технологические данные из таблицы 1 и сеточную диаграмму, построим на температурно-энтальпийной диаграмме горячую и холодную составные кривые, которые представляют суммарное изменение расходного теплосодержания всех холодных и горячих технологических потоков, циркулирующих на установке АВТ А12/2. Составные кривые на диаграмме следует разместить так, чтобы интервал перекрытия между ними составил полученную нами величину мощности рекуперации, равную  $\sim 33$  МВт (рис. 3).

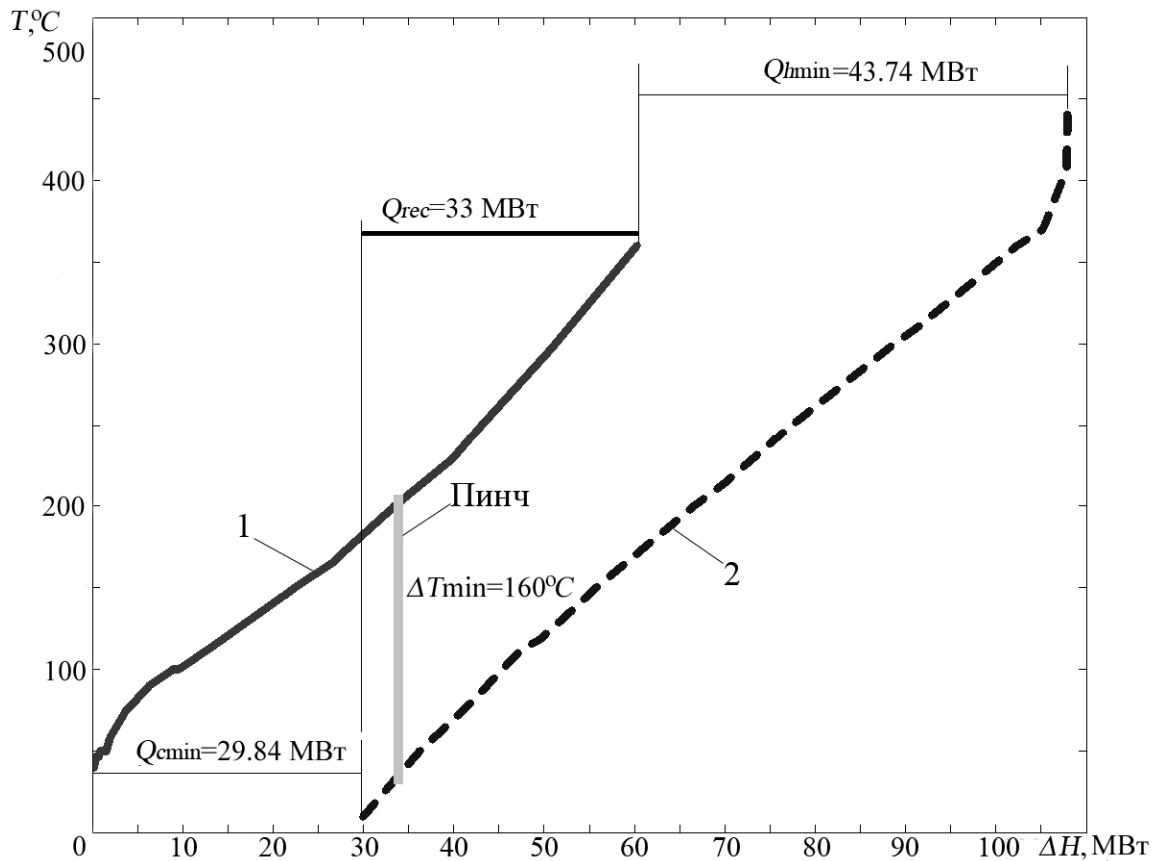


Рисунок 3 – Составные кривые существующего процесса:

- 1 – горячая составная кривая; 2 – холодная составная кривая;  $Q_{hmin}$  – минимальное количество горячих утилит;  $Q_{cmin}$  – минимальное количество холодных утилит;
- $Q_{rec}$  – мощность рекуперации энергии;
- $T$  – температура;  $\Delta H$  – изменение энтальпии потоков

Составные кривые содержат большой объем информации о системе технологических потоков, утилитной системе и эффективности использования тепловой энергии

в процессе. Проекция горячей составной кривой на энтальпийную ось показывает значение тепловой мощности, которую возможно отвести от системы горячих потоков и использовать для подогрева холодных технологических потоков. Аналогично, проекция холодной составной кривой на энтальпийную ось показывает значение мощности, которую необходимо подвести к холодным потокам для выполнения процесса.

Для проведения процесса необходима мощность ~ 74 МВт, но это не значит, что вся эта мощность должна быть получена от утилитной системы установки, в данном случае – системы трубчатых печей [8–10]. Часть энергии может быть рекуперирована с помощью системы теплообмена между холодными и горячими потоками. Величину мощности и показывает область перекрытия кривых. Наименьшее расстояние между кривыми по оси ординат – температурной оси – называется областью пинча избранной системы технологических потоков.

В нашем случае на установке АВТ А12/2 в режиме работы без вакуумного блока пинч локализуется на температурах:  $T_{гор} = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $T_{хол} = 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Минимальная разница температур в области пинча равна  $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Эта разница была бы действительно минимальной, если бы выполнялись условия вертикального теплообмена, но в настоящее время в теплообменной системе установки значительная часть тепловой энергии передается между теплоносителями в условиях перекрестного теплообмена, потому на теплообменных аппаратах наблюдаются разницы температур между теплоносителями меньше, чем  $\Delta T_{min}$  [11].

Здесь происходит также перенос тепловой энергии через пинч. Перекрестный теплообмен, наблюдаемый в существующей теплообменной сети установки АВТ А12/2, приводит к значительному завышению площади поверхности теплообмена в теплообменных сетях.

От утилитной системы процесс в настоящий момент потребляет около 50 МВт полезной мощности. Но реальное потребление тепловой энергии самим процессом первичной переработки несколько меньше, поскольку многие теплообменные аппараты на установке работают без теплоизоляции, и часть энергии теряется на оборудовании установки. Были также обследованы все теплообменные аппараты и трубопроводы теплообменной системы, определена величина их открытых участков и их температуры (табл. 2). Данные, собранные на теплообменном оборудовании, позволяют получить точное значение потерь за счет конвективного переноса тепловой энергии и лучистого теплообмена, которое составляет ~6 МВт. Рассчитанное значение подтверждает верность расчета количества тепловых потерь по изменению теплосодержания горячих и холодных потоков.

Если к полезной мощности печей прибавить мощность отходящих газов, составляющую около 20,4 МВт, то получим оценку мощности, которая выделяется при сгорании топлива в печи ~ 70,4 МВт.

Применяя аппарат составных кривых, мы можем достаточно точно оценить необходимую площадь поверхности теплообмена для проектируемого или реконструируемого процесса.

Далее, используя цены на теплообменное оборудование, полученные от его производителей, можем еще до выполнения проекта реконструкции оценить необходимые капиталовложения и срок их окупаемости. Для кожухотрубчатых теплообменников, стоимость одного квадратного метра поверхности теплообмена можно оценить величиной в 20 дол. США, а для аналогичных российских аппаратов – величиной в 60 дол. США.

Таблица 2 – Данные для расчета тепловых потерь на теплообменном оборудовании

Тепло-обменник	Температура открытой наружной поверхности теплообменника, °С			Размеры открытой части наружной поверхности теплообменника, м	
	1 крышка	2 крышка	Корпус	Ø 1, 2 крышки, м	Длина открытой части корпуса, м от 1 крышки
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
T-1	23	50	23	0,6	1
T-2	38	50	38	0,6	1
T-27	260	155	260	1,2	1,5
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
T-26	227	116	227	1,2	1,5
T-15	67	260	40	1,2	1,5
T-14	28	118	28	1	1,5
T-13	16	144	16	1	1,5
T-31	75	100	75	0,6	1
T-32	80	80	80	0,6	1
T-33	67	80	80	1	11
T-34	90	70	70	1	11
T-9	80	130	130	1	11
T-3	75		75	0,6	1
T-4	70		70	0,6	1
T-8	104	100	104	1	1
T-7	112	100	112	1	1
T-6	120	100	120	1	1
T-5	102	120	102	1	1
T-16	100	200	100	0,6	1
T-17	90	200	90	0,6	1
T-18	70	160	70	0,6	1
T-19	100	185	100	0,6	1
T-20	157		157	1,2	1
T-21	170	220	170	0,6	1
T-22	195	240	195	0,6	1
T-28	65	123	65	1	1
T-25	25	90	25	1	1

Стоимость установленного оборудования, как правило, в два раза превышает его рыночную стоимость, то есть мы можем принять для оценки стоимости установленного оборудования величину в 110–120 дол. США за один квадратный метр площади поверхности теплообмена, и, следовательно, капитальную стоимость одного теплообменного аппарата можно определить выражением [12]:



$$\text{Кап.стоимость} = A_T + B_T \cdot (S)^c,$$

где  $A_T = 5000$  дол. США – стоимость установки одного теплообменного аппарата;  $B_T$  – коэффициент, эквивалентный стоимости  $1 \text{ м}^2$  площади поверхности теплообмена;  $S$  – площадь поверхности теплообмена теплообменного аппарата;  $c$  – коэффициент, который отображает нелинейную зависимость стоимости теплообменника от величины его поверхности теплообмена. Для кожухотрубчатых теплообменников, как правило,  $c = 0,87$ .

Стоимость энергии оценим по рыночной стоимости мазута – 112 дол. США за 1 тонну, которая отвечает величине 87 дол. США за 1 кВт год.

Данные значения с помощью составных кривых позволяют построить диаграммы для определения величины  $\Delta T_{\min}$ , величины инвестиций в дополнительную к существующей площади поверхности теплообмена и срок окупаемости предлагаемого проекта (рис. 4).

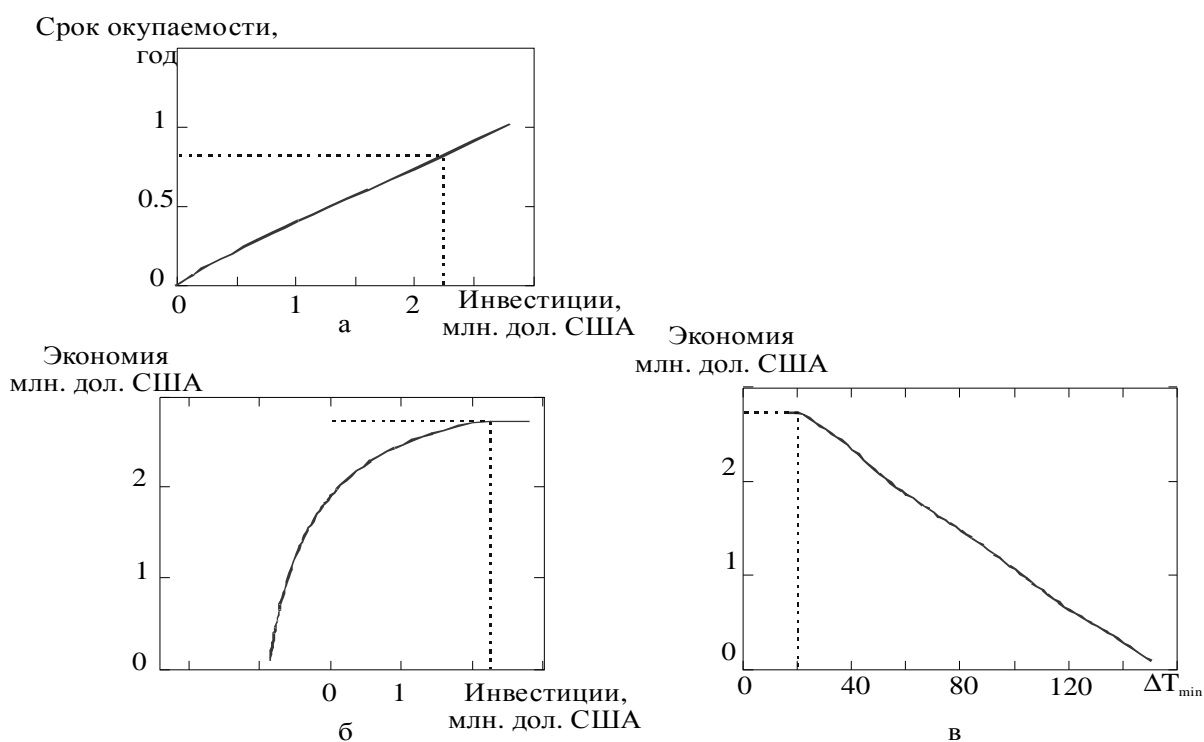


Рисунок 4 – Определение оптимального значения  $\Delta T_{\min}$  по выбранному критерию реконструкции системы теплообмена: а – зависимость срока окупаемости проекта реконструкции от инвестиций в реконструкцию; б – кривая экономической эффективности; в – зависимость получаемой прибыли от  $\Delta T_{\min}$

Мы видим, что задача энергосберегающей реконструкции установки АВТ А12/2 в режиме работы без вакуумного блока имеет пороговый характер, то есть при превышении некоторого значения инвестиций годовая экономия перестает увеличиваться (рис. 4,б). Данный порог отвечает капвложениям в 2,23 млн. дол. США, срок окупаемости данных инвестиций составит 0,82 года. Минимальная разница температур между теплоносителями на теплообменных аппаратах вблизи порогового значения энергопо-

требления составляет величину около  $\Delta T_{\min} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , которая и будет приниматься, как минимальная оптимальная разница температур при построении на энтальпийно-температурной диаграмме составных кривых (рис. 5) [9].

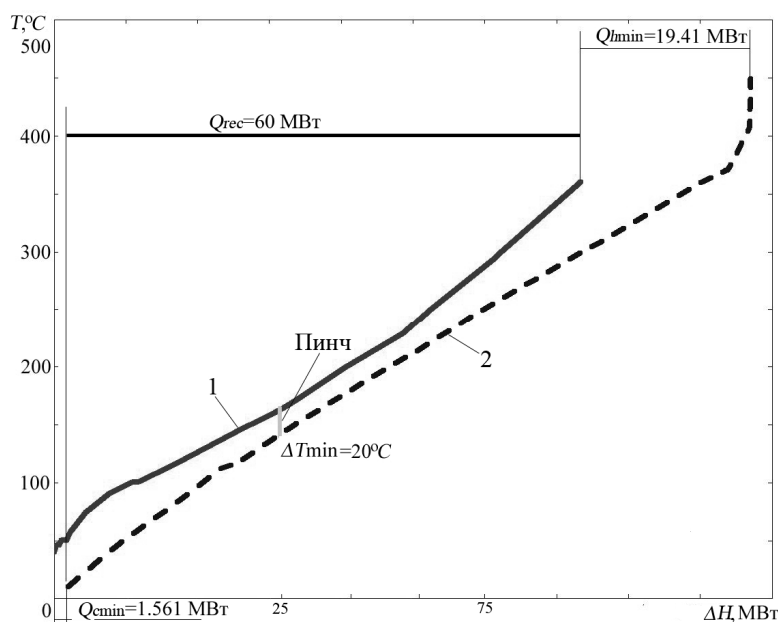


Рисунок 5 – Составные кривые интегрированного процесса:

1 – горячая составная кривая; 2 – холодная составная кривая;

$Q_{h\min}$  – минимальное количество горячих утилит;  $Q_{c\min}$  – минимальное количество холодных утилит;  $Q_{rec}$  – мощность рекуперации энергии;  $T$  – температура;

$\Delta H$  – изменение энтальпии потоков

Видно, что пинч локализуется на температурах  $150 \text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $130 \text{ }^{\circ}\text{C}$  для горячих и холодных потоков соответственно. Составные кривые показывают, что при достижении  $\Delta T_{\min} = 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  холодные утилиты равны  $1,6 \text{ MWt}$ , горячие утилиты при этом приобретают значение  $19,4 \text{ MWt}$ , что в  $2,5$  раза меньше, чем процесс получает от утилитной системы в настоящее время.

Таким образом, выполнение реконструкции системы теплообмена позволит уменьшить мощность, потребляемую процессом первичной переработки нефти на  $25,5 \text{ MWt}$ . В системе теплообмена будет рекуперироваться мощность около  $60 \text{ MWt}$ . Для этого будет необходимо  $30872 \text{ m}^2$  площади теплообменной поверхности.

В настоящее время теплообменная схема установки АВТ А12/2 в режиме работы без вакуумного блока содержит 43 кожухотрубчатых теплообменных аппарата, общей площадью поверхности теплообмена, равной  $10638 \text{ m}^2$ , и они могут быть использованы в новой технологической схеме теплообменной системы. Следовательно, дополнительно при выполнении проекта реконструкции теплообменной системы необходимо будет установить  $20234 \text{ m}^2$  площади поверхности теплообмена.

Также следует заметить, что если закрыть теплоизоляцией открытые нагретые поверхности оборудования, то можно уменьшить мощность конвективных и лучистых потерь в окружающую среду, по крайней мере, на  $6 \text{ MWt}$ . Таким образом, оценка общего энергосберегающего потенциала установки АВТ А12/2 в режиме работы без вакуумного блока составит величину  $31,5 \text{ MWt}$  (табл. 3) [10–12].

Таблица 3 – Сравнение энергетических характеристик существующей и предлагаемой в проекте реконструкции теплообменных сетей установки АВТ А12/2 в режиме работы без вакуумного блока

Режим	Горячие утилиты, МВт		Холодные утилиты, МВт		Рекуперация, МВт	
	Сейчас	Проект	Сейчас	Проект	Сейчас	Проект
Зимний без вакуумного блока	43,7	19,4	29,8	1,56	33	58,5

**Выводы.** Применение методов пинч-анализа к интеграции тепловых процессов установки первичной переработки нефти АВТ А12/2 Херсонского НПЗ в режиме работы без вакуумного блока позволит уменьшить мощность горячих утилит, потребляемых процессом более, чем на 75 % по сравнению с уровнем потребления в настоящее время или на ~34 МВт, и практически полностью отказаться от использования холодных утилит.

Годовая прибыль от внедрения данного проекта составит величину 3387900 дол. США, а срок окупаемости проекта не превысит 1 года.

**Обозначения.**  $CP$  – потоковая теплоемкость, Вт/°C;  $c$  – удельная теплоемкость, Дж/(кг·°C);  $G$  – массовый расход, кг/с;  $H$  – потоковое теплосодержание, Вт;  $t$  – температура, °C;  $t_s$  – температура снабжения, °C;  $t_T$  – целевая температура, °C;  $r$  – теплота фазового перехода, Дж/кг;  $\Delta T_{\min}$  – минимальная разность температур; ЭЛОУ – электрообессоливающая установка; АВТ – атмосферно-вакуумная трубчатка; АЗАЧП – атмосферный змеевик атмосферной части печи; АЗВЧП – атмосферный змеевик вакуумной части печи; ВЗВЧП – вакуумный змеевик вакуумной части печи; ЦО – циркуляционное орошение; ДТ – дизельное топливо; ГС – газосепаратор; ЛЗ – левый змеевик; ПЗ – правый змеевик; К-1, К-1а – атмосферные ректификационные колонны; К-2, К-2а – ректификационные колонны разгонки отбензиненной нефти; К-3 – ректификационная колонна для получения дизельного топлива; К-4 – вакуумная колонна; К-5 – отпарная колонна; П – трубчатая печь; Х – холодильник; ХК – холодильник-конденсатор; Т – теплообменный аппарат.

#### Литература

1. Багиров И.Т. Современные установки первичной переработки нефти / И.Т. Багиров. М.: Химия. 1974. – 240 с.
2. Т. Нацуо. Многоотраслевой комплекс объединяет нефтепереработку с энергетической и строительной промышленностью / Т. Нацуо, Т. Йаги // Нефтегазовые технологии. – 2004. – №3. – с. 79-82.
3. Plesu V. Retrofit solutions in crude distillation plant using process simulation and process integration / Plesu V., Bumbac G., Tacu-Marcov C., Ivanescu I., Popescu D.C. // 8<sup>th</sup> Conference on process integration, modeling and optimization for energy saving and pollution reduction. PRES'05. Chemical engineering transactions, 2005. Vol. 7. P. 169-174.
4. Plesu V. HEN retrofit for a crude distillation unit-part 1 / Plesu V., Bumbac G., Nan O. // 1<sup>th</sup> Conference on process integration, modeling and optimization for energy saving and pollution reduction. PRES'01. Chemical engineering transactions, 2001. Vol. 2. P. 95-98.

5. Yoon S.-G. Heat integration analysis for an industrial ethylbenzene plant using pinch analysis /S.-G. Yoon, J. Lee, S. Park // Applied Thermal Engineering. – 2007. V. 27. P. 886–893.
6. Товажнянський Л.Л. Екстракція даних для теплоенергетического інтегрування процесу первичної переробки нафти на установці АВТ А12/2 / Л.Л. Товажнянський, Л.М. Ульянов, Л.А. Мельниковська, Б.Д. Зулін // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2010. – №1. – с.53-64.
7. Смит Р. Основи інтеграції теплових процесів / Р. Смит, Й. Клемеш, Л.Л. Товажнянський, П.А. Капустенко, Л.М. Ульянов. – Харків: Издательский центр НТУ «ХПИ», 2000. – 457 с.
8. Молоканов Ю.К. Процессы и аппараты нефтегазопереработки / Ю.К. Молоканов. М.: Химия. 1980. – 408 с.
9. Степанов А.В. Ресурсоберегающая технология переработки нефти / Степанов А.В., Горюнов В.С. – Киев: Наукова думка. 1993. – 270 с.
10. Уильям Д. Леффлер. Переработка нефти / Уильям Д. Леффлер. М.: ЗАО «Олимп-Бизнес». 2004. – 223 с.
11. Товажнянський Л.Л. Інтеграція теплових процесів на установці первичної переробки нафти АВТ А12/2 при роботі в зимнєє время / Л.Л. Товажнянський, П.А. Капустенко, Л.М. Ульянов, С.А. Болдырев, М.В. Тарновський // Теорет. основи хім. технології. 2009. –Т. 43, –№6. – С. 665–676.
12. Nordman R. New process integration methods for heat-saving retrofit projects in industrial systems / R. Nordman. Thesis for the degree of doctor of philosophy. Chalmers university of technology.– Göteborg, Sweden –2005. – 77 p.

Bibliography (transliterated)

1. Bagirov I.T. Sovremennyye ustanovki pervichnoj pererabotki nefiti I.T. Bagirov. M.: Himija. 1974. – 240 p.
2. T. Nacuo. Mnogootraslevoj kompleks ob'edinjaet neftepererabotku s jenergeticheskoj i stroitel'noj promyshlennost'ju T. Nacuo, T. Jagi Neftegazovye tehnologii. – 2004. – #3. – p. 79-82.
3. Plesu V. Retrofit solutions in crude distillation plant using process simulation and process integration Plesu V., Bumbac G., Tacu-Marcov C., Ivanescu I., Popescu D.C. 8th Conference on process integration, modeling and optimization for energy saving and pollution reduction. PRES'05. Chemical engineering transactions, 2005. Vol. 7. P. 169-174.
4. Plesu V. HEN retrofit for a crude distillation unit-part 1 Plesu V., Bumbac G., Nan O. 1th Conference on process integration, modeling and optimization for energy saving and pollution reduction. PRES'01. Chemical engineering transactions, 2001. Vol. 2. P. 95-98.
5. Yoon S.-G. Heat integration analysis for an industrial ethylbenzene plant using pinch analysis S.-G. Yoon, J. Lee, S. Park Applied Thermal Engineering. – 2007. V. 27. P. 886–893.
6. Tovazhnjanskij L.L. Jekstrakcija dannyh dlja teplojenergetičeskogo integriruvanija processa pervichnoj pererabotki nefiti na ustanovke AVT A12 2 L.L. Tovazhnjanskij, L.M. Ul'ev, L.A. Mel'nikovskaja, B.D. Zulin Integrirovannyye tehnologii i jenergosberezhenie. – 2010. – #1. – p.53-64.
7. Smit R. Osnovy integracii teplovyh processov R. Smit, J. Klemesh, L.L. Tovazhnjanskij, P.A. Kapustenko, L.M. Ul'ev. – Har'kov: Izdatel'skij centr NTU «HPI», 2000. – 457 p.

8. Molokanov Ju.K. Processy i apparaty neftegazopererabotki Ju.K. Molo-kanov. M.: Himija. 1980. – 408 p.

9. Stepanov A.V. Resursosberegajushhaja tehnologija pererabotki nefti Stepanov A.V., Gorjunov V.S. – Kiev: Naukova dumka. 1993. – 270 p.

10. Uil'jam D. Leffler. Pererabotka nefti Uil'jam D. Leffler. M.: ZAO «Olimp-Biznes». 2004. – 223 p.

11. Tovazhnjanskij L.L. Integracija teplovyh processov na ustanovke pervich-noj pererabotki nefti AVT A12 2 pri rabote v zimnee vremja L.L. Tovazhnjanskij, P.A. Kapustenko, L.M. Ul'ev, S.A. Boldyrev, M.V. Tarnovskij Teoret. osnovy him. tehnologii. 2009. –Т. 43, –#6. – С. 665–676.

12. Nordman R. New process integration methods for heat-saving retrofit projects in industrial systems R. Nordman. Thesis for the degree of doctor of philosophy. Chalmers university of technology.– Göteborg, Sweden –2005. – 77 p.

УДК 658.26:665.63:338.45

Товажнянський Л.Л., Ульєв Л.М., Мельніковська Л.О., Зулін Б.Д.

**ТЕРМОДИНАМІЧНО ОБҐРУНТОВАНИЙ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧИЙ  
ПОТЕНЦІАЛ УСТАНОВКИ АВТ А12/2 В РЕЖИМІ РОБОТИ БЕЗ  
ВАКУУМНОГО БЛОКУ**

Застосування методів пінч-аналізу в інтеграції теплових процесів установки первинної переробки нафти АВТ А12/2 Херсонського НПЗ в режимі роботи без вакуумного блоку дозволить зменшити енергоспоживання на установці більш, ніж в 2 рази порівняно з рівнем споживання у теперішній час. Крім того, використання цих методів дозволить практично повністю відмовитись від використання холодних утиліт на установці. Річний прибуток від впровадження даного проекту складе величину 3387900 дол. США, а термін окупності проекту не перевищить 1 року.

Tovazshniansky L.L., Ulyev L.V., Melnikovska L.O., Zulin B.D.

**THERMODYNAMIC WELL GROUNDED ENERGY SAVING POTENTIAL OF  
AVDU A12/2 CRUDE DISTILLATION UNIT WITHOUT VACUUM COLUMN**

The energy saving potential for AVDU A12/2 crude distillation unit with working without vacuum column was defined. Pinch analysis methods use allows us to decrease the useful power which consuming by process at 78 % that is 34 MW. The cold utilities will disappear almost completely with pinch retrofit. Annual profit from implementing this project will be the value 3387900 USD and payback period will not exceed 1 year.

Анипко О.Б., Новиков А.И., Савченко В.А.

**О ВЛИЯНИИ ФАКТОРА УНОСА НА ТЕРМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ  
ОТЛОЖЕНИЙ НА ТЕПЛОПЕРЕДАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ  
ТЕПЛООБМЕННИКА**

Методы теплового и гидравлического расчета ПТА базируются на положениях гидродинамики и теплопередачи и хорошо отработаны. Поэтому расчет и выбор поверхности теплообмена для заданных значений расходов теплоносителей и температур не вызывают затруднений. Однако, расчетное значение теплопередающей поверхности, полученное на основании этих точных методов, может быть увеличено на 20–200 % на основе данных об эксплуатации с учетом отклонений и добавлению к термическому сопротивлению теплопередачи рекомендуемых констант термического сопротивления слоя отложений [2].

До настоящего времени данные о термическом сопротивлении отложений носили рекомендательный характер, были отрывочными, слабо систематизированными, не отображали особенностей теплопередающей поверхности и условий эксплуатации, а порой были противоречивыми [4,5]. Причем, это в равной степени относится и к самому распространенному теплоносителю – воде.

Эта проблема в равной степени относится к транспортным, энергетическим, технологическим ТА и теплообменникам коммунальной энергетики. Учитывая то, что уже на этапе расчета и выбора ПТА его поверхность может быть значительно увеличена для поддержания его характеристик при эксплуатации, в ходе самой эксплуатации, в результате отложений возрастают затраты мощности на прокачивание теплоносителей, изменяются температуры, что приводит к повышению капитальных затрат и эксплуатационных расходов (не говоря уже о выходе из строя ТА в виду закупорки каналов), исследования, направленные на разработку теоретических положений и практических рекомендаций по поддержанию околорасчетного значения теплопередачи при загрязнении теплопередающей поверхности представляются актуальными.

Модель процесса образования слоя отложений в общем виде для любых отложений можно представить в виде уравнения для изменения количества загрязняющей субстанции  $dm$  в течение времени  $d\tau$ , то есть  $\frac{dm}{d\tau}$ . С другой стороны, скорость прироста массы загрязняющей субстанции представляет собой результат двух конкурирующих эффектов – потока массы отложений  $\dot{m}_z(S, \tau)$  и потока массы отложений, уносимого теплоносителем  $\dot{m}_y(S, \tau)$  [1,2,3]. Таким образом

$$\frac{dm}{d\tau} = \dot{m}_z(S, \tau) - \dot{m}_y(S, \tau), \tag{1}$$

где  $S$  – отображает специфические условия переноса загрязняющей субстанции.

Масса загрязняющей субстанции в фиксирующий момент времени определяется как

$$m = \rho_3 F \delta_3. \quad (2)$$

Разделим левую и правую части выражения (1) на площадь теплопередающей поверхности  $F$ , в результате чего получили скорость прироста массы загрязняющей субстанции, отнесенную к единице площади теплопередающей поверхности

$$\frac{dm_F}{d\tau} = \left( \dot{m}_3 - \dot{m}_y \right)_F. \quad (3)$$

Учитывая определение термического сопротивления теплопроводности слоя отложений и выражение (2), массу загрязняющей субстанции, образующей отложения на единице теплопередающей поверхности представим как:

$$m_F = \rho \delta_3 = \rho \lambda_3 R_{3F}, \quad (4)$$

тогда,

$$\frac{dm_F}{d\tau} = \rho \lambda_3 \frac{dR_{3F}}{d\tau}. \quad (5)$$

Совместное рассмотрение выражений (3) и (5) позволяет записать

$$\frac{dR_{3F}}{d\tau} = \dot{R}_3 - \dot{R}_y. \quad (6)$$

Известны теоретические решения уравнений (3) и (6) полученные Эпштейном (1978) и Таборекком (1972) [3] и некоторыми другими авторами.

Однако, эти решения получены в предположении линейной зависимости  $R_{3F}$  от времени, а также при условии, что отложения всегда интенсивнее, чем унос. Причем авторами при решениях не использовались эмпирические данные о  $R_{3F}(\tau)$ , что, по-видимому, может быть объяснено невозможностью решения, в этом случае, в аналитическом виде.

Анализ полученной двухпараметрической зависимости для термического сопротивления отложений из воды  $R_3(w, \tau)$  в виде

$$R_3(\tau, w) = (3,74 - 3,075w) \cdot 10^{-6} \cdot \sqrt{\tau} \quad (7)$$

показывает, что в общем случае для двух фиксированных скоростей теплоносителя  $W_1$  и  $W_2$  в одном и том же ПТА термическое сопротивление слоя отложений в какой-либо фиксированный момент времени будет ниже при его работе на большей из двух скоростей теплоносителей на величину  $\Delta R$ , что иллюстрирует рисунок 1.

Из данных, приведенных на рисунке 1, следует, что в различные фиксированные моменты времени  $\Delta R$  – различны и определяются системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l|l} R_{32}^1 - R_{31}^1 = \Delta R_1; & \tau = \tau_1; \\ R_{32}^2 - R_{31}^2 = \Delta R_2; & \tau = \tau_2; \\ \hline R_{32}^n - R_{31}^n = \Delta R_n; & \tau = \tau_n. \end{array} \right. \quad (8)$$

Таким образом,  $\Delta R = f(\tau)$ .

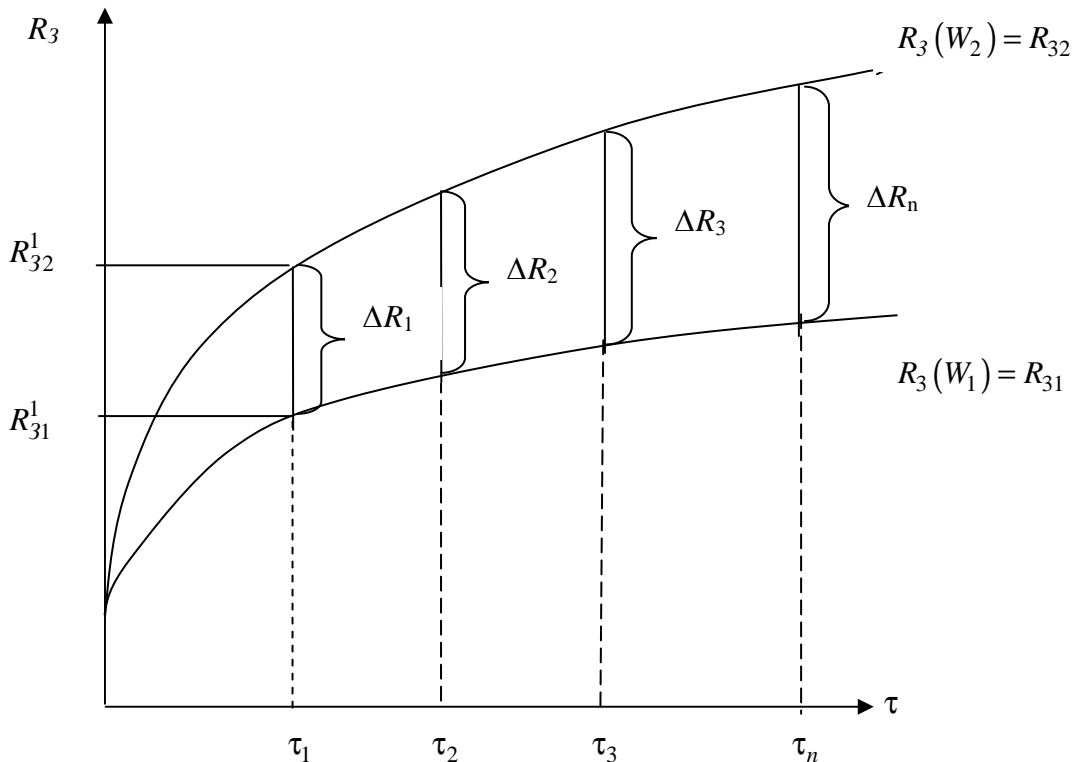


Рисунок 1 – К анализу влияния фактора уноса и образования слоя отложений

Можно предположить, что для принятых условий меньшее из двух термических сопротивлений  $R_{32}$  и  $R_{31}$  то, где скорость теплоносителя выше  $W_1 > W_2$ , и, таким образом, обусловлено влиянием уноса. Тогда  $\Delta R_{ii}(\tau)$  и представляет собой результат эффекта уноса.

Исходя из этого, и принимая во внимание, что

$$R_3(\tau, w) = c(w) \cdot \sqrt{\tau} \quad (9)$$

в общем виде эффект уноса можно представить в виде

$$\Delta R(\tau) = c(W_1) \sqrt{\tau} - c(W_2) \sqrt{\tau} = [c(W_1) - c(W_2)] \cdot \sqrt{\tau}. \quad (10)$$

Или с учетом (7) для ПТА



$$\Delta R_{ПТА}(\tau) = 3,075 \cdot 10^{-6} (W_1 - W_2) \cdot \sqrt{\tau} = 3,075 \cdot 10^{-6} \Delta W \cdot \sqrt{\tau}, \quad (11)$$

где  $\Delta W = W_2 - W_1$ .

Таким образом можно заключить, что эффект уноса является относительной величиной и показывает, на сколько меньше в фиксированный момент времени эксплуатации ПТА термическое сопротивление слоя отложений при одной скорости теплоносителя ( $W_1$ ) будет ниже, чем при другой ( $W_2$ ). Это, в свою очередь позволяет, путем повышения скорости увеличивать унос, и, тем самым, управлять процессом изменения термического сопротивления загрязнений при эксплуатации ПТА, достигая требуемых межсервисных интервалов.

#### Литература

1. Анипко О.Б. Рациональные теплообменные поверхности. Харьков: ХВУ., 1998. 197 с.
2. Анипко Б.В. Проблема загрязнения теплообменных устройств и прогнозная оценка их термического сопротивления теплопередаче. Препринт ИПМаш АН УССР. Харьков, 1987 г.
3. Shan R.K. Dušan P. Sehulič. Fundamentals of Heat Exchanger Design. Wiley. New York. 2004. p. 876.
4. Fouling of Heat Exchanger surfaces. / Editor Richard W. Bryers. Pennsylvania. USA. 1982.
5. Understanding Heat Exchanger Fouling and Its Mitigation / Editor T.R. Bott. University of Birmingham. U.K., 1997.

#### Bibliography (transliterated)

1. Anipko O.B. Racional'nye teploobmennye poverhnosti. Har'kov: HVU., 1998. 197 p.
2. Anipko B.V. Problema zagrjaznenija teploobmennyh ustrojstv i prognoznoj ocenka ih termicheskogo soprotivlenija teploperedache. Preprint IPMash AN USSR. Har'kov, 1987 y.
3. Shan R.K. Dušan P. Sehulič. Fundamentals of Heat Exchanger Design. Wiley. New York. 2004. p. 876.
4. Fouling of Heat Exchanger surfaces. Editor Richard W. Bryers. Pennsylvania. USA. 1982.
5. Understanding Heat Exchanger Fouling and Its Mitigation Editor T.R. Bott. University of Birmingham. U.K., 1997.

УДК 621.165

Аніпко О.Б., Новіков А.І., Савченко В.А.

#### **ПРО ВПЛИВ ФАКТОРА ВІДНЕСЕННЯ НА ТЕРМІЧНИЙ ОПІР ВІДКЛАДЕНЬ НА ПОВЕРХНІ ТЕПЛООБМІННИКА**

У роботі отримано закономірності зміни термічного опору відкладень від часу та швидкості теплоносія.

Anipko O.B, Novikov A.I., Savchenko V.A.

**ABOUT INFLUENCE OF THE FACTOR OF ABLATION ON THERMAL  
RESISTANCE OF ADJOURNMENT ON THE HEAT-TRANSMITTING SURFACE  
OF THE HEAT EXCHANGER**

In work laws of change of thermal resistance of a layer of adjournment from time and speed of the heat-carrier are received.

Черкашенко М.В., Крутиков Г.А.

## СИНТЕЗ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ ПНЕВМОАГРЕГАТОВ

**Введение.** Практика использования дискретных пневмоагрегатов (ПА) при механизации и автоматизации производственных процессов в настоящее время выдвигает два требования к ПА: расширение области использования таких пневмоагрегатов в сторону значительно больших инерционных нагрузок и всемерное сокращение непроизводительных энергозатрат.

**Постановка задачи.** Традиционные способы торможения (управления) рабочими органами таких пневмоагрегатов – дроссельное, емкостное торможение, использование пневмо-гидродемпферов оказались мало пригодными при решении этих проблем и, к тому же, плохо стыковались с современным компьютерным управлением.

В наибольшей степени таким требованиям отвечают способы торможения, основанные на изменении структуры коммутационных связей [1]. При таком подходе ПА рассматривается как система переменной структуры (СПС) и требуемые характеристики ПА достигаются за счет рационально подобранной последовательности подключения полостей пневмодвигателя к разным объектам коммутации в процессе движения рабочего органа (РО).

**Основные положения исследования.** При выборе энергосберегающей структуры ПА в качестве потребленной энергии будем использовать работоспособность сжатого воздуха, т.е. максимальную полезную работу, которую можно получить от термодинамической системы в результате обратимого перехода её к состоянию равновесия с окружающей средой [2]. Можно показать, что если в ресивере и холодильнике компрессора сжатый воздух приходит в термическое равновесие с окружающей средой, то удельная работоспособность (эксергия) потока сжатого воздуха определяется только изотермической работой компрессора в идеальном цикле [3].

$$l_p = R \cdot T_m \cdot \ln \frac{p_m}{p_a} = R \cdot T_m \cdot \ln \frac{1}{\sigma_a}, \quad (1)$$

где  $\sigma_a = p_a/p_m$  – безразмерное атмосферное давление;  $p_m, T_m$  – параметры сжатого воздуха в питающей ПА магистрали.

Одним из наиболее важных преимуществ схем с торможением путем изменения структуры коммутационных связей является возможность рационального использования работоспособности сжатого воздуха и, следовательно, существенного повышения энергетических характеристик ПА.

Общими требованиями к такому ПА должны быть: неполное заполнение рабочего объема в процессе разгона и торможения, а также использование энергии торможения в виде рекуперации в сеть сжатого воздуха из тормозной полости. Действительно, удельная работоспособность поступающего воздуха состоит из двух компонент: работы проталкивания (транзитная работоспособность) и работы изотермического расширения [4].

$$l_p = R \cdot T_M \cdot \ln \frac{p_M}{p_a} = U + \frac{R \cdot T_M}{p_M} \cdot (p_M - p_a) \quad (2)$$

где  $\frac{R \cdot T_M}{p_M} \cdot (p_M - p_a)$  – транзитная работоспособность,  $U$  – потенциальная энергия сжатия (расширения).

Если сжатый воздух в течение всего процесса срабатывания поступает в рабочую полость (классическая схема использования ПА), то используется только транзитная работоспособность, когда сжатый воздух выступает как кинематическое звено, связывающее компрессор и рабочую полость ПА.

Если в режиме торможения поступление сжатого воздуха отсекается (неполное заполнение рабочей полости), то используется и вторая составляющая работоспособности – энергия сжатия  $U$ .

В качестве базовой схемы рассмотрим схему на рис. 1. Именно эта схема с программой управления, изложенной в таблице, рекомендуется рядом авторов для торможения пневмоагрегатов с большой инерционной нагрузкой [5].

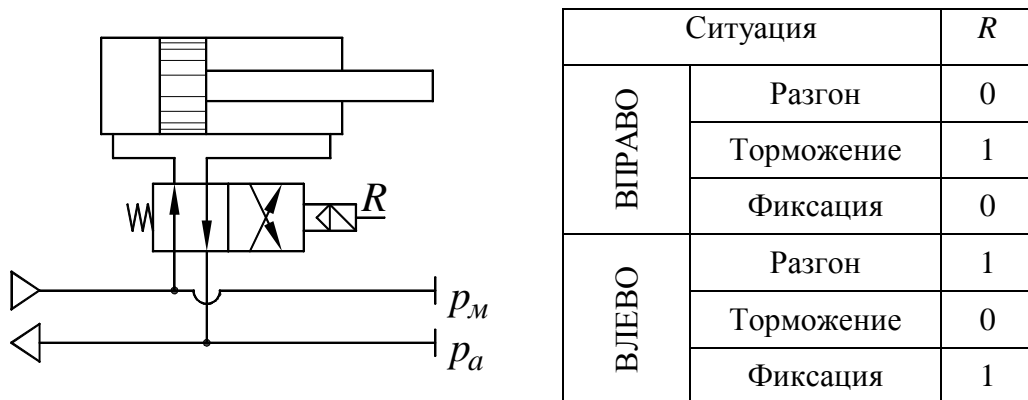


Рисунок 1 – Элементарная (базовая) схема (№ 1) ПА с торможением путем изменения структуры коммутационных связей

Анализ потерь работоспособности сжатого воздуха проведем, опираясь на математическую модель ПА в безразмерной форме. Основными критериями динамического подобия здесь будут  $\beta$  и  $\chi$ .

$$\beta = \frac{m \cdot L}{t_0^2 \cdot F_1 \cdot p_M} \text{ – критерий инерционности (безразмерная масса), равный отношению си-}$$

лы инерции при базовом ускорении  $L/t_0^2$  к максимальной (индикаторной) силе, развиваемой поршнем,  $L$  – полный ход РО,  $F_1$  – площадь поршня со стороны рабочей полости,  $m$  – масса;  $t_0$  – базовая единица времени.

$$\chi = \frac{P}{p_M \cdot F_1} \text{ – параметры нагрузки; } t_0 = \frac{F_1 \cdot L}{f_1^3 \cdot a_M} \text{ – базовая единица времени, численно}$$

равная времени заполнения рабочего объема  $F_1 L$  несжимаемой средой, движущейся через отверстие, равное эффективной площади впускного тракта  $f_1^3$ , со скоростью зву-

ка  $a_m = \sqrt{k \cdot R \cdot T_m}$ , где  $T_m$  – абсолютная температура сжатого воздуха в питающей магистрали.

При расчете энергозатрат также использовалась безразмерная форма, причем, в качестве базовой единицы бралась работа поршня, развивающего индикаторную силу  $p_m F_1$ , на пути  $L$ , т.е.  $F_1 L p_m$ . При расчете затрат сжатого воздуха массовое количество воздуха относилось к массовому количеству сжатого воздуха при параметрах в питающей магистрали, необходимому для заполнения рабочего объема пневмоцилиндра, т.е.

$$E = \frac{E_{\text{разм}}}{F_1 \cdot L \cdot p_m}; \quad \bar{M} = \frac{M \cdot R \cdot T_m}{F_1 \cdot L \cdot p_m}, \quad (3)$$

где  $E$ ,  $\bar{M}$  – безразмерные значения энергии и массы воздуха.

Баланс энергозатрат для ПА работающего по схеме №1 (рис. 1) представлен на рис. 2 в виде круговой диаграммы. Расчет получен на ЭВМ при  $\beta = 5$  и  $\chi = 0,1$ .

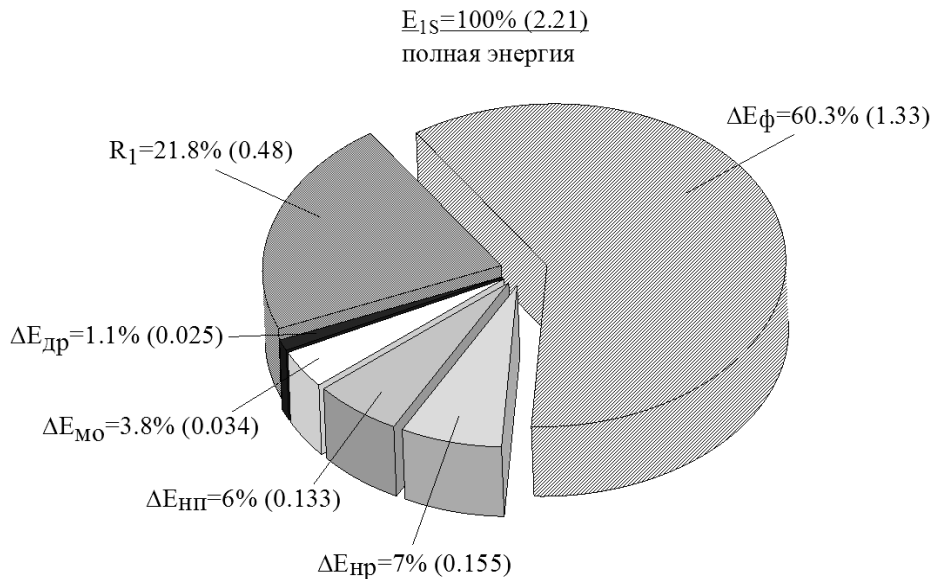


Рисунок 2 – Процентная диаграмма энергопотерь сжатого воздуха в рабочей полости (схема № 1)

Здесь  $E_{1S}$  – работоспособность сжатого воздуха, потребленного ПА в процессе одного срабатывания,  $R_1$  – внешняя механическая работа, производимая воздухом в рабочей полости,  $\Delta E_{\text{др}}$  – потери работоспособности, связанные с дросселированием,  $\Delta E_{\text{мо}}$  – потери в мертвом объеме пневмоцилиндра,  $\Delta E_{\text{нр}}$  – потери, связанные с неполнотой расширения воздуха,  $\Delta E_{\text{нп}}$  – потери, обусловленные несоответствием фактического показателя расширения идеальному,  $\Delta E_{\text{ф}}$  – потери работоспособности сжатого воздуха, связанные с фиксацией поршня в конечном положении.

Большие непроизводительные потери в данном случае связаны с чрезмерной простотой аппаратной реализации, когда у ПА, имеющего три фазы движения вперед и три фазы движения назад существуют всего две коммутационные ситуации.

Анализ непроизводительных энергозатрат позволяет сформировать принцип синтеза энергосберегающей схемы ПА, который заключается в том, что каждой фазе движения должны соответствовать наиболее оптимальные с точки зрения энергосбережения и максимального быстродействия коммутационные ситуации. Представим их в виде таблицы (табл. 1).

Настройка давления редукционного клапана РК ( $p_K$ ) должна выбираться минимально необходимой для удержания РО в конечном положении (фиксации).

Таблица 1

	Движение вправо	Движение влево
Фиксация левого положения		
Разгон		
Торможение		
Фиксация правого положения		

Для построения оптимальной схемы воспользуемся методом безраздельной декомпозиции [6], а именно, синтезом многовыходных схем [7–9].

Из требований к ПА, сформированных в виде табл. 1 следует, что движение штока влево и вправо требует 6 состояний системы (разгон, торможение, фиксация). Построим таблицу состояний. Число строк таблицы вычисляется по формуле  $m = 2^n$ , где  $n$  – число основных входов. Следовательно,  $n = \log_2 m$ .

Если для 6-ти состояний  $m = 6$ , то округляя до целого числа получаем  $n = 3$ . Число столбцов таблицы состояний  $k = n + 3 + |y|$ , где  $|y| = 2$  – число выходов (поршневая и штоковая полости цилиндра), а 3 – входные сигналы от разных уровней давлений:  $p_M$  (магистраль),  $p_K$  (пониженное давления с выхода редукционного клапана),  $p_a$  (атмосферное давление).

Таблица состояний (табл. 2) отражает эти требования в формализованном виде. В столбцах этой таблицы при подаче сигналов  $p_m$ ,  $p_k$  и  $p_a$  индексом «-» обозначается закрытие линии. В табл. 2 из всех возможных комбинаций исключены две строки (при  $R = 0$ ,  $T_1 = 1$ ,  $T_2 = 1$ ), а также (при  $R = 1$ ,  $T_1 = 1$ ,  $T_2 = 1$ ), т.к. одновременная подача двух управляющих сигналов  $T_1 = T_2 = 1$  исключена.

Таблица 2

Операции		Входные сигналы						Выходные сигналы	
		$R$	$T_1$	$T_2$	$p_m$	$p_k$	$p_a$	$y_1$	$y_2$
Движение Вправо	Разгон	0	1	0	1	-	1	0	1
	Торможение	0	0	1	-	1	-	0	1
	Фиксация	0	0	0	-	1	1	0	1
Движение Влево	Разгон	1	1	0	1	-	-	1	0
	Торможение	1	0	1	-	1	-	1	0
	Фиксация	1	0	0	-	1	-	1	0

Из таблицы состояний (табл. 2) для выхода  $\bar{y}_1 = 1$  (движение влево) можно составить следующее уравнение:

$$y_1 = RT_1\bar{T}_2p_m + R\bar{T}_1T_2p_k + R\bar{T}_1\bar{T}_2p_k. \quad (4)$$

В уравнении (4) можно вынести за скобки сначала  $R\bar{T}_1p_k$ , а затем  $R$ , т.к., приняв  $\bar{T}_2 + T_2 = 1$ , получим уравнение:

$$y_1 = R(T_1\bar{T}_2p_m + \bar{T}_1p_k). \quad (5)$$

Из табл. 2 для выхода  $y_2 = 1$  (движение вправо) можно составить уравнение:

$$y_2 = \bar{R}T_2\bar{T}_2p_m p_a + \bar{R}\bar{T}_1T_2p_k + \bar{R}\bar{T}_1\bar{T}_2p_k p_a. \quad (6)$$

При оперировании избыточными (манометрическими) давлениями ( $p_a = 0$ ) первый и третий член в уравнении 6 становятся равными нулю.

Поэтому

$$y_2 = \bar{R}\bar{T}_1T_2p_k. \quad (7)$$

Таким образом, объединяя (5) и (6) получим систему уравнений:

$$\begin{cases} y_1 = R(T_1\bar{T}_2 p_M + \bar{T}_1 p_K); \\ y_2 = \bar{R}\bar{T}_1 T_2 p_K. \end{cases} \quad (8)$$

Введем внутренние переменные  $y'''$  до обратного клапана и  $y''$  после обратного клапана (рис. 3). Тогда систему уравнений (8) можно представить в виде



$$\begin{cases} y_1 = R y' \\ y_2 = \bar{R} y'' \end{cases} \quad (9)$$

Рисунок 3 – Введение внутренних переменных

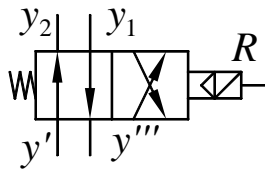


Рисунок 4 – Схема реализации системы уравнений (9)

В данном случае  $y''' = 0$  (рис. 3), поэтому реализация системы уравнений (9) возможна с помощью четырехлинейного (рис. 4) или пятилинейного распределителя [7]. Если обозначить  $y' = T_1\bar{T}_2 p_M + \bar{T}_1 p_K$ , а  $y'' = \bar{T}_1 T_2 p_K$ , то система уравнений

$$\begin{cases} y' = T_1\bar{T}_2 p_M + \bar{T}_1 p_K \\ y'' = \bar{T}_1 T_2 p_K \end{cases}$$

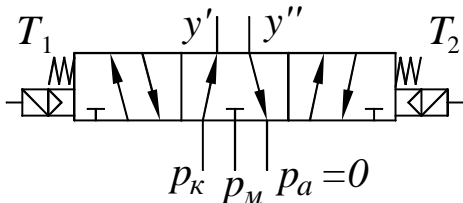


Рисунок 5 – Реализация системы уравнений  $y'$  и  $y''$

реализуется по известной схеме с использованием пятилинейного трехпозиционного распределителя [7] (рис. 5).

Проводя композицию схем на рис. 3–5 получим энергосберегающую схему (схема № 2), которая удовлетворяет условиям табл. 1 и содержащую минимальное число пневмоаппаратов (рис. 6).

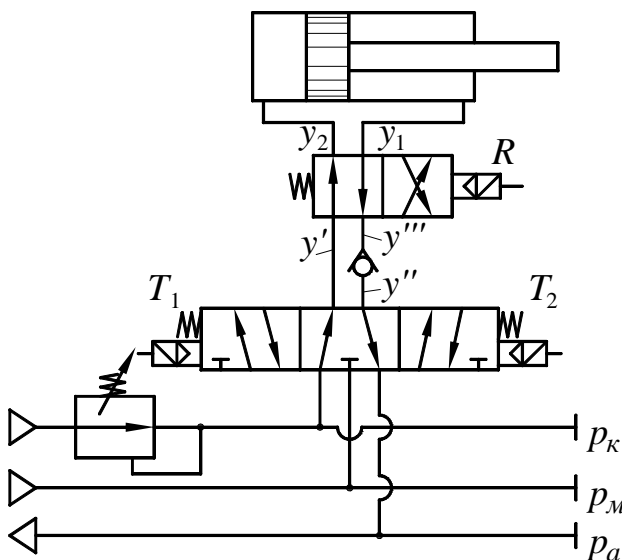


Рисунок 6 – Энергосберегающая структура ПА (схема № 2)

Ситуация		$R$	$T_1$	$T_2$
Вправо	Разгон	0	1	0
	Торможение	0	0	1
	Фиксация	0	0	0
Влево	Разгон	1	1	0
	Торможение	1	0	1
	Фиксация	1	0	0



Процентная диаграмма баланса энергозатрат для схемы №2 (рис. 7), полученная при тех же условиях функционирования, что и для схемы №1, свидетельствует о существенном снижении непроизводительных энергозатрат при одновременном увеличении быстродействия при переходе от схемы №1 к схеме №2.

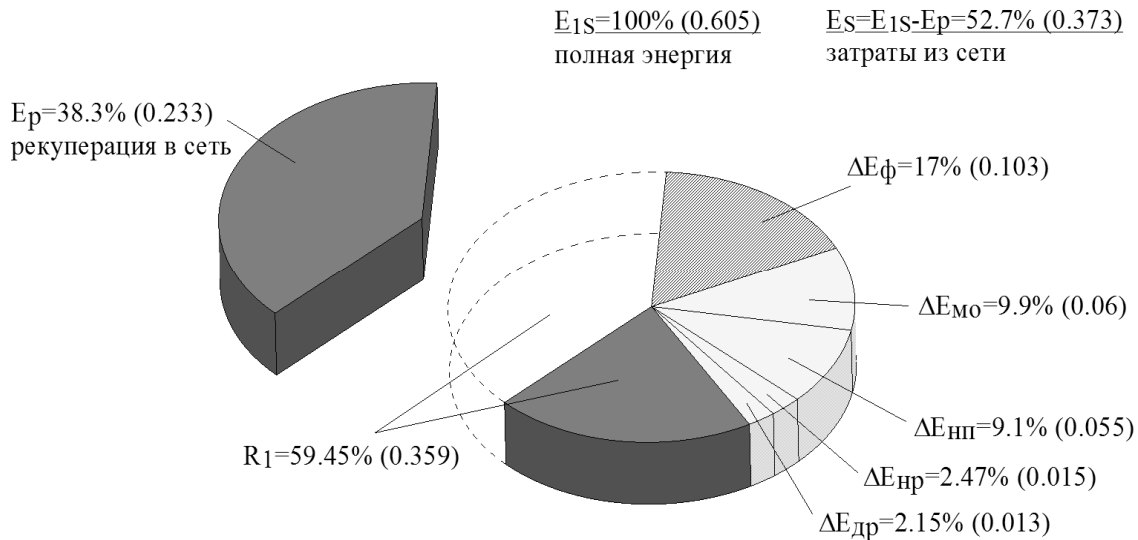


Рисунок 7 – Процентная диаграмма энергопотерь сжатого воздуха в рабочей полости (схема № 3)

В отличие от предыдущего случая наибольшая часть энергии сжатого воздуха, расходуется на совершение внешней работы газа ( $R_1$ ). Внешняя работа газа в рабочей полости, к тому же, существенно ниже в абсолютном выражении, чем в предыдущем случае, за счет уменьшения работы выталкивания сжатого воздуха из выхлопной полости, т.к. уровень противодействия у схемы №2, значительно ниже, чем у ПА со схемой №1.

Преимущество схемы №2 заключается еще и в том, что она позволяет создавать *регулируемый и контролируемый импульс тормозного давления*. В некоторых случаях целесообразно повышать давление настройки редуцирующего клапана с тем, чтобы уменьшить перепад давления при торможении, т.е. получить растянутый импульс тормозного давления. Это обеспечивает равнозамедленный режим торможения с небольшим отрицательным ускорением.

Особенности структуры и функционирования ПА, работающего по схеме № 2, которые обеспечивают существенное снижение энергозатрат и повышение его быстродействия, следующие:

1. В фазе разгона из-за малого противодействия РО ПА разгоняется быстрее, подготовительный период практически отсутствует. Поэтому, несмотря на увеличение сопротивлений линий, связанного с установкой дополнительных пневмоаппаратов, быстродействие ПА увеличивается. Из-за уменьшения работы выталкивания из выхлопной полости уменьшается и внешняя механическая работа газа в рабочей полости. При этом возрастает необходимый тормозной путь, т.е. момент перекрытия подачи воздуха в рабочую полость наступает раньше, и потребленная масса сжатого воздуха уменьшается.

2. Если в фазе разгона используется в основном транзитная работоспособность сжатого воздуха (работа проталкивания), когда воздух выступает лишь как связующее кинематическое звено между компрессором и пневмоцилиндром, то в фазе торможения для совершения внешней механической работы используется потенциальная работа сжатия (расширения). Чем длиннее фаза торможения, тем полнее используется энергия расширения. Тормозной эффект создается за счет одновременного падения давления в рабочей полости и роста давления в тормозной полости. При достижении давления в тормозной полости давления магистрали происходит рекуперация сжатого воздуха в сеть. При падении давления в рабочей полости в фазе торможения ниже давления настройки редуционного клапана он открывается и поддерживает постоянное давление. Энергию сжатого воздуха, поданную через редуционный клапан, можно расценивать как энергозатраты на фиксацию и они во многом раз меньше, чем для схемы №1.

3. В фазе фиксации сжатый воздух удаляется из выхлопной (тормозной) полости, а рабочая полость остается под давлением  $p_k$ , т.е. её состояние не меняется.

Естественно, что далеко не при всех условиях функционирования, схема №2 дает большой эффект снижения непроизводительных энергозатрат. Использование безразмерных критериев динамического подобия  $\beta$  и  $\chi$  позволяет охватить при расчетах на ЭВМ достаточно большую область существования ПА, ограничившись сравнительно небольшими затратами машинного времени. Обработка результатов расчета на ЭВМ позволяет определить область рационального использования энергосберегающей схемы ПА в пространстве параметров  $\beta$  и  $\chi$ .

Наиболее существенное снижение энергозатрат достигается при  $\chi = 0 \div 0.15$ , а при  $\chi = 0.15 \div 0.3$  снижение существенно лишь при большой инерционной нагрузке ( $\beta = 2 \div 5$ ). При больших значениях  $\chi$  ( $\chi > 0,3$ ) и малых значениях  $\beta$  ( $\beta < 0,5$ ) использование ПА с энергосберегающей структурой становится нецелесообразным, т.к. не приводит к заметному снижению энергозатрат.

Выделение области рационального использования энергосберегающей схемы №2 в плоскости параметров  $\beta$  и  $\chi$  (рис. 8) позволяет решить и вторую задачу синтеза – выбор наиболее приемлемого диаметра пневмоцилиндра, обеспечивающего безусловную целесообразность использования энергосберегающей схемы.

Исходя из размеров этой области, т.е.  $0 \leq \chi \leq 0.15$  и  $2 \leq \beta \leq 5$  (площадь  $S_{abcd}$  на рис. 8) выбор диаметра пневмоцилиндра  $D$  при заданной статической ( $P$ ) и массовой нагрузке ( $m$ ), а также при известных значениях давления питания  $p_M$  и длины хода РО ( $L$ ) производится исходя из следующих неравенств:

$$\sqrt{\frac{4}{\pi} \sqrt[3]{\frac{m \cdot f_1^3 \cdot k \cdot R \cdot T_M}{2 \cdot L \cdot p_M}}} \geq D \geq \sqrt{\frac{4P}{0,15 \cdot \pi \cdot p_M}}. \quad (10)$$

Например, при  $L = 0.5$  м,  $p_M = 0.5$  МПа,  $f_1^3 = 0.6 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup>,  $T_M = 293^\circ$  К,  $m = 1000$  кг и  $P = 500$  Н наиболее рациональным будет пневмоцилиндр с  $D = 100$  мм.

**Выводы.** Постановка и успешное решение задачи многократного снижения энергозатрат за счет оптимизации структуры и параметров дискретного пневмоагрегата свидетельствует о больших возможностях программы всемерного снижения энергоза-

трат сжатого воздуха в промышленности. Учитывая, что на долю этого энергоносителя приходится до 10 % в энергетическом балансе промышленно развитых стран, целенаправленная реализация такой программы несомненно даст большой экономический эффект.

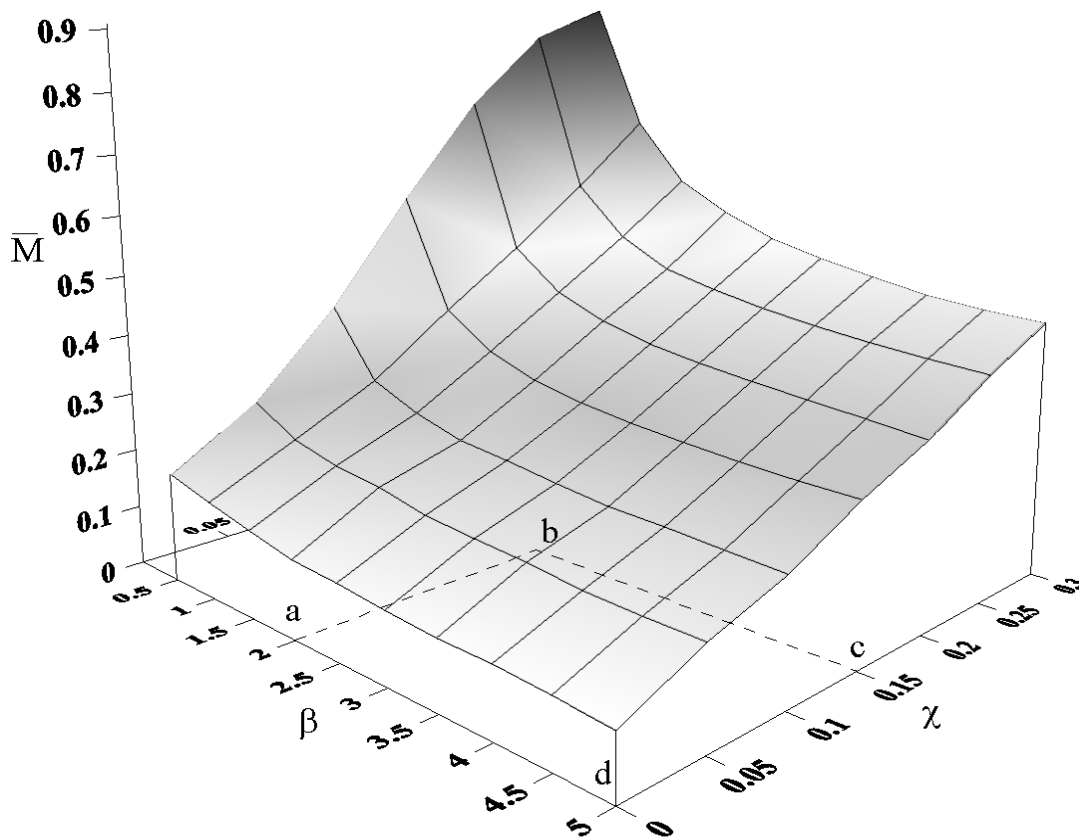


Рисунок 8 – Определение области рационального использования ПА с энергосберегающей схемой №2

### Литература

1. Крутиков Г.А., Кудрявцев А.И., Пекарь Л.А. К вопросу выбора способа торможения пневмоприводов с большими присоединёнными массами // Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления. – М.: Машиностроение. – 1987 – вып. 13 – с. 51–58.
2. Термодинамика. Терминология.-вып. 85. – М.: Наука, 1973. – 197 с.
3. Цейтлин Ю.А., Мурзин В.А. Пневматические установки шахт. – М: Недра, 1991. – 268 с.
4. Логов И.Л. Пневматические насосы. – М: Машгиз, 1972. – 243 с.
5. Зорин А.С., Пашков В.М., Солнцева К.С. Исследование торможения пневмопривода противодавлением // Пневматика и гидравлика. Приводы и системы управления. – М.: Машиностроение. 1990. – Вып. 15. – с. 68–72.
6. Cherkashenko M. Synthesis of schemes of hydraulic and pneumatic automation //5 International Fluid Power Symposium in Aachen, Germany. 20–22 March.– 2006. – Fundamentals – The report №1. – P. 147–154.

7. Черкашенко М.В. Анализ многовыходных схем гидропневмоавтоматики //Интегровані технології та енергозбереження. – 2006. – №1. – С.115–119.
8. Cherkashenko M. Computer – aided design of diskret control fluid pover system // 2 Internationales Fluidtechnishes colloquium. Germany. 16–17 marz.– 2000. Band 1. – P. 495–500.
9. Cherkashenko M. and etc. Synthesis of discrete control systems of industrial robots //Automation and Remote Control (USA). – 1981.– №5.– P. 148–153.

Bibliography (transliterated)

1. Krutikov G.A., Kudrjavcev A.I., Pekar' L.A. К вопросу выбора способа торможения пневмоприводов с большими присоединяемыми массами Пневматика і гидравлика. Приводы і системи управління. – М.: Mashinostroenie. – 1987 – вып. 13 – с. 51–58.
2. Термодинамика. Терминология.-вып. 85. – М.: Наука, 1973. – 197 p.
3. Cejtin Ju.A., Murzin V.A. Pnevmaticheskie ustanovki shaht. – М: Nedra, 1991. – 268 p.
4. Logov I.L. Pnevmaticheskie nasosy. – М: Mashgiz, 1972. – 243 p.
5. Zorin A.S., Pashkov V.M., Solnceva K.S. Issledovanie tormozhenija pnevmoprivoda protivodavleniem Пневматика і гидравлика. Приводы і системи управління. – М.: Mashinostroenie. 1990. – Вып. 15. – p. 68–72.
6. Cherkashenko M. Synthesis of schemes of hydraulic and pneumatic automation 5 International Fluid Power Symposium in Aachen, Germany. 20–22 March.– 2006. – Fundamentals – The report #1. – P. 147–154.
7. Cherkashenko M.V. Analiz mnogovyhodnyh shem gidropnevmoavtomatiki Integrovani tehnologii ta energozberezhennja. – 2006. – #1. – p.115–119.
8. Cherkashenko M. Computer – aided design of diskret control fluid pover system 2 Internationales Fluidtechnishes colloquium. Germany. 16–17 marz.– 2000. Band 1. – P. 495–500.
9. Cherkashenko M. and etc. Synthesis of discrete control systems of industrial robots Automation and Remote Control (USA). – 1981.– #5.– P. 148–153.

УДК 621.05

Черкашенко М.В., Крутиков Г.А.

**СИНТЕЗ СТРУКТУРИ Й ПАРАМЕТРІВ ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧОГО ПНЕВМОАГРЕГАТУ**

На основі аналізу втрат працездатності стисненого повітря в типовій схемі пневмоагрегату, сформульовані вимоги до енергозберігаючої схеми, яку можна реалізувати при використанні гальмування робочого органу пневмоагрегату шляхом зміни структури комутаційних зв'язків. На основі застосування методу безроздільної декомпозиції отримана енергозберігаюча схема пневмоагрегату. Крім того, визначена область раціонального використання енергозберігаючої схеми в просторі критеріїв динамічної подоби й запропоновані розрахункові формули для вибору діаметру пневмоциліндра такого пневмоагрегату.

Cherkashenko M.V., Krutikov G.A.

**SYNTHESIS OF STRUCTURE AND PARAMETERS OF THE ENERGO-SAVING UP PNEUMOAGGREGATE**

On the basis of the analysis of working capacity losses of compressed air in the standard circuit design of the pneumoaggregate, demands to the energo-saving up circuit design which can be realised at use of a retardation of the tool of the pneumoaggregate by change of structure of switching links are formulated. On the basis of application of an undivided decomposition method, the energo-saving up circuit design of the pneumoaggregate is gained. The area of intelligent use of the energo-saving up circuit design in space of criteria of dynamic similitude is besides, defined and calculate formulas for sampling of diameter of the pneumocylinder of such pneumoaggregate are offered.

Болух В.Ф., Назаренко С.А.

## **СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УДАРНОГО ДЕЙСТВИЯ**

**Общий подход к мультидисциплинарной оптимизации.** Как показывает опыт проектирования, наличие математических моделей не является достаточным условием успешной реализации сложных устройств. Одним из путей решения представляется интеграция математических моделей с такими поисковыми методами, которые бы давали ряд альтернативных технических решений, неуплучшаемых по всей совокупности показателей эффективности. Для решаемой задачи необходимо использовать мультидисциплинарные модели со своими критериями качества [1]. При разработке системного подхода к оптимизации сложных устройств необходимо учитывать этапы жизненного цикла, сочетать принципы композиции, декомпозиции и иерархичности, обеспечивать взаимосвязь математических, эвристических и экспериментальных методов.

Задача оптимизации устройства заключается в нахождении варьируемых параметров, принадлежащих допустимой области  $U$  и минимизирующих целевую функцию. Целевая функция представляет суперпозицию критериев качества с весовыми функциями, использующих неопределенные множители Лагранжа. На проектные переменные могут накладываться как явные двусторонние ограничения, задаваемые из конструктивно-технологических соображений, так и функциональные ограничения типа равенств и неравенств, наложенные на функционалы, неявным образом сужающие поисковую область. Значения функционалов определяются из решения задач анализа, описываемых уравнениями состояния. Структуру уравнений, характеризующих математические связи между заданными  $h$  и искомыми величинами, определяет тип исследуемого процесса, состав системы, граничные условия, нагрузки и условия сопряжения. Вектор переменных состояния, образующих пространство решений, может определять перемещения, температуры, потенциалы электрического и магнитного поля и др. Выбор класса переменных (непрерывные функции, кусочно-непрерывные функции, вектор дискретных параметров) во многом определяет метод оптимизации и оптимальное решение.

Математические модели сложных устройств должны учитывать взаимодействие элементов разной мерности многокомпонентной структуры в условиях действия полей разной физической природы. Задача анализа сводится к решению систем дифференциальных уравнений в частных производных.

Основные уравнения для изменяющихся во времени процессов могут быть получены из обобщенного вариационного принципа Гамильтона-Остроградского, составляющие которого кинетическая энергия, потенциальная энергия (является наиболее важной энергетической характеристикой, выраженной через компоненты выбранного пространства состояний), работа приложенных сил. Вариационные методы приводят к матричной алгебраической задаче и служат основой для построения расчетных схем.

Связанные задачи теории поля сводятся к системе уравнений, решаемых методом конечных элементов.

Предполагается, что связь между подсистемами каждого поля однозначна, алгоритмизируема и корректна, что дает возможность формализовать процесс анализа и синтеза. Моделирование структурными уравнениями, ориентированными на конкретный тип полей, может включать большое количество методов с применением апробированных CAD/CAM/CAE-систем. Применение математического обобщения, реализуемого в едином информационном пространстве устройства, приведет к повышению точности расчетов, минимизации затрат времени на подготовку модели и трансляции промежуточных данных.

**Основные этапы мультидисциплинарной оптимизации.** Для полных моделей устройств решать задачу оптимизации математически строго не позволяют противоречивость критериев, большое число разнополевых переменных, неформализуемость ряда ограничений, различная точность и детерминированность моделей, требования унификации. Поэтому основной концепцией проектирования сложных устройств представляется многоуровневый иерархический подход, при котором результаты предыдущего уровня используются в качестве исходных данных для последующего. Построение системы уровней осуществляется методом экспертных оценок. Характер критериев зависит от уровня проектирования. На верхних уровнях это, как правило, стоимостные, а на нижних – разнородные технические показатели.

Конструктивные параметры разделяются на группы, варьируемые на каждом этапе с целью выбора соответствующих функционалов. Параметры  $h_0$  определяются из решения задачи более высокого уровня. Предварительный анализ распределения коэффициентов чувствительностей позволяет разделить параметры по степени влияния на величины целевых функций. На первом этапе решается задача оптимизации параметров  $h_1$  по критериям и функциональным ограничениям, характеризующим рабочий процесс. На втором этапе производится выбор параметров  $h_2$ , определяющих прочностные и вибрационные характеристики. На третьем этапе варьируются параметры "смешанного" типа  $h_{12}$ , влияние которых на рабочие и прочностные характеристики соизмеримо.

Введем категории задач мультидисциплинарной оптимизации: последовательная (при независимом рассмотрении 1 и 2 этапов); полная (при наличии только 3 этапа и увеличении размерности и ширины системы разрешающих уравнений; весь набор оптимальных параметров достигается за одну итерацию); слабосвязанная (при этом выполняются итерации между различными этапами до тех пор, пока не будет достигнут желаемый уровень сходимости). После «сшивания» подмоделей формируется иерархическая система мультидисциплинарной оптимизации.

Для численной реализации задачи снижение времени может достигаться как за счет распараллеливания вычислений "внутри" математической модели, так и за счет организации процесса оптимизации, когда осуществляется параллельный расчет критериев для заданного набора векторов варьируемых переменных. Первый путь предполагает использование математических моделей, приспособленных для расчета с использованием параллельных процессоров. Второй путь вызывает необходимость разработки соответствующих методов оптимизации, позволяющими связать в едином проекте за-

дачи, рассчитываемые различными программными средствами на различных процессах, объединенных в локальную сеть.

Анализ чувствительности представляет информацию о направлении и скорости изменения функционалов качества конструкций при изменении варьируемых параметров без модификации всей модели [2]. Переменные проектирования можно разделить на глобальные параметры, описывающие конструкцию в целом, и локальные, описывающие геометрические и физические параметры части конструкции.

При выборе варьируемых параметров необходимо учитывать: требование взаимной независимости, преимущества аддитивного и локального характера зависимости гамильтониана от проектных переменных; согласование дискретизации конструкции со схемой варьирования ее формы; конструктивные ограничения; сохранение в пространстве допустимых параметров математических моделей и др.

Методы поиска оптимальных технических решений можно разделить на следующие группы: алгоритмы, основанные на априорных представлениях о свойствах устройства; методы математического программирования; методы, использующие условия глобальной и локальной оптимальности.

Стратегия нахождения минимума целевой функции в поисковом пространстве заключается в совместном использовании глобального метода оптимизации, осуществляющего случайный поиск параметров в заданном пространстве, предотвращая попадание в локальный экстремум, и локального метода, стягивающего область параметров с глобальным экстремумом до минимальных размеров.

В качестве метода глобальной оптимизации эффективны генетические алгоритмы, реализующие случайный поиск с централизованным управлением с использованием отбора и генетических механизмов воспроизводства. Опираясь совокупностью решений, обрабатывается набор параметров, структурированный в виде цепочки, а последующие поколения популяции решений генерируются с помощью генетических операторов отбора, кроссовера и мутации.

В качестве метода локальной оптимизации при решении задач, характеризующихся высокими размерностью вектора варьируемых параметров и числом функциональных ограничений, предпочтителен метод последовательной линеаризации. На каждом шаге метода последовательной линеаризации осуществляется следующий набор вычислительных этапов: решение исходной и сопряженной задач; вычисление функциональных производных или градиентов критериев целей и функциональных ограничений по варьируемым переменным; построение области линеаризации; решение задачи линейного программирования.

Область линеаризации должна быть достаточно малой, чтобы формулы первого порядка с приемлемой точностью описывали приращения функционалов, и в то же время достаточно большой, чтобы процесс оптимизации не был слишком медленным. Область должна быть построена так, чтобы она целиком содержалась в глобальной области геометрических ограничений, при этом должна быть обеспечена возможность изменения ее конфигурации по любому возможному направлению в  $n$ -мерном пространстве варьируемых параметров.

**Электромеханический преобразователь ударного действия.** Электромеханические преобразователи ударного действия (ЭПУД), работающие в импульсном режиме



с быстрым изменением полей различной природы, позволяют развивать интенсивное силовое воздействие на объект и используются во многих технических системах [3,4]. Однако известные ударные преобразователи характеризуются низкой эффективностью работы (до 10–15 %), что обусловлено неоптимальными параметрами, несогласованием пространственно-временных электрических, магнитных, газодинамических, механических (упругих и деформационных) и тепловых характеристик [5].

ЭПУД включает многовитковый индуктор 1, возбуждаемый аperiodическим импульсом от емкостного накопителя (ЕН), коаксиально установленных массивного электропроводящего якоря 2, в котором индуцируются вихревые токи, и стального бойка 4 (исполнительный элемент), движение которого ограничено стальной плитой 5 (объект воздействия). На рис.1 показана конструктивная схема ЭПУД с основными геометрическими параметрами и возбуждаемым магнитным полем.

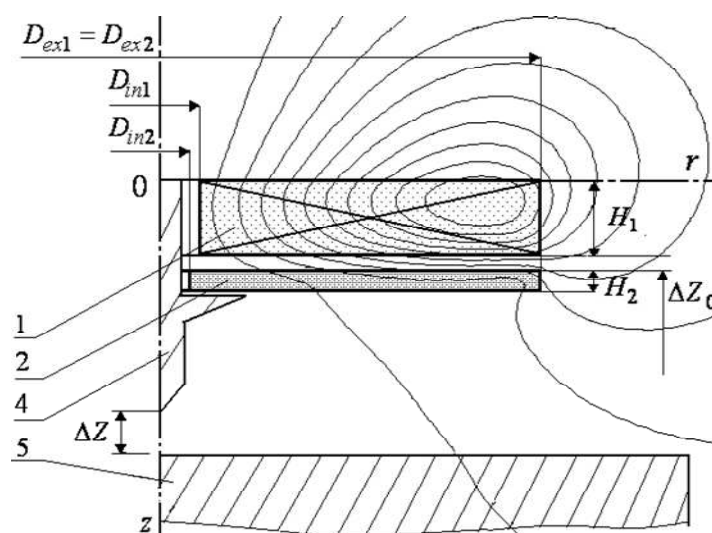


Рисунок 1

При работе в якоре возникает существенная пространственная неравномерность распределения индуцированного тока. Для учета этого в математической модели якорь представляется совокупностью элементарных короткозамкнутых контуров, равномерно распределенных по поверхности диска, а многовитковый индуктор – первичным контуром, подсоединенным к емкостному накопителю. В таком случае электрические процессы в ЭПУД можно описать системой дифференциальных уравнений [6]:

$$R_0(T_0) \cdot i_0 + L_0 \frac{di_0}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_0 dt + M_{01}(z) \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{0k}(z) \frac{di_k}{dt} + \\ + V(t) \left( i_1 \frac{dM_{01}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{0k}}{dz} \right) = U_0;$$

$$\begin{aligned}
 & R_1(T_1) \cdot i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{01}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} + \dots + M_{1k} \frac{di_k}{dt} + \\
 & + V(t) \left( i_0 \frac{dM_{01}}{dz} + i_2 \frac{dM_{12}}{dz} + \dots + i_k \frac{dM_{1k}}{dz} \right) = 0; \\
 & R_k(T_k) \cdot i_k + L_k \frac{di_k}{dt} + M_{0k}(z) \frac{di_0}{dt} + M_{1k} \frac{di_1}{dt} + \dots + M_{k-1k} \frac{di_{k-1}}{dt} + \\
 & + V(t) \left( i_0 \frac{dM_{0k}}{dz} + i_1 \frac{dM_{1k}}{dz} + \dots + i_{k-1} \frac{dM_{k-1k}}{dz} \right) = 0,
 \end{aligned}$$

где  $i_0, L_0, R_0$  – соответственно ток, индуктивность и сопротивление обмотки индуктора;  $i_k, L_k, R_k$  – соответственно ток, индуктивность и сопротивление элементарного короткозамкнутого  $k$ -го контура якоря, перемещающегося со скоростью  $V(t)$  вдоль оси  $z$  относительно индуктора;  $M_{kp}$  – взаимоиנדуктивность между соответствующими токовыми контурами ( $k \neq p$ );  $T_k$  – температура  $k$ -го токового контура;  $C, U_0$  – соответственно емкость и напряжение ЕН.

Аксиальное перемещение якоря  $\Delta Z$  с исполнительным элементом возникает под действием электродинамической силы

$$f_z(t) = i_0(t_n) \cdot \sum_k i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz}(z).$$

Скорость якоря можно представить в виде рекуррентного соотношения:

$$\begin{aligned}
 V(t_{n+1}) = V(t_n) + \frac{t_{n+1} - t_n}{m_1 + m_2} i_0(t_n) \cdot \sum_k i_k(t_n) \frac{dM_{0k}}{dz} - K_P \Delta Z(t_n) - K_T \cdot V(t_n) - \\
 - 0,125 \cdot \pi \cdot \gamma_a \beta_a D_{2m}^2 V^2(t_n),
 \end{aligned}$$

где  $m_1, m_2$  – масса якоря и исполнительного элемента, соответственно;  $K_P$  – коэффициент упругости пружины;  $K_T$  – коэффициент динамического сопротивления;  $\gamma_a$  – плотность среды перемещения;  $\beta_a$  – коэффициент аэродинамического сопротивления;  $D_{2m}$  – наружный диаметр якоря.

Для определения изменяемых и пространственно распределенных температур индуктора или якоря используется нелинейное уравнение теплопроводности

$$c^*(T) \cdot \gamma \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_w(T) \left( \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + j^2(t) \cdot k_z \cdot \rho(T),$$

где  $c^*(T)$  – усредненная удельная теплоемкость;  $\gamma$  – усредненная плотность материала;  $j(t)$  – плотность тока;  $\lambda_w(T)$  – коэффициент теплопроводности;  $k_z$  – коэффициент заполнения индуктора;  $\rho(T)$  – удельное сопротивление.

В качестве ЕН выбрана батарея низковольтных электролитических конденсаторов, обладающих высокими удельными показателями. Наличие полярных конденсаторов обусловило схему возбуждения с обратным шунтирующим диодом, при которой обеспечивается аperiodический полярный импульс тока в индукторе.

**Методика синтеза параметров электромеханического преобразователя.** Процесс синтеза параметров ЭПУД заключается в нахождении совокупности параметров, обеспечивающих максимальные значения кинетической энергии и силовых импульсов при минимальных потерях с заданными ограничениями. Целевую функцию можно записать следующим образом

$$\zeta = \sum_{j=1}^J \alpha_j \eta_j; \quad \sum_{j=1}^J \alpha_j = 1,$$

где  $J$  – количество функциональных параметров  $\eta_j$ , изменяемых в диапазоне  $[0, 1]$ ;  $\alpha_j$  – весовой коэффициент соответствующего параметра;

$$\eta_1 = \frac{\sum_{n=1}^2 \int i_n^2(t) R_n(T_n) dt}{0,5 \cdot (m_1 + m_2) \cdot V^2(t) + \sum_{n=1}^2 \int i_n^2(t) R_n(T_n) dt}; \quad \eta_2 = 1 - \frac{1}{C \cdot U_0^2 (m_1 + m_2)} \left( \int f_z(t) dt \right)^2;$$

$$\eta_3 = 1 - \frac{2 \cdot i_1(t) \cdot i_2(t) \cdot \Delta Z}{C \cdot U_0^2} \frac{dM_{12}}{dz}; \quad \eta_4 = 1 - \frac{V^2(t) (m_1 + m_2)}{C \cdot U_0^2}; \quad \eta_5 = (\zeta_1 \theta_1 + \zeta_2 \theta_2) T_0^{-1},$$

где  $\zeta_{1,2}$  – весовые коэффициенты;  $T_0$  – температура окружающей среды.

Функциональные параметры характеризуют эффективность преобразователя:  $\eta_1$  – по минимуму потерь;  $\eta_2$  – по максимуму импульса электродинамической силы;  $\eta_3$  – по амплитуде электродинамической силы при ограниченном перемещении якоря  $\Delta Z$ ;  $\eta_4$  – по максимуму кинетической энергии;  $\eta_5$  – по минимальной температуре.

Для глобальной оптимизации использованы генетические алгоритмы, а для локальной оптимизации – метод деформируемого многогранника. По этому методу в пространстве параметров случайным образом иницируется популяция точек  $x_i, i=1, \dots, n+1$  (вершины многогранника), при этом каждая точка представляет собой вектор параметров  $\mathbf{x}=(x_1, \dots, x_n)$ . Они отображаются на пространство целевой функции  $\eta(\mathbf{x})$  и на текущем шаге  $t$  определяются вершины с наибольшим и наименьшим значениями целевой функции. Новая точка  $z^t$  формируется путем отражения вершины с максимальным значением целевой функции относительно центра масс всех остальных вершин. В новой точке вычисляется значение целевой функции и, в зависимости от сравнения полученной величины со значением целевой функции в вершине с минимальным значением целевой функции, многогранник деформируется относительно своего исходного состояния. Поскольку процедура деформации многократно повторяется, то многогранник

адаптирується к локальному рельєфу целевой функции и сжимается, обеспечивая сходимость алгоритма.

Вычислительный алгоритм включает в себя следующие шаги [7].

Шаг 1. Задается генетическое представление многогранника набором  $N+1$  параметров – векторами переменных проектирования  $P^0 = (\mathbf{x}_1^0, \dots, \mathbf{x}_{N+1}^0)$ ,  $\mathbf{x}(x_1, \dots, x_N) \in \mathfrak{R}^N$ .

Шаг 2. Из  $K$  исходных многогранников  $P_i^0 = (\mathbf{x}_{i,1}^0, \dots, \mathbf{x}_{i,N+1}^0)$ ,  $i = 1, \dots, K$  случайным образом формируется популяция  $D_i (P_i^0)$ .

Шаг 3. К каждому многограннику  $P_i^0$  применяются операторы отражения, растяжения, сжатия и редукции для осуществления заданного числа шагов  $s$  в поисковом пространстве.

Шаг 4. Определяются величина целевой функции  $F^t(\mathbf{x}_{i,j}^t)$ ,  $i = 1, \dots, K$ ,  $j = 1, \dots, N+1$  в каждой вершине многогранника и его «лучшая» вершина  $\mathbf{x}_{i,b}^t$ ,  $i = 1, \dots, K$ .

Шаг 5. Осуществляется ранжирование многогранников относительно величины целевой функции их лучших вершин  $F_b^t(\mathbf{x}_{i,b}^t)$ ,  $i = 1, \dots, K$ .

Шаг 6. Исключается многогранник с наихудшими параметрами.

Шаг 7. Формируется новый многогранник  $P_K^t$  путем применения генетических операторов кроссовера и мутации, действующих с вероятностью  $\rho_{\text{МУТ}}$ , к двум случайно выбранным многогранникам из оставшихся  $(K-1)$ .

Шаг 8. Определяется величина целевой функции  $F(\mathbf{x}_{K,j}^t)$ ,  $j = 1, \dots, N+1$  и «лучшая» вершина многогранника  $P_K^t$ .

Шаг 9. Осуществляется ранжирование многогранников  $P_i^t$  по размеру  $\sigma(P_i^t)$ ,  $i = 1, \dots, K$ .

Шаг 10. Определяется пороговое значение  $\sigma^t$  для попадания в группу поиска по размеру  $h$ -ой популяции  $\sigma(P_h^t)$ .

Шаг 11. К  $(K-h)$  популяциям применяются операторы отражения, растяжения, сжатия и редукции.

Шаг 12. Осуществляется возврат к шагу 4.

На основании представленной методики можно определить параметры высокоэффективного ЭПУД. Однако, учитывая конструктивные и технологические ограничения, при выборе параметров важно знать их влияние на эффективность ЭПУД. На рис.2,а показано распределение параметра эффективности  $\eta = (1 - \zeta) \cdot 100$ , % при различной энергии  $W$  и емкости  $C$  ЕН, откуда следует, что целесообразно выбирать источник с повышенной энергией, но меньшей емкостью конденсаторов, при которых обеспечивается короткий, но мощный электромагнитный импульс.

При увеличении массы исполнительного элемента  $m_2$  эффективность преобразователя понижается, причем этот эффект более сильно проявляется при малых емкостях,

а значит повышенных напряжениях ЕН (рис.2,б). В этом случае возрастает несогласованность между переходными электромагнитными и механическими процессами.

Разработанный на основе мультидисциплинарной оптимизации ЭПУД с повышенной эффективностью, параметры которого представлены в табл., позволяет эффективно интегрироваться в технологии, где традиционно используются механические, гидравлические, химические, пневматические и др. исполнительные устройства [8], обеспечивая снижение энергопотребления при пониженных массо-габаритных показателях.

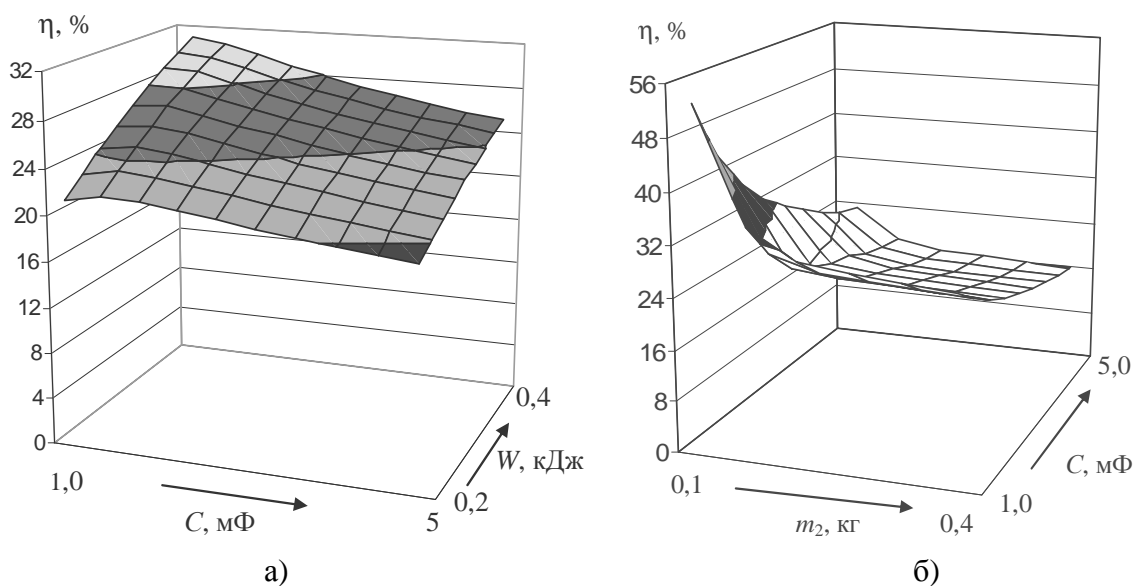


Рисунок 2

Таблица

$D_{ex1, 2}$ мм	$D_{in1}$ мм	$H_1$ мм	$D_{in2}$ мм	$H_2$ мм	$\Delta Z_0$ мм	$\Delta Z$ мм	$N$ шт	$a \times b$ мм <sup>2</sup>	$K_p$ кН/м	$m_2$ кг	$C$ мкФ	$U_0$ В
100	10	10	6	2,25	0,5	15	46	1,8×4,8	7,5	0,35	2850	400

**Выводы.** Разработан формализованный подход к мультидисциплинарной оптимизации сложных устройств, который характеризуется: комплексной математической моделью, включающей геометрические, электромагнитные, аэродинамические, вибро-механические и теплофизические параметры и характеристики; использованием методов и алгоритмов оптимизации, ориентированных на значительное число варьируемых параметров и функциональных ограничений; использованием ряда критериев, учитывающих различные аспекты функционирования устройства.

Разработанный подход реализован для электромеханического преобразователя ударного действия, в котором используются пространственно-временные поля различной природы (электрические, магнитные, газодинамические, механические (упругие и деформационные) и тепловые). Преобразователь характеризуется ограниченными массогабаритными параметрами и повышенной эффективностью работы.

Литература

1. Flager F., Welle B., Bansal P. et al. [Multidisciplinary process integration and design optimization of a classroom building](#) // Journal of Information Technology in Construction. – 2009. – Vol. 14. – P. 595–612.
2. Назаренко С.А. Математические модели мультифизического анализа конструкций для CALS технологий // Вестник НТУ «ХПИ». – 2008. – № 47. – С. 125–132.
3. Гурин А.Г., Набока Б.Г., Гладченко В.Я. Волновые явления в электродинамических излучателях и формирование сложных гидроакустических сигналов // Технічна електродинаміка. – 2001. – № 2. – С. 3–6.
4. Тюткин В.А. Магнитно-импульсный способ разрушения сводов и очистки технологического оборудования от налипших материалов // Электротехника. – 2002. – № 11. – С. 24–28.
5. Alotto P.G., Eranda C., Brandstatter B. et al. Stochastic algorithms in electromagnetic optimization // IEEE Transactions on Magnetics. – 1998. – Vol. 34, №5. –P. 3674–3684.
6. Болюх В.Ф., Назаренко С.А., Рассоха М.А. Мультиполевая модель импульсного электромеханического преобразователя // Интегровані технології та енергозбереження. – 2009. – № 3. – С. 34–40.
7. Болюх В.Ф., Данько В.Г. Лінійні електромеханічні перетворювачі імпульсної дії. –Харків: НТУ «ХПИ». – 2006. – 260 с.
8. Ушаков Л.С., Котылев Ю.Е., Кравченко В.А. Гидравлические машины ударного действия. – М.: Машиностроение. – 2000. – 416 с.

Bibliography (transliterated)

1. Flager F., Welle B., Bansal P. et al. Multidisciplinary process integration and design optimization of a classroom building Journal of Information Technology in Construction. – 2009. – Vol. 14. – R. 595–612.
2. Nazarenko S.A. Matematicheskie modeli mul'tifizichnogo analiza konstruk-cij dlja CALS tehnologij Vestnik NTU «HPI». – 2008. – # 47. – p. 125–132.
3. Gurin A.G., Naboka B.G., Gladchenko V.Ja. Volnovye javlenija v jelektrodinami-cheskih izluchateljah i formirovanie slozhnyh gidroakusticheskikh signalov Tehnichna elektrodinamika. – 2001. – # 2. – p. 3–6.
4. Tjut'kin V.A. Magnitno-impul'snyj sposob razrushenija svodov i ochistki tehnologi-cheskogo oborudovanija ot nalipshih materialov Jelektrotehnika. – 2002. – # 11. – p. 24–28.
5. Alotto P.G., Eranda C., Brandstatter B. et al. Stochastic algorithms in electromag-netic optimization IEEE Transactions on Magnetics. – 1998. – Vol. 34, #5. –R. 3674–3684.
6. Boljuh V.F., Nazarenko S.A., Rassoha M.A. Mul'tipolevaja model' impul'sno-go je-lektromehanicheskogo preobrazovatelja Integrovani tehnologii ta energozberezhen-nja. – 2009. – # 3. – p. 34–40.
7. Boljuh V.F., Dan'ko V.G. Linijni elektromehanichni peretvorjuvachi impul'snoї diї. –Harkiv: NTU «HPI». – 2006. – 260 p.
8. Ushakov L.S., Kotylev Ju.E., Kravchenko V.A. Gidravlicheskie mashiny udar-nogo dejstvija. – М.: Mashinostroenie. – 2000. – 416 p.

УДК 621.313:536.2.539.3

Болюх В.Ф., Назаренко С.О.

**СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО МУЛЬТИДИСЦИПЛІНАРНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ  
ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ УДАРНОЇ ДІЇ**

Розроблено формалізований підхід до мультидисциплінарної оптимізації складних пристроїв, який реалізований для електромеханічного перетворювача ударної дії. На базі математичної моделі, яка враховує просторово-часові поля різної природи (електричні, магнітні, пружно-деформаційні механічні і теплові) з використанням оптимізаційних генетичних алгоритмів і методу деформованого багатогранника, розроблено перетворювач, який характеризується обмеженими масогабаритними параметрами і підвищеною ефективністю роботи.

Bolyukh V.F., Nazarenko S.A.

**SYSTEMATIC APPROACH TO MULTIDISCIPLINARY OPTIMIZATION  
OF ELECTROMECHANICAL IMPACT CONVERTERS**

A formal approach to multidisciplinary optimization of complex devices is developed, and it is implemented for the electromechanical impact transducer. On the basis of a mathematical model that takes into account the spatial and temporal fields of different nature (electrical, magnetic, elastic deformation, mechanical and thermal) with use of optimization genetic algorithms and the flexible polyhedron method, the converter is developed, which is characterized of reduced weight and size and high efficiency.

УДК 665:664.3

Некрасов П.О.

**ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ СТРУКТУРОВАНИХ ЛІПІДІВ МЕТОДОМ ФЕРМЕНТАТИВНОЇ ТРАНСЕТЕРИФІКАЦІЇ ЖИРІВ**

**Актуальність проблеми.** Харчування із самого моменту народження людини відіграє ключову роль у збереженні його здоров'я, формуючи потенціал, що забезпечує довголіття. Різні поживні речовини, надходячи з їжею в організм і переутворюючись у ході метаболізму в результаті складних біохімічних процесів у структурні елементи клітин, забезпечують його пластичним матеріалом і енергією, визначаючи здоров'я, фізичну та розумову активність, тривалість життя людини, її здатність до репродукування.

Згідно даним Всесвітньої організації охорони здоров'я з кожним роком зростає число людей з аліментарно-залежними захворюваннями, тобто захворюваннями, для яких доведено безпосередній зв'язок з неправильним харчуванням.

У зв'язку із цим виникла необхідність створення функціональних харчових продуктів. Під поняттям «функціональних» мають на увазі продукти харчування, які при включенні в харчовий раціон забезпечують організм людини не стільки енергетичним і пластичним матеріалом, скільки контролюють та оптимізують конкретні фізіологічні функції та біохімічні реакції.

Олійно-жирова промисловість становить один з основних сегментів ринку функціональних харчових продуктів. До них належать структуровані ліпіди (СТЛ), які мають у своєму складі середньоланцюгові ацили, омега-3 і омега-6 поліненасичені кислоти. СТЛ розглядаються як нове покоління жирів, що є нутріцевтіками, тобто компонентами харчових продуктів, які збільшують поживну цінність останніх або роблять їх корисними для здоров'я, включаючи можливість запобігання та лікування хвороб [1–3].

Отримання структурованих ліпідів методом ферментативної трансетерифікації жирів є інноваційною технологією, яка в останні роки плідно розробляється на кафедрі технології жирів та продуктів бродіння Національного технічного університету «ХПІ».

**Мета представленої роботи** полягала в комплексному дослідженні та аналізі кінетики ферментативної трансетерифікації жирів, що спрямована на отримання структурованих ліпідів.

Модельними триацилгліцеринами, що містять ацили поліненасичених кислот, та ефіром середньоланцюгової кислоти – було обрано відповідно трилінолеїн та етиловий ефір каприлової кислоти. Співвідношення вказаних компонентів в модельній суміші становило 1 моль : 8 моль, при якому, за попередніми результатами, спостерігався найбільший вихід цільового продукту. Реакцію каталізували за допомогою ферментного препарату 1,3-специфічної ліпази Lipozyme RM IM виробництва фірми «Novozymes» (Данія). Кількість біокаталізатора – 10 % мас. по відношенню до маси реакційної суміші. Процес проводили в двох паралелях при температурах 50 °С, 60 °С, 70 °С протягом 6 годин при постійному перемішуванні під шаром азоту.

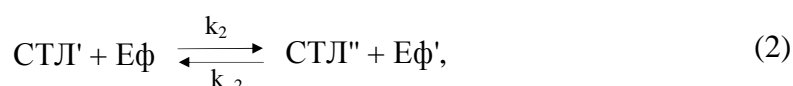
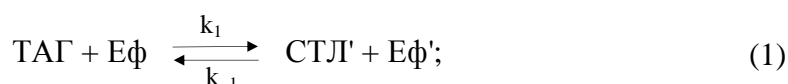
Через визначені проміжки часу відбирались проби, ліпідний склад яких аналізувався методом високотемпературної газорідинної хроматографії у відповідності із AOCs Official Method Cd 11b-91 [4]. Використовувався хроматограф Clarus 500 Gas Chromatography (Perkin-Elmer), оснащений полум'яно-іонізаційним детектором (ПІД). Колонка Restek Rtx-65TG, капілярна; її геометричні параметри: довжина 30 м, 0,25 мм



внутрішній діаметр, 0,2 мкм товщина нерухомої фази. Стаціонарна фаза Crossbond 35 % диметил – 65 % діфенілполісілоксан. Температурна програма 80 °С (0 хв.), 10 °С/хв. до 320 °С (0 хв.), 5 °С/хв. до 360 °С (15 хв.) Температура інжектора – 320 °С, температура детектора – 370 °С. Газ-носієй – гелій. Швидкість газу-носія 3 см<sup>3</sup>/хв. Спліт 1 : 50. Витрата повітря для ПІД – 450 см<sup>3</sup>/хв., витрата водню для ПІД – 45 см<sup>3</sup>/хв. Обсяг проби, що вводився, – 0,5 мкл.

Отримані експериментальні дані застосовувались як вихідні для дослідження кінетики процесу з використанням математичного моделювання.

Раніше проведені нами дослідження ферментативної трансетерифікації жирів з метою отримання структурованих ліпідів показали, що вказаний процес обумовлен одночасним перебігом двох реакцій:



де  $k_1, k_2$  є константами швидкостей прямих реакцій, і  $k_{-1}, k_{-2}$  – відповідні величини для зворотних реакцій. У рівняннях прийняті наступні позначення компонентів: ТАГ – триацилгліцерин; Еф – етиловий ефір середньоланцюгової кислоти; Еф' – етиловий ефір довголанцюгової кислоти; СТЛ' – однозаміщений структурований ліпід (монокапрілоділінолеїн); СТЛ'' – двозаміщений структурований ліпід (дікапріломонолінолеїн).

На основі приведених реакцій для математичного моделювання було складено систему нелінійних диференціальних рівнянь, що описують зміну концентрацій вихідних субстратів і продуктів реакцій у часі.

$$\left. \begin{aligned} \frac{d[\text{ТАГ}]}{d\tau} &= -k_1[\text{ТАГ}][\text{Еф}] + k_{-1}[\text{СТЛ}'][\text{Еф}']; \\ \frac{d[\text{Еф}]}{d\tau} &= -k_1[\text{ТАГ}][\text{Еф}] + k_{-1}[\text{СТЛ}'][\text{Еф}] - k_2[\text{СТЛ}'][\text{Еф}'] + k_{-2}[\text{СТЛ}''][\text{Еф}']; \\ \frac{d[\text{Еф}']}{d\tau} &= k_1[\text{ТАГ}][\text{Еф}] - k_{-1}[\text{СТЛ}'][\text{Еф}'] + k_2[\text{СТЛ}'][\text{Еф}'] - k_{-2}[\text{СТЛ}''][\text{Еф}']; \\ \frac{d[\text{СТЛ}']}{d\tau} &= k_1[\text{ТАГ}][\text{Еф}] - k_{-1}[\text{СТЛ}'][\text{Еф}'] - k_2[\text{СТЛ}'][\text{Еф}'] + k_{-2}[\text{СТЛ}''][\text{Еф}']; \\ \frac{d[\text{СТЛ}'' ]}{d\tau} &= k_2[\text{СТЛ}'][\text{Еф}'] - k_{-2}[\text{СТЛ}'' ][\text{Еф}']. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Для ідентифікації констант швидкостей прямих та зворотних реакцій здійснювався процес моделювання в середовищі Mathcad 14 (Parametric Technology Corporation) з використанням методу оптимізації, у ході якого проводилася мінімізація помилок між експериментальними та модельними даними. У якості чисельної процедури моделювання диференціальних рівнянь було використано метод Рунге-Кутта зі змінним кроком четвертого порядку точності. Отримані за допомогою зазначеного методу дані використовувались для обчислення цільової функції  $J(k)$ , яка фактично становила помилку між експериментальними та модельними даними, і мала такий вигляд:

$$J(k) = \sum_{i=0}^m \left\| x_i - \bar{x}(t_i, x^0, k) \right\|^2, \quad (4)$$

де  $x_i$  – значення вектора станів системи, отримані експериментальним шляхом у момент часу  $t_i$ ;  $\bar{x}(t_i, x^0, k)$  – значення вектора станів системи, обчислені з використанням обраної процедури імітаційного моделювання в момент часу  $t_i$  з початковими умовами  $x^0 = x_0 = \bar{x}(t_0, x^0, k)$ ;  $k$  – вектор параметрів системи;  $m$  – кількість наборів експериментальних даних.

Для оптимізації застосовувався алгоритм випадкового багатомірного пошуку – метод комплексів [5].

У результаті було розроблено програму, що дозволила визначити чисельні значення констант швидкостей прямих і зворотних реакцій, які протікають у процесі ферментативної трансетерифікації жирів, а також їх констант рівноваги (відповідно табл. 1 та 2).

Таблиця 1 – Константи швидкостей  $\left( \frac{1}{\text{моль} \cdot \text{ч} \cdot \text{год}} \right)$

Реакція	Значення констант швидкостей при різних температурах					
	50 °C		60 °C		70 °C	
	Пряма	Зворотна	Пряма	Зворотна	Пряма	Зворотна
$\text{ТАГ} + \text{Еф} \xrightleftharpoons[k_{-1}]{k_1} \text{СТЛ}' + \text{Еф}'$	0,0258	0,0041	0,0382	0,0052	0,0530	0,0058
$\text{СТЛ}' + \text{Еф} \xrightleftharpoons[k_{-2}]{k_2} \text{СТЛ}'' + \text{Еф}'$	0,0131	0,0062	0,0232	0,0077	0,0342	0,0091

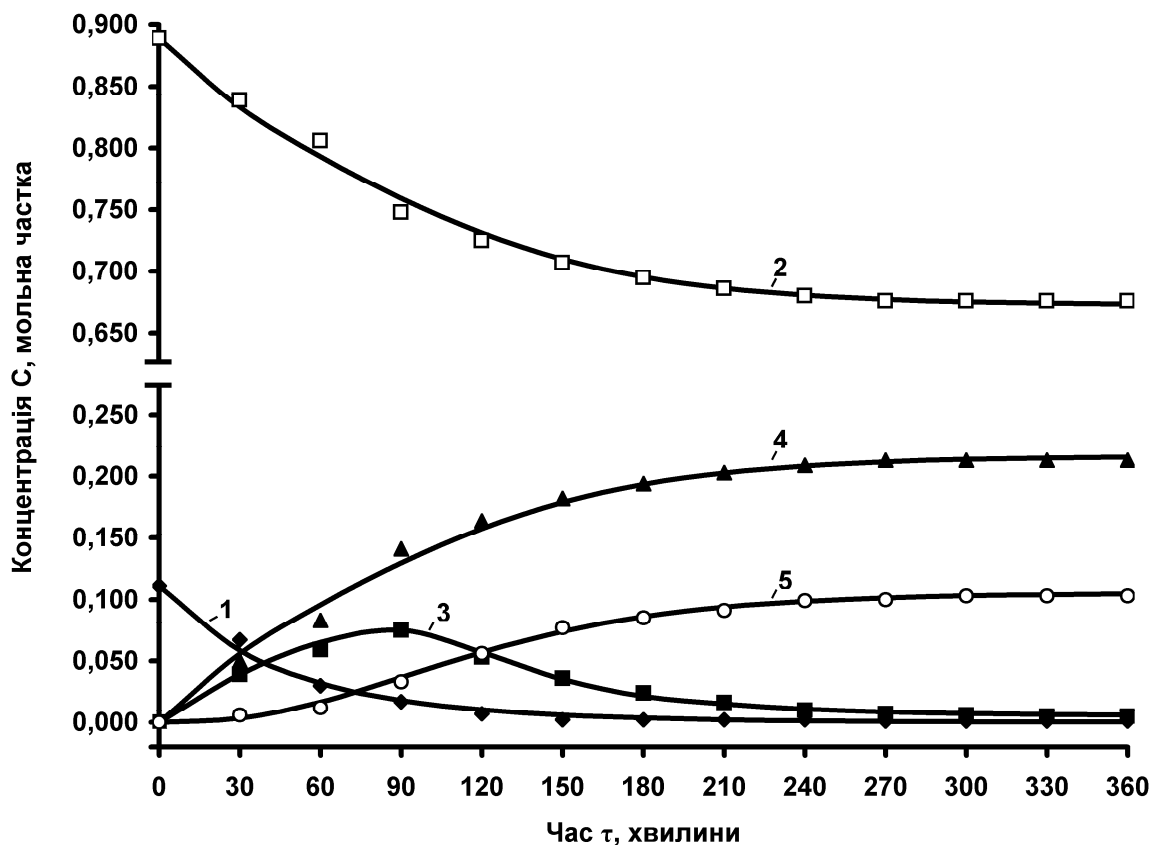
Таблиця 2 – Константи рівноваги ( $K_p$ )

Реакція	Значення констант рівноваги при різних температурах		
	50 °C	60 °C	70 °C
$\text{ТАГ} + \text{Еф} \xrightleftharpoons[k_{-1}]{k_1} \text{СТЛ}' + \text{Еф}'$	6,29	7,35	9,14
$\text{СТЛ}' + \text{Еф} \xrightleftharpoons[k_{-2}]{k_2} \text{СТЛ}'' + \text{Еф}'$	2,11	3,01	3,76

Аналіз даних, представлених в таблицях 1 та 2, дозволяє зробити висновок, що прямі реакції перевищують зворотні, тобто спостерігається спрямованість в бік отримання продуктів. Чисельні значення констант швидкостей прямих та зворотніх реакцій, а також констант рівноваги збільшуються з підвищенням температури трансетерифікації. Крім того, взаємодія однозаміщеного структурованого ліпиду з етиловим ефіром каприлової кислоти є лімітуючою стадією процесу в цілому, про що свідчить відно-

шення чисельних значень констант швидкостей прямих реакцій при температурах проведення експерименту, тобто  $k_1 > k_2$ .

Розроблена програма додатково дала можливість моделювати зміни концентрацій вихідних речовин і продуктів реакцій у часі при заданих співвідношеннях субстратів і температурі. Отримані експериментально та змодельовані дані представлено на рис. 1.



Експериментальні дані:  $\blacklozenge$  – ТАГ;  $\square$  – Еф;  $\blacksquare$  – СТЛ';  $\blacktriangle$  – Еф';  $\circ$  – СТЛ''  
 Моделі: 1 – ТАГ; 2 – Еф; 3 – СТЛ'; 4 – Еф'; 5 – СТЛ''

Рисунок 1 – Експериментальна та отримана за допомогою математичного моделювання кінетика ферментативної трансестерифікації жирів (температура процесу 70 °С)

Для перевірки адекватності отриманої моделі за формулою (5) обчислювалося середнє значення помилки між експериментальними та розрахунковими даними.

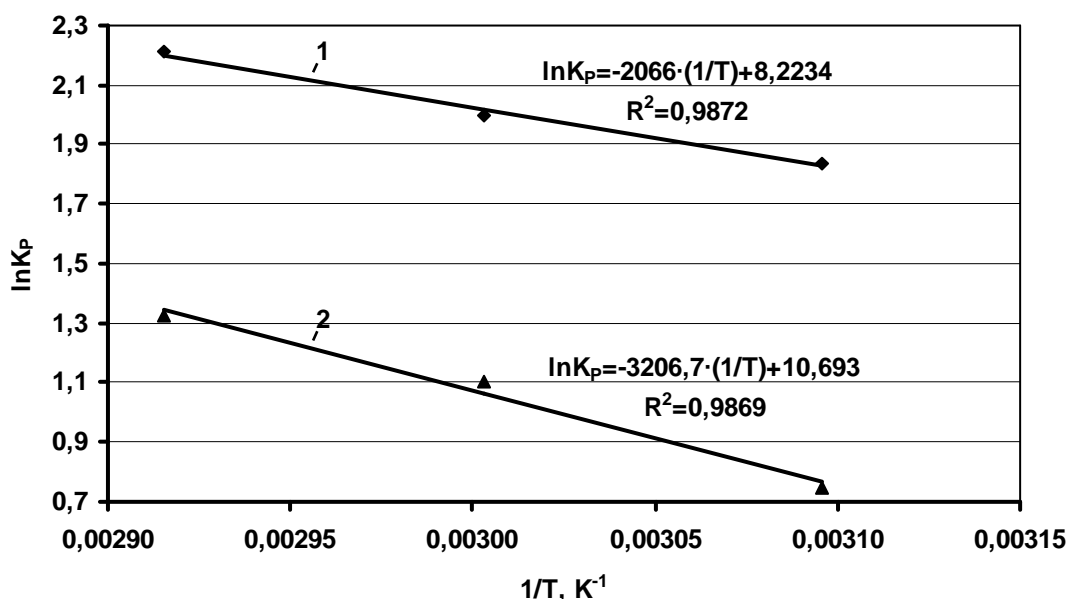
$$\tilde{J}(k) = \frac{\sum_{i=0}^m \|x_i - \bar{x}(t_i, x^0, k)\|^2}{m}. \quad (5)$$

Обчислене значення склало 0,011, коефіцієнт кореляції дорівнював 0,9902. Зазначені величини і дані, наведені на рис. 1, свідчать про те, що розроблена математична модель адекватно описує факторний простір експерименту.

При аналізі ходу кінетичних залежностей (рис. 1) можна зробити висновок, що основна частка однозаміщеного структурованого ліпиду (СТЛ') утворюється через 2,5 години. Разом з тим час, який необхідний для одержання цільового продукту при заданих умовах становить 5 годин. Це пояснюється тим, що швидкість прямої реакції (1) значно перевищує аналогічний показник реакції (2). Таким чином, підтверджується попередньо зроблений висновок, що лімітувальною стадією процесу є друга реакція.

Для створення цілісної картини кінетики ферментативного процесу отримання структурованих ліпідів на підставі даних, представлених у табл. 1 і 2, було обчислено термодинамічні параметри вказаних реакцій.

Спочатку в напівлогарифмічних координатах були побудовані залежності  $\ln K_p = f(1/T)$  (рис. 2).



1 – залежність  $\ln K_p = f(1/T)$  для реакції  $\text{ТАГ} + \text{Еф} \rightleftharpoons \text{СТЛ}' + \text{Еф}'$ ;  
 2 – залежність  $\ln K_p = f(1/T)$  для реакції  $\text{СТЛ}' + \text{Еф} \rightleftharpoons \text{СТЛ}'' + \text{Еф}'$ .

Рисунок 2 – Залежність логарифмів констант рівноваги від зворотних значень температури

Залежності, що приведені на рис. 2, для кожної реакції підпорядковуються рівнянням прямих ліній з відповідними кутовими коефіцієнтами. Це дозволило розрахувати чисельні значення теплових ефектів  $\Delta H$  за формулою:

$$\Delta H = -\text{tg}\alpha \cdot R, \quad (6)$$

де  $\text{tg}\alpha$  – кутовий коефіцієнт,  $R$  – універсальна газова стала, Дж/(моль·К).

Енергію Гіббса  $\Delta G$  та ентропію  $\Delta S$  в інтервалі температур 50 –70 °С (323–343К) визначали за формулами (7) та (8) відповідно:

$$\Delta G = -RT \ln K_p, \quad (7)$$

де  $K_p$  – константа рівноваги при відповідній температурі  $T$ .

$$\Delta S = \frac{\Delta H - \Delta G}{T} \quad (8)$$

Величину енергії активації для прямих та зворотних реакцій в області оптимальних значень температурних режимів процесу 60–70 °С (333–343К) розраховували за формулою:

$$E_{\text{акт}} = \frac{RT_1T_2}{T_2 - T_1} \ln \frac{k_{T_2}}{k_{T_1}}, \quad (9)$$

де  $k_{T_1}$  та  $k_{T_2}$  – константи швидкості при температурах  $T_1$  та  $T_2$ .

Чисельні значення термодинамічних характеристик досліджуваних реакцій та їх енергій активації представлено в табл. 3 та 4 відповідно.

Таблиця 3 – Термодинамічні характеристики

Реакція	$\Delta H$ , кДж/моль	$\Delta G$ , кДж/моль			$\Delta S$ , кДж/(моль·К)		
		50 °С	60 °С	70 °С	50 °С	60 °С	70 °С
ТАГ+Еф $\rightleftharpoons$ СТЛ'+Еф'	17,18	-4,94	-5,52	-6,31	0,07	0,07	0,07
СТЛ'+Еф $\rightleftharpoons$ СТЛ''+Еф'	26,66	-2,01	-3,05	-3,78	0,09	0,09	0,09

Таблиця 4 – Енергія активації

Реакція	Енергія активації, кДж/моль	
	Пряма	Зворотна
ТАГ+Еф $\rightleftharpoons$ СТЛ'+Еф'	31,10	10,37
СТЛ'+Еф $\rightleftharpoons$ СТЛ''+Еф'	36,85	15,86

Аналізуючи дані, наведені в табл. 3 і 4, необхідно відзначити, що для обох реакцій чисельне значення теплового ефекту  $\Delta H$  позитивне і енергії активації в прямому напрямку суттєво більше відповідних величин для зворотних. Це свідчить про те, що зазначені реакції ендотермічні, тобто протікають із поглинанням тепла.

Зі зростанням температури для обох реакцій значення  $\Delta G$  зменшується, тобто тим переважніше реакції йдуть убік утворення продуктів. У той же час при всіх температурах значення  $\Delta G$  першої реакції набагато менше аналогічного показника для другої реакції. Це підтверджує раніше зроблений висновок про те, що друга реакція більш утруднена і є лімітувальною для всього процесу в цілому.

**Висновки.** Таким чином, результати здійснених досліджень та математичного моделювання дозволили визначити константи швидкостей прямих і зворотних реакцій, що протікають в процесі ферментативної трансетерифікації жирів, а також константи рівноваги кожної з них. Це дало можливість розрахувати термодинамічні параметри та зробити висновок про внесок кожної з реакцій в загальний процес у цілому. Крім того,

результати моделювання можуть бути основою для розробки системи автоматизованого керування технологією отримання структурованих ліпідів, що дозволить здійснювати якісну та кількісну оцінку складу реакційної суміші з наступною оптимізацією технологічних параметрів.

Література

1. Akoh C.C. Food lipids: chemistry, nutrition, and biotechnology, 3rd ed. / Casimir C. Akoh and David B. Min. – CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2008.– 914 p.
2. Mu H. The metabolism of structured triacylglycerols / H. Mu, T. Porsgaard // Progress in Lipid Research.– 2005.– Vol. 44, №6.– P. 430–448.
3. Gunstone F.D. The lipid handbook, 3rd ed. / F. D. Gunstone, J. L. Harwood, A. J. Dijkstra, – CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2007.– 719 p.
4. AOCS. In: Firestone D, editor. Official methods and recommended practices of the American Oil Chemist's Society. 5th ed. Champaign, IL: American Oil Chemists' Society (AOCS), 2003.
5. Растринин Л.А. Системы экстремального управления / Л.А. Растринин. – М.: Наука, 1974 – 632 с.

Bibliography (transliterated)

1. Akoh C.C. Food lipids: chemistry, nutrition, and biotechnology, 3rd ed. Casimir C. Akoh and David B. Min. – CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2008.– 914 p.
2. Mu H. The metabolism of structured triacylglycerols H. Mu, T. Porsgaard Progress in Lipid Research.– 2005.– Vol. 44, #6.– P. 430–448.
3. Gunstone F.D. The lipid handbook, 3rd ed. F. D. Gunstone, J. L. Harwood, A. J. Dijkstra, – CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, 2007.– 719 p.
4. AOCS. In: Firestone D, editor. Official methods and recommended practices of the American Oil Chemist's Society. 5th ed. Champaign, IL: American Oil Chemists' Society (AOCS), 2003.
5. Rastrigin L.A. Sistemy jekstremal'nogo upravlenija L.A. Rastrigin. – М.: Nauka, 1974 – 632 p.  
УДК 665:664.3

Некрасов П.А.

**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ  
СТРУКТУРИРОВАННЫХ ЛИПИДОВ МЕТОДОМ ФЕРМЕНТАТИВНОЙ  
ТРАНСЭТЕРИФИКАЦИИ ЖИРОВ**

Выполнено математическое моделирование кинетики ферментативной трансэтерификации жиров. Определены константы скоростей прямых и обратных реакций, а также их константы равновесия. Рассчитаны термодинамические параметры и сделан вывод о вкладе каждой из реакций в общий процесс.

Nekrasov P.O.

**THE INVESTIGATION OF PROCESS KINETIC OF STRUCTURED LIPIDS  
PRODUCTION WITH ENZYMATIC TRANSESTERIFICATION OF FATS**

Mathematical modeling of enzymatic fats transesterification kinetic was fulfilled. Rate constants for direct and reverse reactions were estimated. Equilibrium constants of the reactions were determined. Computed thermodynamic characteristics gave an opportunity to establish the dominant reaction.

Рассоха А.Н., Черкашина А.Н., Алешко С.Е.

**АГРЕГАТИВНАЯ И СЕДИМЕНТАЦИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ  
ДИСПЕРСНЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ В ФУРАНО-ЭПОКСИДНЫХ  
РЕАКЦИОННЫХ СИСТЕМАХ**

При создании дисперснонаполненных фурано-эпоксидных полимерных композиционных материалов строительного назначения важную роль играют структурно-реологические свойства наполнителей, агрегативная и седиментационная устойчивость системы, которые в значительной степени обеспечивают структурные характеристики композитов [1,2].

Представляло интерес исследовать влияние химической природы и фракционного состава на структурно-реологические свойства дисперсных наполнителей, а также параметры агрегативной и седиментационной стойкости фурано-эпоксидных реакционноспособных систем, содержащих исследованные наполнители.

Фурано-эпоксидные реакционноспособные олигомеры (ФАЭД) представляют собой продукт термического совмещения фурфуролацетонного мономера ФАМ или ФА или эпоксидиановых олигомеров (ЭД-16, ЭД-20, ЭД-22) и сочетают положительные качества фурановой и эпоксидной составляющих: имеют высокую смачивающую способность поверхности наполнителя, достаточную адгезию и механическую прочность. Источником получения фурановых соединений являются возобновляемые продукты (древесина, отходы сельского хозяйства и другие пентозансодержащие природные материалы).

В качестве дисперсных наполнителей (НП) использовали неорганические (кварцевый песок – КП, каолин – КН, периклаз – ПК, карбонат кальция – КК, графит – ГР) и полимерные (полиметилметакрилат – ПММА, поливиниловый спирт – ПВС, пентапласт – ППЛ, поливинилхлорид суспензионный – ПВХС) материалы различной степени дисперсности.

Модификаторами поверхности служили неорганические материалы типа кислот Льюиса (хлориды алюминия, кобальта, железа и др.), а также высокомолекулярные соединения из группы полиацеталей (поливинилбутираль – ПВБ, поливинилбутираль-фурфураль – ПВБФ, поливинилформаль – ПВФ, поливинилэтинал – ПВЭ). Модификация поверхности дисперсных НП осуществлялась механохимическим способом по двум технологиям – совместным помолом в шаровой мельнице систем: «НП – модификатор» («сухая» технология) и «НП – модификатор – растворитель» («мокрая» технология).

Для сравнительной оценки реологических параметров дисперсных систем, отличающихся плотностью и формой частиц, целесообразно также использовать показатели "уплотняемость" и "индекс трения", при определении которых дисперсная система оценивается в двух разных состояниях – при свободной насыпке и после уплотнения [3].

Определение структурно-реологических свойств дисперсных наполнителей в двух средах (воздух и дистиллированная вода) – истинной  $\rho$  и насыпной  $\rho_{нас}$  плотности, коэффициента заполнения объема  $\varphi_m$ , пористости  $\varepsilon$ , плотности после уплотнения  $\rho_y$ , уплотняемости  $U$ , индекса трения  $I$ , угла естественного откоса  $\alpha$  – осуществлялась по известным методикам [3]. Количество параллельных опытов на одну экспериментальную



точку: 15–20 (табл. 1). Седиментационные параметры изучали с использованием стандартных лабораторных методик, обеспечивающих получение достоверных и воспроизводимых результатов; погрешность опыта составляла не более 5–7 %.

Таблица 1 – Структурно-реологические свойства исследованных наполнителей (дисперсионная среда – воздух)

Наполнитель	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{нас}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\varphi_m$ ,	$\varepsilon$ , %	$\rho_y$ , кг/м <sup>3</sup>	$Y$	$I$	$\alpha$ , град
КП								
– фр. 1000–630 мкм	2650	1540	0,58	42	1630	0,055	1,058	<u>22,0</u> 14,0
– фр. 400–630 мкм	2650	1448	0,55	45	1545	0,063	1,067	<u>22,5</u> 14,5
– фр. 250–400 мкм	2650	1410	0,53	47	1530	0,078	1,085	<u>22,8</u> 15,0
– фр. 125–250 мкм	2650	1337	0,50	50	1474	0,093	1,102	<u>24,7</u> 16,0
– фр. менее 125 мкм	2650	1157	0,44	56	1380	0,162	1,193	<u>33,6</u> 22,5
КП-М (кислоты Льюиса-«сухая» технология)								
– фр. 400–630 мкм	2657	1355	0,51	49	1639	0,173	1,210	<u>26,0</u> 17,0
– фр. 250–400 мкм	2657	1315	0,49	51	1500	0,122	1,141	<u>25,3</u> 16,0
– фр. 125–250 мкм	2657	1295	0,48	52	1418	0,087	1,095	<u>27,5</u> 18,0
– фр. менее 125 мкм	2657	1142	0,43	57	1145	0,003	1,002	<u>35,8</u> 24,0
КП-М (полиацетали-«сухая» технология)								
– фр. 400–630 мкм	2600	1305	0,50	50	1595	0,182	1,222	28,5
– фр. 250–400 мкм	2600	1260	0,48	52	1455	0,134	1,155	27,4
– фр. 125–250 мкм	2600	1225	0,47	53	1382	0,114	1,128	25,8
– фр. менее 125 мкм	2600	1103	0,42	58	1125	0,019	1,020	33,2
КП-М (полиацетали –«мокрая» технология)								
– фр. 400–630 мкм	2600	1345	0,52	48	1610	0,165	1,197	27,5
– фр. 250–400 мкм	2600	1300	0,50	50	1480	0,122	1,138	26,0
– фр. 125–250 мкм	2600	1280	0,49	51	1400	0,086	1,094	28,8
– фр. менее 125 мкм	2600	1130	0,43	57	1140	0,009	1,009	34,5
КН – фр. менее 125 мкм	2580	880	0,34	66	985	0,107	1,119	42
ПК – фр. менее 630 мкм	3800	1970	0,52	48	2110	0,066	1,071	21
КК – фр. менее 125 мкм	2710	960	0,35	64	1182	0,188	1,231	49
ГР	2650	760	0,29	71	950	0,201	1,252	39

Примечание: знаменатель – угол естественного откоса при падении дисперсного материала с высоты 1 м.

Основным параметром наполнителей, влияющим на формирования структуры и свойств дисперсных систем, является коэффициент заполнения объема  $\varphi_m$ . Этот параметр при анализе свойств композитов на основе ФАЭД используется в оценке модуля упругости, коэффициента линейного термического расширения, теплофизических характеристик, деформируемости композитов, а также реологических свойств исследуемых систем.

Анализ экспериментальных данных (табл. 1) показал, что для исследованных дисперсных наполнителей фракцией более 125 мкм параметр  $\varphi_m$  практически не зависит от диаметра частиц и приближается к среднестатистической плотности кубической упаковки частиц (примерно 0,55). При уменьшении диаметра частиц наблюдается тенденция к снижению  $\varphi_m$ , что связано с формированием относительно крупных и прочных агрегатов отдельных частиц в виде кластеров с определенной степенью фрактальности. Т.е. параметр  $\varphi_m$  для группы анализируемых наполнителей (табл. 1) определяется их природой, формой частиц, распределением частиц по размерам, взаимодействием между частицами, характеризующими их устойчивость (параметр индекса трения  $I$ ).

В дисперсной системе образуются два типа пор – внутри агрегата (кластера) и вне его. При этом суммарная пористость  $\varepsilon$  возрастает и это приводит к уменьшению насыпной плотности  $\rho_{нас}$  и параметра  $\varphi_m$ .

Увеличение сил аутогезии, обусловленных различной природой (молекулярной, электрической, магнитной, капиллярной, силами механического зацепления) и трения в исследованных дисперсных наполнителях вызывает рост величины индекса трения  $I$  (табл. 1).

Для материалов, связность которых незначительна (например, КП, ПК), угол внутреннего трения  $\gamma$  в первом приближении равен углу естественного откоса  $\alpha$ , для наполнителей с более высоким уровнем связности (КН, КК, ГР), образующих нелинейную поверхность откоса, средний угол  $\alpha$ , как правило, больше угла внутреннего трения  $\gamma$ . Величина  $\alpha$  в значительной мере определяется дисперсностью системы (табл. 1).

Для оценки влияния матрицы (жидкого реакционноспособного олигомера - РСО) на параметр  $\varphi_m$  проведены определения структурно-реологических свойств КП различных фракций (табл. 2) в дистиллированной воде (поверхностные натяжения мономера ФАМ и воды достаточно близки и составляют соответственно 66,42 мН/м и 72,5 мН/м).

Таблица 2 – Структурно-реологические свойства кварцевого песка (дисперсионная среда – вода)

Наполнитель	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{нас}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\varphi_m$	$\varepsilon$ , %	$\rho_y$ , кг/м <sup>3</sup>	$\gamma$	$I$	$\Delta V$ , %
КП								
– фр. 1000–630 мкм	2650	1360	0,51	49	1560	0,128	1,147	1,62
– фр. 400–630 мкм	2650	1337	0,50	50	1493	0,104	1,067	1,81
– фр. 250–400 мкм	2650	1435	0,54	46	1640	0,124	1,085	1,67
– фр. 125–250 мкм	2650	1371	0,52	48	1532	0,105	1,102	3,07
– фр. менее 125 мкм	2650	1176	1,00	0	1176	0	1,000	3,77

Примечание:  $\Delta V$  – изменение объема системы при совмещении КП и воды.

Как видно из табл. 2, зависимость параметров  $\varphi_m$ ,  $\rho_{нас}$ ,  $\rho_y$ ,  $Y$ ,  $I$  от дисперсности (среднеэффективного диаметра) КП нелинейная. Например, для фракций менее 125 мкм значение  $\varphi_m$  приближается к 1. При этом примерно в 2,3 раза возрастает изменение объема системы при совмещении КП и воды  $\Delta V$ .

Установлено, что для высокодисперсных исследованных наполнителей (фракция более 40 мкм) эффект смачивания и поверхностное натяжение фурано-эпоксидного РСО практически не оказывает влияния на  $\varphi_m$ . Высокодисперсные наполнители (особенно фракция менее 10 мкм) в присутствии РСО в некоторой мере изменяют  $\varphi_m$ , что, обусловлено, вероятно, с разрушением агрегатов (кластеров) или их раздвижкой.

Особый интерес представляет определение структурно-реологических свойств (табл. 3) дисперсных систем полимерной природы (полиметилметакрилат, поливиниловый спирт, пентапласт, суспензионный поливинилхлорид), выполняющих в фурано-эпоксидных ПКМ функции наполнителей-модификаторов.

Таблица 3 – Структурно-реологические свойства полимерных наполнителей (дисперсионная среда – воздух)

Наполнитель	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$\rho_{нас}$ , кг/м <sup>3</sup>	$\varphi_m$	$\varepsilon$ , %	$\rho_y$ , кг/м <sup>3</sup>	$Y$	$I$	$\alpha$ , град
ПММА	1190	650	0,55	45	720	0,097	1,11	35
ПВС	1220	620	0,51	49	740	0,162	1,19	39
ППЛ	1400	410	0,29	71	510	0,192	1,32	32
ПВХС	1400	620	0,44	66	690	0,101	1,11	30

Как видно из табл. 3, основные параметры исследованных свойств этих наполнителей находятся на уровне, присущем минеральным дисперсным системам.

Параметрами динамического состояния исследованных систем на основе ФАЭД-50(20) и НП (КП, КН, ПК, ГР) служили: время микропроцессов, характеризующее совокупность явлений, которые относятся к отдельным частицам НП и закономерностям их взаимодействия с ФАЭД-50(20), критерий агрегируемости НП в ФАЭД-50(20) и его седиментационная устойчивость.

Определяли (табл. 4) время межчастичных взаимодействий за счет поверхностных сил  $\tau_1$ , теплового движения частиц НП за счет внутренней энергии колебаний молекул ФАЭД-50(20)  $\tau_2$ , инерционных движений частиц НП за счет внешних сил  $\tau_3$ , седиментации под действием силы тяжести  $\tau_4$  (среднее значение для исследованных НП при различных значениях диаметра частиц  $d$ ).

Динамическая вязкость ФАЭД-50(20) – 0,8835 Па с, плотность 1200 кг/м<sup>3</sup>, средняя сила взаимодействия в контактах между частицами в олигомерной суспензии НП  $\approx 10^{-9}$  с.

Сумма времен релаксаций  $\tau_i$  каждого из факторов (с учетом долевого вклада) определяет общую величину времени микропроцессов  $\tau$ . Варьируя условиями, в которых складывается динамическое состояние системы ФАЭД-50(20) + НП, можно целенаправленно регулировать технологические свойства структурирующихся фурано-эпоксидных систем. Для исследованных вариантов композитов, имеющих диаметр частиц более 100 мкм, вклад инерционных  $\tau_3$ , и седиментационных  $\tau_4$  эффектов более существенен, чем межчастичное взаимодействие  $\tau_1$  и тепловое движение  $\tau_2$  (табл. 4).

Таблица 4 – Время микропроцессов  $\tau_1$  (с) в системе ФАЭД-50(20) + НП

$d$ , мкм	$\tau_1$	$\tau_2$ при $T$ , °C			$\tau_3$	$\tau_4$
		20	50	80		
0,5	$0,22 \cdot 10^{-3}$	0,0247	0,0218	0,0205	$3,39 \cdot 10^{-10}$	1232000
1	$0,88 \cdot 10^{-3}$	0,198	0,174	0,164	$1,36 \cdot 10^{-9}$	301800
10	0,088	19,79	17,42	16,43	$1,36 \cdot 10^{-7}$	3018
100	8,835	1979,5	1741,7	1643	$1,36 \cdot 10^{-5}$	30,18
1000	883,5	197950	174170	164300	$1,36 \cdot 10^{-3}$	0,3018

Агрегативная устойчивость и реологические свойства системы «ФАЭД – КП» связаны между собой – равновесие в процессах «агрегирование – пептизация (диспергирование)» частиц КП определяется соотношением между их энергией теплового движения и энергией коагуляционного контакта  $E_k$ , определяемой с учетом величины предельного напряжения сдвига суспензий  $\tau_o$ , расстояния между частицами  $h$  (между частицами, находящимися в коагуляционном контакте 0,5–1,0 нм) и размером частиц КП  $r$  из соотношения:  $E_k = 4 \cdot \tau_o \cdot h \cdot r^2$  (табл. 5).

Таблица 5 – Параметры агрегативной устойчивости исследованных систем

Система	$h$ , нм	$\tau_o$ , Па	$r$ , мкм	$P, 10^{-8}$ Н	$E_k$ в	
					Дж, $10^{-18}$	Ед. $KT$
ФАЭД-50(20) + КП	0,75	360	5	3,6	27	6522
ФАЭД-50(20) + КП(ПВБ)	0,75	480	5	4,8	36	8696
ФАЭД-50(20) + КП(ПВБФ)	0,75	570	5	5,7	42,75	10326
ФАЭД-50(20) + КП(ПВЭ)	0,75	510	5	5,1	38,25	9239
ФАЭД-50(20) + КП(ПВФ)	0,75	540	5	5,4	40,5	9783

Примечание: значение  $E_k$  при 20 °C;  $P$  – прочность коагуляционного (через прослойку ФАЭД) контакта двух частиц КП со средним диаметром 5 мкм.

Как видно из данных табл. 5 значение энергии коагуляционного контакта для исследованных систем существенно (в 6552–10326 раз) превышает энергию теплового движения, что в значительной мере обуславливает склонность концентрированных фурано-эпоксидных суспензий (высоконаполненных композиций) к структурированию (формированию структур с различной степенью фрактальности). Модификация поверхности КП полиацеталами приводит к увеличению степени структурирования систем «ФАЭД – КП». По степени влияния модификаторы убывают в ряду ПВБФ – ПВФ – ПВЭ – ПВБ.

Характерным общим свойством свободнодисперсных систем является склонность к оседанию частиц дисперсной фазы – седиментация (табл. 6).

Скорость седиментации частиц дисперсной фазы  $U_1$  в среде реакционноспособных олигомеров оценивали по формуле:

$$U_1 = \frac{2 \cdot g \cdot (\rho - \rho_o) \cdot r^2}{9 \cdot \eta},$$

где  $\rho$ ,  $\rho_o$  – плотности частиц дисперсной фазы (кварцевого песка,  $\rho = 2650 \text{ кг/м}^3$ ) и дисперсионной среды (олигомера) соответственно;  $g$  – ускорение свободного падения,  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ;  $r$  – радиус частиц, м;  $\eta$  – динамическая вязкость среды, Па с.

Исследуемые материалы относятся к концентрированным системам ( $\varphi > 25$  об. долей), поэтому при оценке скорости седиментации  $U_2$  необходимо учитывать фактор

повышения сопротивления системы частиц движению жидкого олигомера по сравнению с сопротивлением единичной частицы:

$$U_2 = (1 - \frac{\varphi}{\varphi_{\max}})^{\lambda} \cdot U_1,$$

где  $\varphi$ ,  $\varphi_{\max}$  – степень наполнения и максимальная плотность упаковки, об. доли;  $\lambda$  – показатель, зависящий от типа дисперсной системы.

Способность к седиментации принято выражать через константу седиментации  $S$ , которая определяется скоростью седиментации. Для сферических частиц, к которым относится фракция кварцевого песка, эта константа равна:

$$S = \frac{2 \cdot r^2 (\rho - \rho_o)}{9 \cdot \eta},$$

где  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  – расчетное (для разбавленных и концентрированных систем) и экспериментальное время оседания частиц кварцевого песка в столбе жидкости (олигомера) высотой 2 см. соответственно, с.

Таблица 6 – Седиментационные характеристики исследованных систем

Олигомер	$\rho_o$ , кг/м <sup>3</sup>	$D_{эс}$ , мкм	$U_1$ , 10 <sup>-3</sup> , м/с	$U_2$ , 10 <sup>-3</sup> , м/с	$S$ , 10 <sup>-4</sup> , с	$t_1$ , с	$t_2$ , с	$t_3$ , с	ОС
ФАМ	1150	785	16,76	18,32	17,08	1,2	1,3	2,0	ПЛ
		515	7,21	9,75	7,35	2,8	2,9	3,5	ПЛ
		325	2,88	3,87	2,93	6,9	7,4	8,5	ПЛ
		187	0,95	1,15	0,97	21,0	22,2	25,0	ПЛ
		75	0,16	0,28	0,16	125,0	130	140,0	РХ
ФАЭД- 20(20)	1160	785	8,89	9,95	9,06	2,2	2,9	3,0	ПЛ
		515	3,82	4,21	3,89	5,2	5,7	7,0	ПЛ
		325	1,53	1,76	1,56	13,1	14,5	16,5	РХ
		187	0,51	0,69	0,52	39,2	42,3	45,0	РХ
		75	0,09	0,15	0,09	222,0	230	235,0	РХ
ФАЭД- 50(20)	1170	785	1,64	1,73	1,67	12,2	13,1	14,0	ПЛ
		515	0,71	0,74	0,72	28,2	30,5	32,5	ПЛ
		325	0,28	0,32	0,28	71,4	73,4	75,5	РХ
		187	0,09	0,11	0,09	222,2	228	230,0	РХ
		75	0,02	0,03	0,02	1000	1010	1060	РХ

Примечание: ОС – осадок; ПЛ – плотный, компактный; РХ – рыхлый.

В агрегативно-устойчивых системах седиментация частиц кварцевого песка происходит достаточно медленно с образованием плотного компактного слоя. Это обусловлено тем, что сформированные поверхностные слои препятствуют агрегированию частиц. При этом частицы кварцевого песка вследствие проскальзывания друг относительно друга переходят в положение с минимальной потенциальной энергией.

В агрегативно-неустойчивой системе процесс седиментации частиц кварцевого песка происходит более интенсивно вследствие образования агрегатов. Образующийся осадок имеет рыхлую структуру, занимает больший объем вследствие того, что вероятность сохранения частицами кварцевого песка того случайного расположения, в котором они оказались при первом контакте, очень высока. При этом силы сцепления между ними соизмеримы с силой тяжести или выше ее.

Существенное влияние на скорость седиментации, структуру осадка оказывает средний размер частиц кварцевого песка. Крупные частицы с диаметром 300 мкм и более в агрегативно-неустойчивых системах вследствие заметной силы тяжести образуют компактный, плотный осадок. Мелкие частицы (диаметр менее 200 мкм) в агрегативно-устойчивых системах образуют объемный, рыхлый осадок вследствие анизотропии образующихся первичных агрегатов или флоккул цепочечной или спиральной структуры.

Для того, чтобы твердые частицы КП суспензии «PCO – КП» не осаждались под действием силы тяжести и находились во взвешенном состоянии, импульс силы, вызывающий тепловое (броуновское) движение частиц КП, должен быть равен импульсу гравитации. При этом верхняя граница размера частиц КП в фурановых (мономер ФАМ) и фурано-эпоксидных (ФАЭД) PCO в интервале температур 20–80 °С находится в пределах 3,56–5,07 мкм.

Используя верхнюю границу размера частиц КП и скорость седиментации дисперсного наполнителя в исследованных PCO, можно достаточно точно определить режимы формования композитов с заранее заданными свойствами.

Таким образом, проведенный комплекс экспериментальных и расчетно-теоретических исследований позволяет целенаправленно регулировать структуру и свойства фурано-эпоксидных композиционных материалов строительного назначения на стадии формирования композитов.

#### Литература

1. Наполнители для полимерных композиционных материалов: Справочное пособие; Пер. с англ./Под ред. П.Г. Бабаевского. – М.: Химия, 1981.– 736 с.
2. Соломатов В.И., Бобрышев А.Н., Химмлер К.Г. Полимерные композиционные материалы в строительстве / Под ред. В.И. Соломатова.– М.: Стройиздат, 1988.– 312 с.
3. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. – 3-е изд. перераб.– Л.: Химия, 1987. – 264 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Napolniteli dlja polimernyh kompozicionnyh materialov: Spravochnoe po-sobie; Per. s angl. Pod red. P.G. Babaevskogo. – M.: Himija, 1981.– 736 p.
2. Solomatov V.I., Bobryshev A.N., Himmler K.G. Polimernye kompozicionnye materialy v stroitel'stve Pod red. V.I. Solomatova.– M.: Strojizdat, 1988.– 312 p.
3. Kouzov P.A. Osnovy analiza dispersnogo sostava promyshlennyh pylej i izmel'chennyh materialov. – 3-e izd. pererab.– L.: Himija, 1987. – 264 p.

УДК 678.5

Рассоха О.М., Черкашина Г.М., Алешко С.Є.

### **АГРЕГАТИВНА ТА СЕДИМЕНТАЦІЙНА СТІЙКІСТЬ ДИСПЕРСНИХ НАПОВНЮВАЧІВ В ФУРАНО-ЕПОКСИДНИХ РЕАКЦІЙНИХ СИСТЕМАХ**

Розглянуті питання агрегативної та седиментаційної стійкості дисперсних наповнювачів (кварцовий пісок, периклаз, каолін, карбонат кальція, графіт) в фурано-епоксидних реакційно здатних олігомерах. Наведені структурно-реологічні властивості досліджених наповнювачів.

Rassokha A.N., Cherckasyna A.N., Aleshko S.E.

**DISPERSE FILLER AGGREGATE AND SEDIMENTATION STABILITY  
FOR FURAN EPOXY REACTION SYSTEM**

Research results aggregate and sedimentation stability of disperse filler for furan epoxy polymer system are presented. Such filler as quarts sand, kaolin and graphite are considered.

Черкашенко М.В., Салыга Т.С.

**К ВОПРОСУ СИНТЕЗА СХЕМ ПНЕВМОГИДРОАГРЕГАТОВ**

**Постановка проблемы и анализ существующих решений.** Исследования, связанные с построением рациональных, минимальных по числу аппаратов современных схем пневмогидроагрегатов являются актуальными, так как способствуют снижению их стоимости, повышению быстродействия, упрощению наладки и обслуживания.

При синтезе пневмогидроагрегатов со сложным циклом работы, возможно, добиться значительного сокращения элементов при применении методов минимизации схем управления [1–3]. Однако при разбиении входной последовательности сигналов на блоки в некоторых циклах возможна ситуация с наличием нескольких вариантов разбиений.

**Цель исследования.** В данной статье предлагается метод синтеза схем гидропневмоагрегатов, с учётом неоднозначности разбиений входной последовательности на блоки при формировании уравнений, описывающих схему [1].

**Основная часть.** Метод с учётом неоднозначности разбиений входной последовательности рассмотрим на следующем примере.

В сельскохозяйственных машинах все большее значение приобретают установки, способные пересаживать многолетние деревья с развитой корневой системой. При этом необходимо обеспечить стопроцентную приживаемость пересаженных растений. Для этих целей служит машина для пересадки деревьев МПД 1800. Эта машина позволяет пересаживать деревья диаметром до 220 мм. Заменяя труд бригады из 10 человек и сохраняя при этом значительную часть корневой системы, достаточную для успешного выживания растения на новом месте. МПД 1800 представляет собой сложный механико-пневмогидравлический комплекс, способный полностью механизировать процесс пересадки деревьев. Так как при вырезании дерева из грунта, после установки машины и определения глубины резанья, машина выполняет ряд стандартных операций, не требующих вмешательства человека, то этот процесс возможно автоматизировать. Скорость и точность выполнения всех операций возрастёт, улучшится качество пересаживаемого материала и возрастёт вероятность выживания дерева. При этом будет исключена возможность ошибки оператора, которая может привести к порче саженца или поломке дорогостоящего оборудования. Рассмотрим цикл работы МПД 1800.

Цилиндр 1 (Ц1) отвечает за подъём гидравлической системы из кузова машины, Ц2 обеспечивает поворот системы в вертикальное положение, Ц3 раздвигает контур сектора ножей для помещения ствола в середину установки, Ц4 отвечает за выдвигание ножей и подрезки грунта.

МПД 1800 работает следующим образом. Цилиндр Ц1 по сигналу  $x_1=1$  поднимает всю систему из кузова машины  $z_1=1$ , одновременно второй цилиндр Ц2 поворачивает систему в вертикальное положение  $z_2=1$ . Далее по сигналу  $x_3=1$  и  $x_5=1$  Ц3 обеспечивает раздвижение ножей для помещения в середину установки ствола дерева  $z_3=1$ . Одновременно происходит опускание привода Ц1  $\bar{z}_1=1$ . Таким образом осуществляется установка привода в начальное положение для вырезания дерева из грунта. После этого, по сигналу  $x_2=1$  и  $x_7=1$  цилиндр Ц3 возвращается в исходное положение, закрывая контур ножей  $\bar{z}_3=1$  и цилиндр Ц4 выдвигает ножи, подрезая землю и корни  $z_4=1$ , а цилиндр



Ц2 поворачивает установку вместе с захваченной землёй в горизонтальное положение  $\bar{z}_2 = 1$ . По сигналу  $x_4=1$  и  $x_8=1$  под установку подъезжает платформа, цилиндр Ц3 раздвигает часть ножей  $z_3=1$  и одновременно цилиндр Ц2 разворачивает установку с захваченным деревом в вертикальное положение  $z_2=1$ . Дерево вместе с корневой системой перемещается на транспортировочную платформу. Для очистки установки от остатков земли по сигналу  $x_5=1$  и  $x_7=1$  привод переводится в горизонтальное положение цилиндром Ц2  $\bar{z}_2 = 1$  и выдвигаются ножи Ц4  $\bar{z}_4 = 1$ , которые чистятся о специальные кромки, которые прижимаются к ножам в этом положении. После этого по сигналу  $x_4=1$  и  $x_9=1$  ножи задвигаются для транспортировки  $\bar{z}_4 = 1$  и далее по сигналу  $x_8=1$  сводятся цилиндром Ц3  $\bar{z}_3 = 1$ .

Взаимодействие входных и исполнительных устройств показано в табл. 1.

Таблица 1

Наименование операции	Выходные сигналы	Входные сигналы	
		Начальное положение	Конечное положение
Подъём установки	$z_1$	$x_2$	$x_3$
Поворот установки	$z_2$	$x_4$	$x_2$
Раздвижение сектора ножей	$z_3$	$x_6$	$x_2$
Выдвижение ножей	$z_4$	$x_8$	$x_2$

Воспользуемся методом проектирования [2,3] и построим граф операций.

Вершины графа отвечают состояниям технологического процесса, а дуги — переходам из одного состояния в другое. На дугах записываются условия перехода в виде  $p_j \mapsto z_\xi$ , которое выражает собой: входной набор  $p_j$ , состоящий из сигналов множества  $X$ , влечёт за собой появление выходных сигналов выходного набора  $z_\xi$ , состоящего из выходных сигналов множества  $Z$ , изменивших свое состояние на данном переходе. Слева от запятой входного набора записываются прямые и инверсные сигналы, вызывающие переход, а справа – прямые сигналы, не влияющие на него. В первой вершине записывается входной набор, характеризующий исходное состояние ИУ.

Граф операций представлен на рис. 1

Выпишем последовательность входных наборов, которая имеет вид:

$$p_1 = \emptyset, x_2 x_4 x_6 x_8; p_2 = x_1, x_2 x_4 x_6 x_8; p_3 = x_3 x_5, x_6 x_8; p_4 = x_2 x_7, x_5 x_8; p_5 = x_6 x_9, x_2 x_5; p_6 = x_4 x_8, x_2 x_6; p_7 = x_5 x_7 x_2 x_8; p_8 = x_4 x_9, x_2 x_7; p_9 = x_2 x_8, x_4 x_7.$$

Одинаковые набор отметим одинаковыми надстрочными цифрами:

$$\{ p_1^1, p_2, p_3, p_4^2, p_5, p_6^1, p_7^2, p_8, p_9 \}.$$

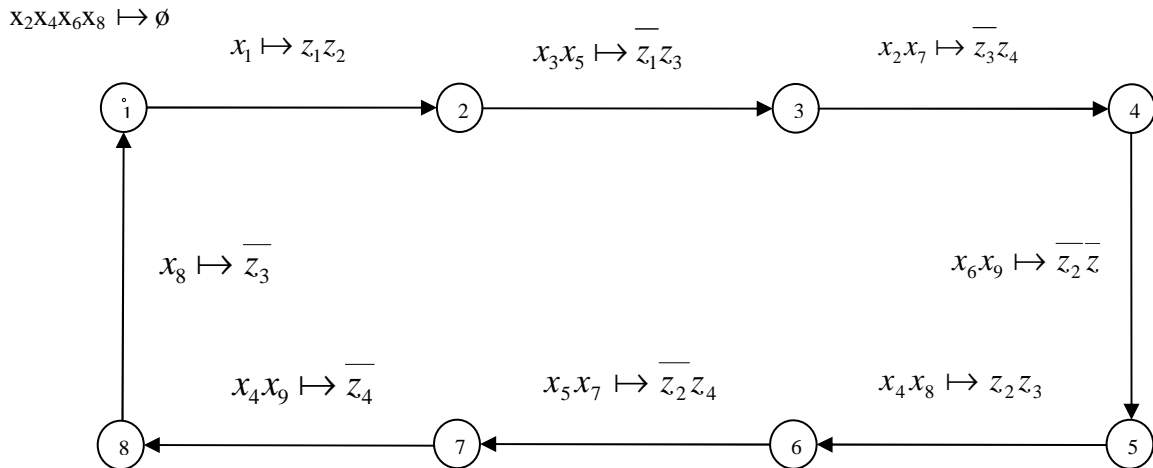


Рисунок 1 – Граф операций

Упорядоченное множество входных наборов  $P$  должно быть разбито на минимальное число упорядоченных непересекающихся подмножеств входных наборов  $\pi = \{B_a\}$  ( $\cup B_a = P$ ,  $a B_a \cap B_\beta = \emptyset$ ) таким образом, чтобы последние элементы двух соседних подмножеств не были одинаковыми, т.е. не должно быть

$$\pi = \dots, \{ \dots, p_j \}, \{ \dots, p_j \}, \dots, \quad (1)$$

а так же последний элемент предыдущего подмножества не должен быть таким же, как любой элемент последующего ему подмножества, т.е. не должно быть

$$\pi = \dots, \{ \dots, p_j \}, \{ \dots, p_j, \dots \}, \dots \quad (2)$$

Следует оговорить, что последующим подмножеством последнего подмножества разбиения считается первое его подмножество. Тогда количество внутренних состояний СУ определяется как количество полученных таким образом подмножеств. Каждому блоку разбиения  $\pi$  поставить в соответствие один элемент памяти командоаппарата. Причем включение  $S_i$   $i$ -го триггера влечет за собой появление входного набора  $p_j \in B_a$ , являющегося последним в блоке  $B_a$ , т.е. справедливо соотношение  $p_j \mapsto S_j$ . Однако разбиение входных наборов по описанному правилу неоднозначно и влечет за собой различное число логических элементов, составляющих проектируемую схему, что легко показать. Разбиение  $\pi$  однозначно, если одинаковые наборы  $p_j$  следуют в упорядочении через один, т.е.  $\{ \dots, p_j, p_\xi, p_j, \dots \}$ .

Пусть имеем два одинаковых набора следующих через один в упорядочении (1),(2). По правилу разбиения они не могут быть включены в одно подмножество. Следовательно, такое разбиение  $\pi$  должно содержать число подмножеств  $n \geq 2$ .

Рассмотрим возможные варианты разбиений: разбиение  $\pi = \{ \{ \dots, p_j \}, \{ p_\xi, p_j, \dots \} \}$  не удовлетворяет условию (2); разбиение  $\pi = \{ \{ \dots, p_j \}, \{ p_\xi \}, \{ p_j, \dots \} \}$  не удовлетворяет условию минимальности подмножеств. Итак, возможно единственное разбиение  $\pi = \{ \{ \dots, p_j, p_\xi \}, \{ p_j, \dots \} \}$ . Аналогичное рассуждение можно построить при существовании нескольких одинаковых, следующих через один входных наборов.

В нашем случае получаем два возможных разбиения  $\pi_1 = \{ \{p_9, p_1^1, p_2, p_3, p_4^2, p_5\}, \{p_6^1, p_7^2, p_8\} \}$  и  $\pi_2 = \{ \{p_1^1, p_2, p_3, p_4^2, p_5\}, \{p_6^1, p_7^2, p_8, p_9\} \}$  Следовательно, СУ имеет два внутренних состояния 1 и 2.

Построим матрицу R, строки которой отвечают входным наборам, а столбцы – всевозможным разбиениям  $\pi$  входных наборов. Тогда элемент, стоящий на пересечении строки j и столбца p матрицы R,  $r_{jp} = m$ , если набор  $p_j$  в разбиении  $\pi$  относится к внутреннему состоянию m. Так, матрица R в нашем случае имеет вид

$$R = \begin{matrix} & \pi_1 & \pi_2 \\ \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ p_4 \\ p_5 \\ p_6 \\ p_7 \\ p_8 \\ p_9 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 2 & 2 \\ 2 & 2 \\ 2 & 2 \\ 2 & 2 \\ 2 & 2 \\ 1 & 1 \\ 1 & 1 \\ A_1 & 1 \\ 2 & A_2 \end{vmatrix} \end{matrix}$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – состояния возможных переключений ЭП.

Так как последние наборы в каждом подмножестве разбиений действуют в двух соседних состояниях (в своем и последующем), а последующим последнему набору упорядоченного множества наборов P является первый набор из P, то такими есть наборы  $p_5$  и для разбиения  $\pi_1$ – $p_8$ , а для разбиения  $\pi_2$ – $p_9$ . Для синтеза уравнений построим матрицу соответствий МС

	$x_1$	$x_3x_5$	$\overline{x_2x_7y}$	$x_6x_9$	$x_4x_8y$	$x_5y$	$x_4x_9$	$x_2x_8$			
* $x_2x_4x_6x_8$	$p_1$	0	0	0	0	0	0	1	$\emptyset$	2	2
$x_1, x_2x_4x_8$	$p_2$	1	0	0	0	0	0	1	$\overline{z_1z_2}$	2	2
$x_3x_5, x_4x_8$	$p_3$	0	1	0	0	0	0	0	$\overline{z_1z_3}$	2	2
** $x_2x_7, x_6x_8$	$p_4$	0	0	1	0	0	0	1	$\overline{z_3z_4}$	2	2
$x_6x_9, x_2x_5$	$p_5$	0	0	0	1	0	0	0	$\overline{z_2z_4}$	2	2
* $x_4x_8, x_2x_6$	$p_6$	0	0	0	0	1	0	1	$\overline{z_2z_3}$	1	1
** $x_5x_7, x_2x_8$	$p_7$	0	0	0	0	0	1	1	$\overline{z_2z_4}$	1	1
$x_4x_9, x_2x_7$	$p_8$	0	0	$A_1$	0	0	0	1	$\overline{z_4}$	2	1
$x_8, x_2x_4x_7$	$p_9$	0	0	$A_2$	0	0	0	1	$\overline{z_3}$	2	2

Разбиение  $\pi_1$  требует дополнительное удлинение сигналом  $x_5$  и в дальнейшем делает функции  $\overline{z_3}$  и  $z_4$  сложнее. Разбиение  $\pi_2$  не требует удлинения сигналом  $x_5$  и поэтому в конечном итоге выбираем разбиение  $\pi_2$ .

Уравнения имеют вид:

$$z_1 = x_1; z_2 = x_1 + x_4x_8y; z_3 = x_3x_5 + x_4x_8y; z_4 = x_2x_7\overline{y} + x_5x_7y; \overline{z_1} = x_3x_5; \overline{z_2} = x_6x_9 + x_5x_7y; \overline{z_3} = x_2x_7\overline{y} + x_2x_8; \overline{z_4} = x_6x_9 + x_4x_9; R = x_2x_8; S = x_6x_9.$$

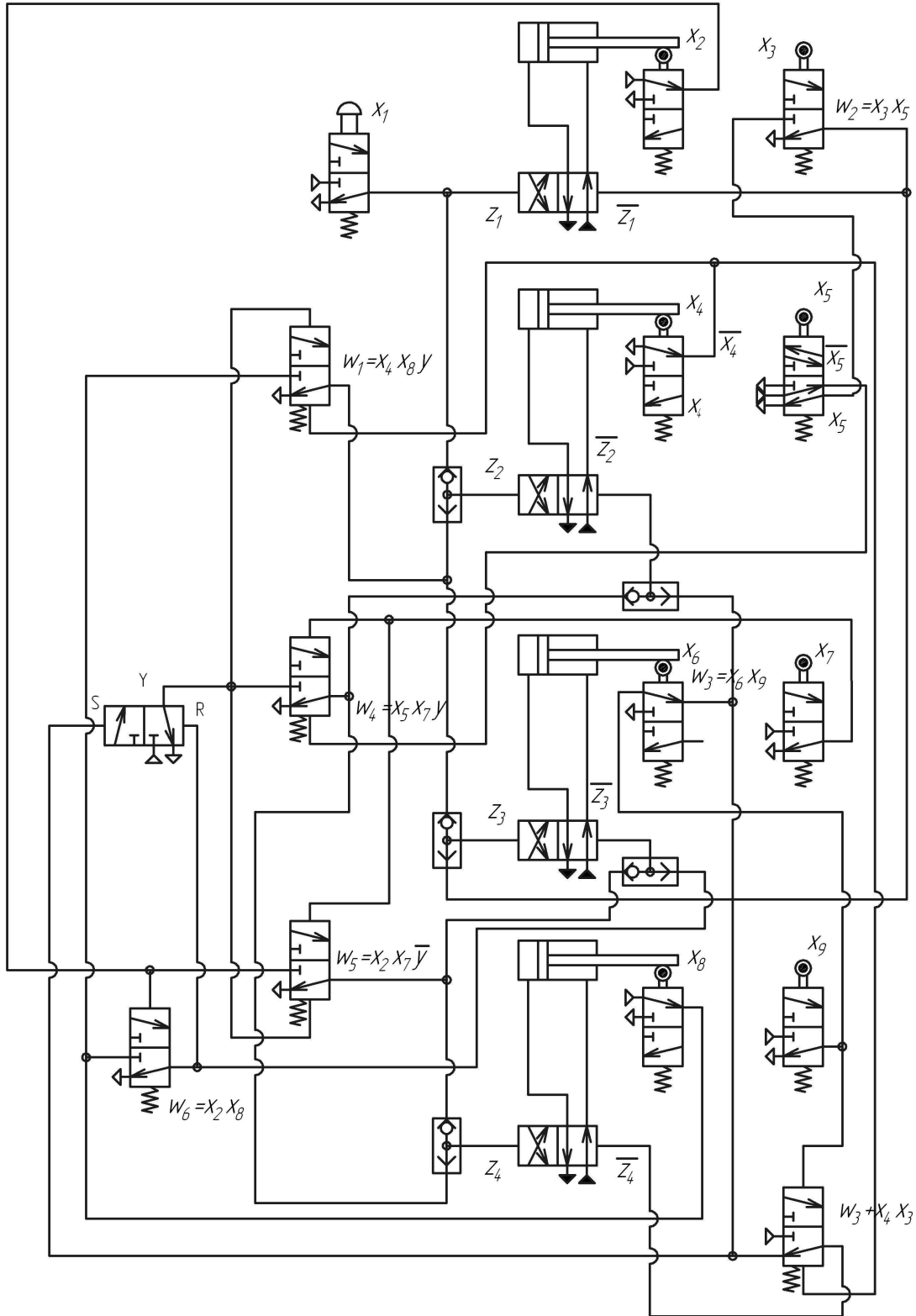


Рисунок 2 – Схема пневмогідроагрегата машини для пересадки деревьев

Систему уравнений представим в виде:

$$w_1=x_4x_8y; w_2=x_3x_5; w_3=x_6x_9; w_4=x_5x_7y; w_5=x_2x_7\bar{y}; w_6=x_2x_8; z_1=x_1; z_2=x_1+w_1; z_3=w_1+w_2; \\ z_4=w_4+w_5; \bar{z}_1=w_2; \bar{z}_2=w_3+w_4; \bar{z}_3=w_5+w_6; \bar{z}_4=w_3+x_4x_9; S=w_3; R=w_6,$$

где  $w_1 \div w_6$  – наиболее повторяющиеся общей части уравнения;  $S, R$  – функции переключения «памяти»;  $z_1 - z_2$  – функции выходов.

По полученной системе уравнений строим схему, показанную на рис. 2.

**Выводы.** Таким образом, в статье показан метод нахождения рационального варианта разбиений входной последовательности сигналов, при синтезе схем пневмогидроагрегатов. На основании результатов данных исследований в более полной мере осуществляется минимизация уравнений, описывающих СУ, и тем самым упрощается структура проектируемой схемы.

#### Литература

1. Cherkashenko M. and ets. Synthesis of discrete control systems of industrial robots // Automation and Remote Control (USA). – 1981.–№5.–P. 148–153.
2. Cherkashenko M. Computer-aided design of discret control fluid power system. 2 Internationales Fluidtechnishes colloquium. Germany. 15–17 marz. – 2000. Band 1. – P. 495–500.
3. Cherkashenko M. Synthesis of schemes of hydraulic and pneumatic automation. International Fluid Power Symposium in Aachen, Germany. 20-22 March. 2006.– Fundamentals. The report N1.– P. 147–154.

#### Bibliography (transliterated)

1. Cherkashenko M. and ets. Synthesis of discrete control systems of industrial robots Automation and Remote Control (USA). – 1981.–#5.–P. 148–153.
2. Cherkashenko M. Computer-aided design of discret control fluid power system. 2 Internationales Fluidtechnishes colloquium. Germany. 15–17 marz. – 2000. Band 1. – P. 495–500.
3. Cherkashenko M. Synthesis of schemes of hydraulic and pneumatic automation. International Fluid Power Symposium in Aachen, Germany. 20-22 March. 2006.– Fundamentals. The report N1.– P. 147–154.

УДК62-522

Черкашенко М.В., Салига Т.С.

#### **ДО ПИТАННЯ СИНТЕЗУ СХЕМ ПНЕВМОАГРЕГАТИВ**

Пропонується метод проектування пневмогідроагрегатів, що враховує неоднозначність розбиття послідовності вхідних наборів

Cherkashenko M.V., Salyga T.S.

**TO THE QUESTION ABOUT SYNTHESIS OF PNEUMATIC HYDRAULIC UNIT'S SCHEMES**

The designing method of pneumatic hydraulic unit is offered in this article. This method is taking into account ambiguity of consecutive entering sets splitting.

УДК 628.477:

Нзюка А.М., Трошин А.Г., Ведь В.Е.

### ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОМЫШЛЕННОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ПОКРЫШЕК В ЦЕМЕНТНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Процесс получения клинкера является энергоемким производством: на получение 1 тонны клинкера, необходимо затратить 3–6 МДж тепловой энергии, которые составляют 30–40 % производственных расходов.

Обычно на предприятиях цементной промышленности в качестве топлива используются невозобновляемые полезные ископаемые: уголь, мазут и природный газ. Наиболее ценными видами топлива из-за высокой теплотворной способности и эксплуатационных преимуществ являются природный газ и мазут (табл. 1). Они использовались в период общемирового роста цементного производства в 60–90-х годах и по настоящее время.

В связи с мировым энергетическим кризисом в 70-х годах и ростом цен на нефтепродукты в настоящее время появилась необходимость изыскания других видов топлива. В качестве замены дефицитного мазута и природного газа каменный уголь получил широкое применение как более дешевое топливо. Постепенный переход цементной промышленности с мазута и природного газа на каменный уголь происходит сейчас по всему миру. В последнее время, в связи с общим подъемом цен на энергоресурсы в цементном производстве все чаще пытаются совместно сжигать основное топливо с техногенными углеродсодержащими отходами, например автомобильными покрышками.

Цель настоящей работы является выявление преимуществ использования автомобильных покрышек в сравнении с традиционными для цементной промышленности видами топлив, а также указание основных способов подачи покрышек в печь.

Автомобильные покрышки имеют теплоту сгорания от 28 до 41 МДж/кг и по этому показателю превосходят уголь, приближаясь к мазуту (табл.1).

Таблица 1–Теплотворная способность и содержание углерода для разных видов топлив

Вид топлива	Содержание углерода в горючей массе, %	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Содержание серы, %
Мазут	81–85	40–42	до 1,5
Природный газ	70–75	30–34	–
Уголь	75–90	20–27	0,4–4,5
Автомобильная покрышка	78–82	28–41	1–1,3

Сера является одним из вредных выбросов любого производства, использующего ископаемые виды топлива. Учитывая, что содержание серы в угле может быть в 3 раза больше, чем в покрышке, снижение содержания серы является важным преимуществом.

По сравнению с углем автомобильная покрышка имеет более низкое содержание углерода в горючей массе 78–82 % , в то время как в угле содержится 75–90 %.

Исследования газообразных выбросов при сжигании различных топлив [2], показывают, что количество выбросов CO<sub>2</sub> при сжигании угля гораздо больше, чем при сжигании автомобильных покрышек (табл. 2). Это связано с уменьшением соотношения «углерод-водород» и поэтому, частичная замена угля покрышками (30 %) существенно снижает количество выбросов CO<sub>2</sub>.

Таблица 2 – Выбросы CO<sub>2</sub> при сжигании различных видов топлив

Вид топлива	Выбросы CO <sub>2</sub> на тонну клинкера, кг
100 % уголь	317
100 % автомобильные покрышки	190
30 % покрышек+80 % угля	279,5

Для эффективного использования покрышек в качестве топлива необходимо определить температурный режим их сжигания и место подачи в технологическом цикле обжига клинкера. Из проведенного нами термогравиметрического анализа (рис. 1) следует, что эффективное сгорание покрышек происходит при температуре 600 °C и выше.

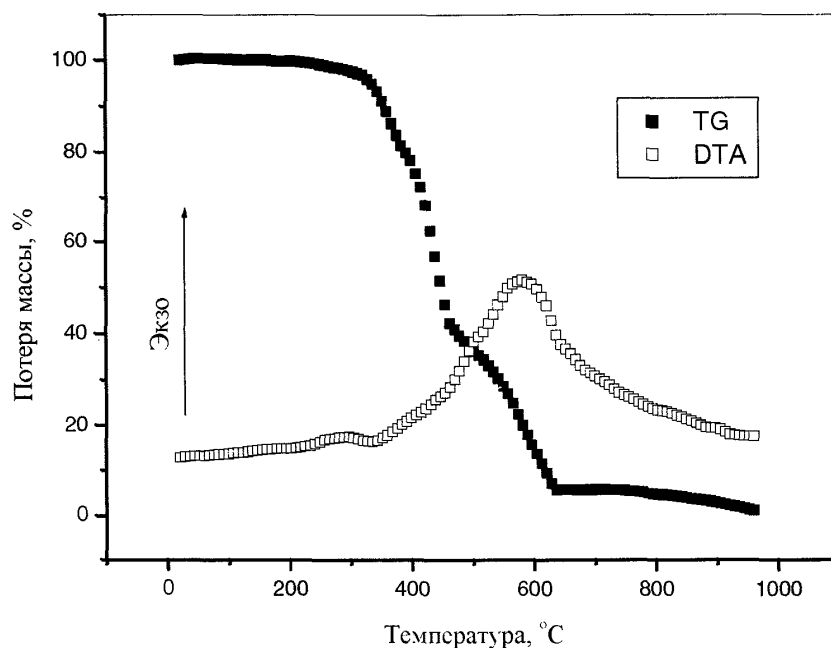


Рисунок 1 – Дериватограмма материала автомобильной покрышки при скорости нагрева 5 °C/мин. TG – изменение потери массы, %, DTA – скорость изменения потери массы

Исходя из этого, можно предложить различные места подачи покрышек в печь в зависимости от способа обжига клинкера (рис. 2). Возможны также и другие варианты, когда для сжигания покрышек или других альтернативных видов топлива в технологическую схему, добавляется специальное оборудование [10, 11].

Выбор мест подачи покрышек обусловлен температурой не ниже 800 °C, а также тем, что выделяющиеся при разложении покрышек газы будут еще достаточно долго иметь высокую температуру при одновременном контакте с поверхностью раздроблен-



ного горячего материала, который обжигается. Это обеспечит полное сгорание органической составляющей покрышки, а также окисление (а практически можно назвать сгорание) железного корда покрышки. Окислы железа, как и другие окиси металлов, входящих в состав покрышки, практически не влияют на химию твердения цемента. Однако эти окиси, по мнению [1,3,6], способствуют снижению температуры плавления шихты и интенсификации спекания и повышению качества клинкера.

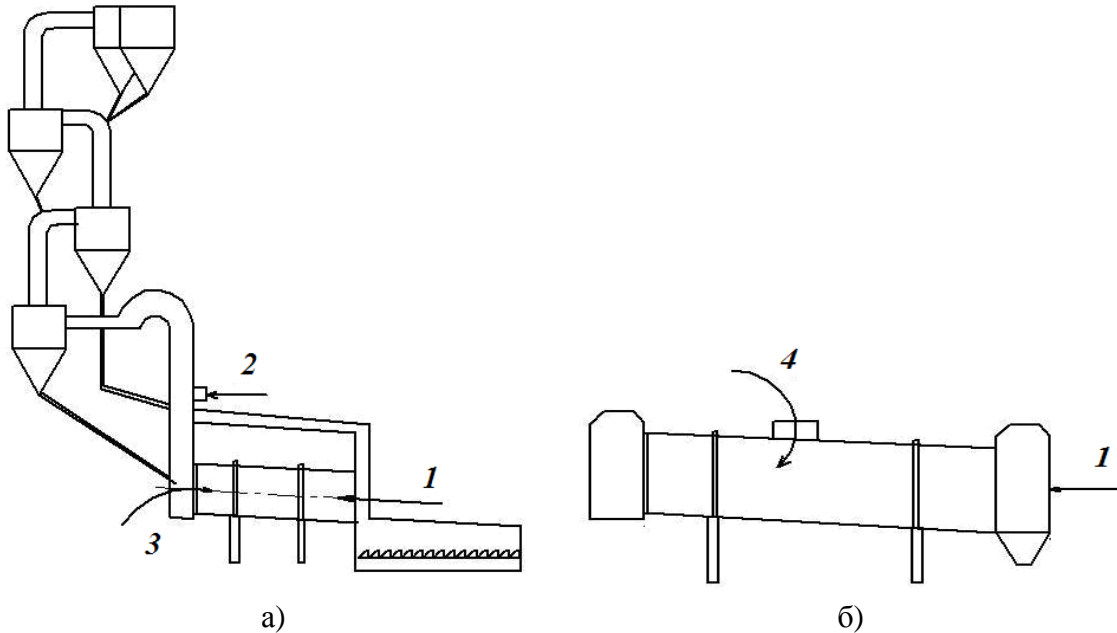


Рисунок 2 – Места подачи покрышек в цементную печь

- а) при сухом способе производства; б) при мокром способе производства  
 1 – со стороны подачи основного топлива; 2 – перед четвертой ступенью циклонных теплообменников, 3 – со стороны загрузки сырья в печь;  
 4 – в середину печи в зону окончания кальцинации

**Вывод:** автомобильные покрышки можно использовать как добавку к основному топливу при обжиге клинкера, поскольку по теплотворной способности они превосходят уголь, содержание серы в них ниже, чем в угле, а повышенное содержание железа в покрышках способствует повышению качества клинкера. При этом количество выбросов  $\text{CO}_2$  существенно уменьшается.

#### Литература

1. Копелиович, В.М. Топлива цементной промышленности [Текст]: –учеб / В.М. Копелиович, О.И. Авраменко, А.И.Здоров. –М: Стройиздат, 1984. –157 с.
2. Positioning used tires as a major fuel source; Reference values and characteristic protocols [Text]: Research and development /Aliapur–France,2009–19 pg.
3. Terry Gray. Tire derived fuel: Environmental characteristics and performance [Text]/ Terry Gray The first Northeast regional scrap tire conference.–2004.– June.
4. Terry Gray. Tire derived fuel: an environmental friendly resource Rubber Recycling [Text]/ Terry Gray Symposium74th Annual Meeting of the Rubber Association of Canada. – 1994.– March.–16 pg.

5. Michael Blumenthal. The use of scrap tires in rotary cement kiln [text]/ Michael Blumenthal Scrap tire management council.– 2005.–16 pg.
6. Utilise the power of alternative fuels [Text]: Research and development/ FLSmidth.–Denmark: 2003.–4 pg.
7. Tire derived fuel [Text]: Portland cement association sustainable manufacturing sheet/ Portland cement association.– Washington DC,USA,2005.–4 pg.
8. Michael Blumenthal. The use of scrap tires in US cement factories [text]/ Michael Blumenthal World cement.–1992.– December. –16 pg.
9. Левченко П.В. Расчеты пещей и сушил силикатной промышленности [Текст]/ П.В. Левченко.–М.: Высшая школа,1968.–215 с.
10. HOTDISK technology [Text]: Research and development/ FLSmidth.–Denmark: 2003.– 4 pg.
11. TIRE GUNNAX [Text]: Research and development/ FLSmidth.–Denmark: 2007.– 8 pg.
12. Ходоров Е.И. Печи цементной промышленности [Текст] / Е.И. Ходоров.–Л.: Стройиздат,1968.–455 с.

Bibliography (transliterated)

1. Kopeliovich, V.M. Topliva cementnoj promyshlennosti [Tekst]: –ucheb V.M. Kopeliovich, O.I. Avramenko, A.I.Zdorov. –M: Strojizdat, 1984. –157 p.
2. Positioning used tires as a major fuel source; Reference values and characteristic protocols [Teht]: Research and development Aliapur–France,2009–19 pg.
3. Terry Gray. Tire derived fuel: Environmental characteristics and performance [Teht] Terry Gray The first Northeast regional scrap tire conference.–2004.– June.
4. Terry Gray. Tire derived fuel: an environmental friendly resource Rubber Recycling [Teht] Terry Gray Symposium74th Annual Meeting of the Rubber Association of Canada. – 1994.– March.–16 pg.
5. Michael Blumenthal. The use of scrap tires in rotary cement kiln [teht] Michael Blumenthal Scrap tire management council.– 2005.–16 pg.
6. Utilise the power of alternative fuels [Text]: Research and development FLSmidth.–Denmark: 2003.–4 pg.
7. Tire derived fuel [Text]: Portland cement association sustainable manufacturing sheet Portland cement association.– Washington DC,USA,2005.–4 pg.
8. Michael Blumenthal. The use of scrap tires in US cement factories [teht] Michael Blumenthal World cement.–1992.– December. –16 pg.
9. Levchenko P.V. Raschety peechej i sushil silikatnoj promyshlennosti [Tekst]/P.V. Levchenko.–М.: Vysshaja shkola,1968.–215 p.
10. HOTDISK technology [Text]: Research and development FLSmidth.–Denmark: 2003.– 4 pg.
11. TIRE GUNNAX [Text]: Research and development FLSmidth.–Denmark: 2007.– 8 pg.
12. Hodorov E.I. Pechi cementnoj promyshlennosti [Tekst] E.I. Hodorov.–L.: Strojizdat,1968.–455 p.

УДК 628.477

Нзіока А.М., Трошин О.Г., Ведь В.Є.

**ПЕРСПЕКТИВИ ПРОМИСЛОВОГО ВИКОРИСТАННЯ АВТОМОБІЛЬНИХ  
ПОКРИШОК В ЦЕМЕНТНОМУ ВИРОБНИЦТВІ**

Розглянуто питання можливості використання відпрацьованих автомобільних покришок замість частини традиційних видів палива, які використовуються в промисловому процесі виробництва цементу. Показано, що по теплоутворенню матеріал покришок перевищує вугілля. Вміст сірки в них нижче, ніж у вугіллі, а підвищений вміст заліза в покришках сприяє підвищенню якості цементного клінкеру. При цьому кількість викидів CO<sub>2</sub> при виробництві цементу явно зменшується.

Nzioka A.M., Troshin A.G., Ved V.E.

**PERSPECTIVE OF INDUSTRIAL UTILISATION WASTE TIRES IN CEMENT  
PRODUCTION**

The possibility of utilizing waste tires partly as a substitute of traditional types of fuels used in cement production has been considered. It has been shown that lower heat value for waste tires exceeds that of coal, sulfur composition in waste tires is lesser than in coal. Other than that, increased composition of iron in them aids in increasing clinker's quality. Consequently, amount of CO<sub>2</sub> produced in cement production substantially reduces.

УДК 621.165

Ефимов А.В., Каверцев В.Л., Гаркуша Т.А.

**МЕТОДЫ И МОДЕЛИ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ДИАГНОСТИКИ  
ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ,  
ПЛАНИРОВАНИЯ РЕМОНТОВ И РАСЧЕТА  
КОЭФФИЦИЕНТОВ ГОТОВНОСТИ ЭНЕРГООБЛОКОВ ТЭС И АЭС**

*Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»*

Среди наиболее важных и актуальных проблем тепловой и атомной энергетики особое место занимают задачи рационального планирования и организации ремонтных работ на энергоблоках электростанций и расчета их коэффициентов готовности на основе результатов диагностики технического состояния оборудования. Решение этих задач в практике эксплуатации энергоблоков ТЭС и АЭС дает возможность повысить экономическую эффективность проведения ремонтных работ и определить оптимальный резерв мощности энергосистемы, необходимый для компенсации недовыработки электроэнергии из-за простоя энергоблоков во время ремонтов, обеспечив, таким образом, стабильность работы энергосистемы [1–3].

В настоящей статье предложены методы, модели и подходы к решению этих актуальных задач, которые могут быть использованы для разработки специализированных интеллектуальных программно-технических средств, входящих в АСУ ТП энергоблоков ТЭС и АЭС.

Техническое состояние оборудования энергоблока в период эксплуатации определяется значениями ряда диагностических функций  $F_i, i = \overline{1, m}$ , которые являются мерами качества его функционирования в момент времени  $\tau_j, j = \overline{\tau_0, \tau}$ . Автоматизированную диагностику технического состояния оборудования энергоблока ТЭС или АЭС можно проводить с помощью математических моделей технологических процессов, протекающих в оборудовании, которые объединены в единую имитационную модель энергоблока, достаточно хорошо описанную в работах [4–6]. Отметим лишь, что единая имитационная модель энергоблока, организованная в виде логико-числовых операторов расчета параметров технологических процессов в его оборудовании, позволяет определять технико-экономические показатели работы энергоблока и взаимное влияние параметров оборудования. При таком подходе процесс автоматизированной диагностики технического состояния оборудования сводится к следующей процедуре:

1. Планирование и организация некоторой серии проверок  $\Pi\{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m\}$ , которые представляют собой численные эксперименты на единой имитационной модели энергоблока  $A_i, i = \overline{1, m}$  для всего диагностируемого оборудования;

2. Определение во время эксплуатации на основании показаний контрольно-измерительных приборов системы тепловой автоматики и измерений энергоблока значения входного воздействия  $Y_i, i = \overline{1, m}$ , которое в качестве исходных данных поступает в имитационную модель энергоблока  $A_i$ , и отклика модели на это воздействие как зна-

чения диагностической функции  $F_i$  (результат проверки). С этой целью предварительно решается задача оптимизации выбора проверок, определяющих техническое состояние оборудования энергоблока, которая состоит в том, чтобы общее количество проверок было минимальным  $\Pi \rightarrow \min$ , а каждая проверка  $\pi_i, i = \overline{1, m}$  включала бы в себя максимально возможное количество информации  $I_{\pi_i} \rightarrow \max$ . Полное количество информации, содержащей алгоритм проверок  $\Pi$  относительно технических состояний оборудования энергоблока  $S$ , равно

$$I_{i \rightarrow S} = I_{\pi_1} + I_{\pi_2/\pi_2} + \dots + I_{\pi_i/\pi_{i-1}} \rightarrow S.$$

3. Сопоставление значений диагностических функций  $F_i$ , полученных в результате численного эксперимента на имитационной модели энергоблока, с их измеренными и нормативными значениями с целью диагностического вывода о причинах и факторах изменения технического состояния оборудования и определения времени, оставшегося до его отказа.

В общем случае, при диагностике технического состояния оборудования энергоблока с помощью его имитационной модели в качестве диагностической выступает многопараметрическая функция  $F = F(\tau)$ , которая характеризует влияние изменения во времени  $\tau$  вектора параметров оборудования  $x = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ , отражающих ухудшение эксплуатационных характеристик в межремонтный период, на эффективность функционирования энергоблока. Имитационная модель энергоблока позволяет получить зависимости, которые прогнозируют влияние изменения каждого из параметров  $x_i$  на  $F$  во времени  $\tau$ :

$$F = F_i(x_i(\tau)), i = \overline{1, m}.$$

Поскольку прогнозируемые процессы изменения эксплуатационных характеристик оборудования энергоблока в межремонтный период представляют собой случайные функции времени, для их описания можно применить математический аппарат теории случайных процессов. В этом случае при условии нормального распределения для фиксированного момента времени  $\tau = \tau_j, j = \overline{\tau_0, \tau}$ , случайный процесс  $x_i(\tau)$  превращается в случайную величину  $x = x_i(\tau_j)$ , которая характеризуется одномерной плотностью вероятностей  $f(x)$ .

Результатом вероятностного прогнозирования изменения параметров оборудования энергоблока является рассчитанная для него вероятность работоспособного состояния

$$P_{ip}(x_i(\tau_j) < g_i) = \int_{x_{i \min}}^{x_{i \max}} f(x_i, \tau_j) dx, i = \overline{1, m}, j = \overline{\tau_0, \tau},$$

где  $f(x_i, \tau_j)$  – известная плотность вероятностей процесса;  $g_i$  – гранично допустимое значение  $x_i$ .

Единая имитационная модель энергоблока позволяет определить совокупное влияние изменения во времени  $k$  параметров оборудования энергоблока на показатели его работы:

$$F_{\Sigma} = \sum_{i=1}^k F_i(x_i(\tau_j)), i = \overline{1, m}; k \leq m; j = \overline{t_0, \tau}.$$

Вероятность этого влияния составляет

$$P_{F_{\Sigma}} = \prod_{i=1}^k P_{ip}(x_i(\tau_j)), i = \overline{1, m}; k \leq m; j = \overline{t_0, \tau}.$$

Измерение технологических параметров с помощью контрольно-измерительных приборов в процессе эксплуатации энергоблока проводится обычно в условиях различных случайных помех и погрешностей. Учитывая это, результаты измерения многопараметрической диагностической функции  $F$  в фиксированный момент времени  $\tau_j$  на действующем оборудовании можно рассматривать как интервальное оценивание, то есть как интервал между статистиками, которые содержат с определенной вероятностью истинное значение  $F$ . Таким образом, измеряемую функцию  $F$  можно рассматривать как случайную величину из выборки измерений  $n$  с неизвестным средним значением  $\mu$ . Минимальное и максимальное значения функции  $F$  в выборке  $n$  будут соответственно нижней и верхней границами доверительного интервала  $F_{\min} \leq F \leq F_{\max}$ , а величина  $(1 - \alpha)$  – доверительной вероятностью. Известно, что в этом случае величина  $\left(\bar{F} - \frac{\mu}{S\sqrt{n}}\right)$  подлжит  $t$ -распределению Стьюдента с  $(n - 1)$  степенями свободы [7]. Здесь  $\bar{F}$  – выборочное среднее значение результатов измерений многопараметрической функции  $F$ , то есть  $F = \frac{1}{n} \sum_{r=1}^n F_r$ , а  $S$  – выборочная дисперсия

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{r=1}^n (F_r - \bar{F})^2.$$

Тогда процентный доверительный интервал для диагностической функции  $F$  принимает вид

$$\mu = F \pm t_{n-1}^{\alpha/2} S \sqrt{n},$$

где  $t_{n-1}^{\alpha/2}$  – верхняя (критическая) процентная точка  $t$ -распределения с  $(n - 1)$  степенями свободы, то есть такая, при которой вероятность значений, превышающих  $t_{n-1}^{\alpha/2}$ , равна  $\alpha/2$ .

Это положение используется для построения по результатам измерений целой серии доверительных интервалов диагностической функции  $F$ , которые отличаются

один от другого вероятностью нахождения значений этой функции  $P_F$  в каждом из интервалов

$$P_F \left( -t_{n-1}^{\alpha/2} \leq \frac{\bar{F} - \mu}{S \sqrt{n}} \leq t_{n-1}^{\alpha/2} \right) = 1 - \alpha.$$

В процессе диагностики проводится сравнение осредненного результата измерений диагностической функции  $F_{\text{изм}}$  и значения этой же функции  $F_{\Sigma}$ , рассчитанного с помощью единой имитационной модели энергоблока, представляющего собой сумму влияния отдельных возможных причин (положительный результат проверки  $\pi_j$ ) в момент времени  $\tau_j$ , который соответствует проведенным измерениям. Для этого используется статистическая теория проверки альтернативных гипотез

$$\begin{cases} H_0 : F_{\Sigma} = \bar{F}_{\text{изм}} \\ H_1 : F_{\Sigma} \neq \bar{F}_{\text{изм}} \end{cases}.$$

Гипотеза  $H_0$  отклоняется, если абсолютное значение  $t$ -распределения Стьюдента, которое равно  $|t_0| = \left| \frac{F_{\Sigma} - \bar{F}_{\text{изм}}}{S \sqrt{n}} \right|$ , превышает значение критической процентной точки  $t_{n-1}^{\alpha/2}$ , то есть если выполняется неравенство  $|t_0| > t_{n-1}^{\alpha/2}$ . В этом случае в процессе диагностики делается вывод, что  $\bar{F}_{\text{изм}} \neq F_{\Sigma}$ , а величина  $|F_{\Sigma} - \bar{F}_{\text{изм}}| = \delta F$  используется для принятия решения о причинах, которые имели влияние на техническое состояние оборудования. Чем меньше  $\delta F$ , тем больше вероятность того, что именно эти причины изменили состояние оборудования. Более вероятными будут те причины, при которых  $F_{\Sigma}$  попадает в границы доверительного интервала

$$\varepsilon = \pm t_{n-1}^{\alpha/2} S \sqrt{n},$$

где вероятность возможной ошибки  $\alpha$  минимальна.

Вероятность принятия решения в результате диагностики равна

$$P = (1 - \alpha) \prod_{i=1}^k P_{i_p} (x_i(\tau_j)), i = \overline{1, m}; k \leq m; j = \overline{\tau_0, \tau}.$$

При выполнении гипотезы  $H_0$ , то есть в случае, когда  $F_{\Sigma} = \bar{F}_{\text{изм}}$ , вероятность принятия решения будет максимальной, так как вероятность ошибки  $\alpha = 0$ , и будет равна

$$P = \prod_{i=1}^k P_{i_p} (x_i(\tau_j)), i = \overline{1, m}; k \leq m; j = \overline{\tau_0, \tau}.$$

Описанный метод диагностики технического состояния оборудования энергоблоков ТЭС и АЭС может быть реализован в виде программного модуля, включающего в себя базу данных. Факторы и причины, которые вызывают изменение технического состояния оборудования, а значит и соответствующие им отклонения диагностических функций, определяются и систематизируются на основе анализа опыта эксплуатации и ремонтов энергоблоков ТЭС и АЭС и заносятся в эту базу данных.

Для определения зависимостей, описывающих изменение технического состояния и надежности работоспособного оборудования, а также времени, оставшегося до его отказа, с целью планирования сроков и продолжительности ремонтов и расчета коэффициентов готовности энергоблоков предлагается следующий подход.

На прогнозируемом временном интервале эксплуатации энергоблока параметры его оборудования  $x_i, i = \overline{1, m}$  подвержены эволюции в результате изменения технического состояния оборудования. Вследствие устойчивости физико-химических процессов, вызывающих эти изменения, они представляют собой непрерывные и монотонные функции времени  $\tau$ , которые можно рассматривать как полумарковские зависимости с известными аппроксимациями их реализаций [8].

Эти аппроксимации могут быть представлены разными видами. Для часто встречающихся в практике эксплуатации оборудования энергоблоков ТЭС и АЭС линейного и экспоненциального видов [9] они записываются соответственно как

$$\left. \begin{aligned} x_i(\tau) &= c_i + \gamma_i \tau, i = \overline{1, m} \\ x_i(\tau) &= \alpha_i e^{\beta_i \tau}, i = \overline{1, m} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Начиная с начала эксплуатации оборудования в момент времени  $\tau_0 = 0$ , с помощью штатной или специальной системы контрольно-измерительных приборов энергоблока и его имитационной модели описанным выше методом проводится диагностика технического состояния оборудования во всем временном интервале эксплуатации  $\delta\tau = \tau - \tau_0$  и таким образом последовательно наблюдаются реализации функций  $x_i(\tau), i = \overline{1, m}$  до конца прогнозируемого интервала эксплуатации  $\tau$ . По получаемым в процессе наблюдения в точках  $\tau_j, j = \overline{\tau_0, \tau}$  дискретным значениям реализаций  $x_i(\tau), i = \overline{1, m}$ , учитывая применение полумарковских моделей для описания их эволюций, строятся наилучшие экстраполяционные кривые  $x_i(\tau), i = \overline{1, m}$ , то есть находятся коэффициенты  $c_i, \gamma_i$  или  $\alpha_i, \beta_i$  аппроксимационных зависимостей (1), причем каждые новые значения наблюдаемых реализаций уточняют кривые прогноза  $x_i(\tau), i = \overline{1, m}$ . Точка пересечения функции  $x_i(\tau), i = \overline{1, m}$ , которая описывает изменение технического состояния диагностируемого оборудования, с заданной границей  $g_i, i = \overline{1, m}$ , определяющей предельное значение этой функции исходя из технико-экономических показателей энергоблока или надежности его работы, интерпретируется как наработка оборудования до отказа. Это позволяет определить время  $\Delta\tau = \tau_g - \tau_j$ , оставшееся до момен-



та необхідного ремонту обладнання (до його відмови)  $\tau_g$  від моменту діагностики технічного стану  $\tau_j$ .

Отримані таким чином апроксимаційні залежності  $x_i(\tau), i = \overline{1, m}$  для всього переліку експлуатуваного обладнання становлять базу даних еволюцій параметрів стану і надійності обладнання для конкретних типів енергоблоків ТЭС і АЭС і умов їх експлуатації. Ця база даних може бути використана на різних етапах життєвого циклу енергоблоків, в тому числі і для планування продовжителі ремонтних робіт на електростанціях і визначення коефіцієнта готовності енергоблоків.

В якості критерія, по якому проводиться планування продовжителі ремонтних робіт, виступають економічні показники в формі сумарних витрат (втрати) електростанції  $Z_{п.р}$ , пов'язаних з ремонтами енергоблоків [10]:

$$Z_{п.р} = Z_з + Z_п + Z_м + Z_р,$$

де  $Z_з$  – витрати (втрати), обумовлені недовироботкою електроенергії з-за простою енергоблоків в час ремонтів і залежні від цілого ряду техніко-економічних факторів (рівня енергопотреблення в енергосистемі в час ремонтів, можливих штрафних санкцій за перевищення строків ремонтів і др.);  $Z_п$  – витрати на підготовчі роботи, що передують ремонту;  $Z_м$  – витрати на ремонтні матеріали і запасні частини;  $Z_р$  – витрати на безпосереднє проведення ремонтних робіт.

Продовжителі плануваних ремонтних робіт є функцією витрат на них  $\tau_{п.р} = f(Z_{п.р})$  і задовольняє співвідношенню  $\tau_{п.р} \geq \tau_{п.р\min}$ , де  $\tau_{п.р\min}$  – мінімально можлива продовжителі ремонту енергоблоку.

Час  $\Delta\tau$ , залишене до відмови обладнання енергоблоку від моменту діагностики його технічного стану, і продовжителі планового ремонту  $\tau_{п.р}$  визначають коефіцієнт готовності енергоблоку  $K_r$ , який є одним з показників надійності, по наступній формулі:

$$K_r = \frac{\Delta\tau}{\Delta\tau + \tau_{п.р}}.$$

Мінімально можлива продовжителі ремонту енергоблоку  $\tau_{п.р\min}$  визначається, в основному, виходячи з наступних технологічних і економічних передумов: ремонтні роботи не можуть бути виконані швидше, ніж за  $\tau_{п.р\min}$  з-за відсутності на електростанції відповідних ремонтних технологій; при  $\tau_{п.р} = \tau_{п.р\min}$  витрати на безпосереднє проведення ремонтних робіт  $Z_р$  максимальні; витрати на підготовчі роботи, що передують ремонту,  $Z_п$  також, як правило, мак-

симальны; потери обусловленные недовыработкой электроэнергии  $Z_3$  минимальны; затраты на ремонтные материалы и запасные части  $Z_m$  не зависят от сроков ремонта.

При увеличении планируемой продолжительности ремонта оборудования  $\tau_{п.р}$  по сравнению с  $\tau_{п.рmin}$  происходит уменьшение коэффициента готовности энергоблока  $\Delta K_r$  в соответствии с зависимостью

$$\Delta K_r = \frac{\Delta\tau(\tau_{п.р} - \tau_{п.рmin})}{(\Delta\tau + \tau_{п.рmin})(\Delta\tau + \tau_{п.р})}$$

По этой причине увеличение продолжительности планируемых ремонтных работ на остановленных энергоблоках электростанций снижает надежность энергоблоков ТЭС и АЭС по такому показателю как коэффициент готовности  $K_r$ .

Таким образом, задача определения оптимальной продолжительности ремонтов энергоблоков является задачей многофакторной оптимизации, которая относится к классу задач невыпуклого программирования и может быть решена одним из достаточно хорошо разработанных для этого класса задач методов [11–13].

Предложенные методы, модели и подходы могут быть реализованы в специализированных интеллектуальных программно-технических средствах, входящих в АСУ ТП энергоблоков ТЭС и АЭС, для диагностики технического состояния оборудования, планирования продолжительности ремонтных работ и расчета коэффициентов готовности энергоблоков.

#### Литература

1. Gardzilewicz A. The heat and flow diagnostic procedure leading to a steam turbine repair Plan / A. Gardzilewicz, A. Jefimow // Proc. 10<sup>th</sup> Conf. on Steam and Gas Turbines for Power and Cogeneration Plants. – Karlovy Vary (Czech. Rep.). – 1994. – P. 87–93.
2. Gardzilewicz A. Thermal Diagnostics of Thermal Cycle Components on an Example of a Regenerative Heat Exchanger Rep. / A. Gardzilewicz, A. Jefimow // IFFM-PAS 256/94 – Gdansk (in Polish). – 1994. – P. 34–40.
3. Gluch J. The analysis of performance of the turbine condenser with the prognosis of repair / J. Gluch, A. Gardzilewicz // Proc. of the International Joint Power Generation Conf. – Baltimore, Maryland (USA). – August 23-26, 1998. – V. 2. – P.179–190.
4. Палагин А.А. Моделирование функционального состояния и диагностика турбоустановок / А.А. Палагин, А.В. Ефимов, Е.Д. Меньшикова. – К. : Наук. думка, 1991. – 189 с.
5. Ефимов А.В. Разработка имитационной модели энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 для решения задач анализа, управления и диагностики / А.В. Ефимов, Т.В. Потанина // Энергетика: економіка, технології, екологія. – Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”. – Київ. – №2 – 2006. – С. 5–9.
6. Jefimow A. Symulacyjne modelowanie funkcjonowania energobloku elektrowni atomowej z reaktorem WWER-1000 / A. Jefimow, T. Potanina // Nauka i studia “Filologiczne nauki Biologiczne nauki Medycyna Techniczne nauki Fizyka Informatyka”. –Przemysl. – Nauka i studia. – №2(14)2009. – P. 59–69.

7. Монтгомери Д.К. Планирование эксперимента и анализ данных / Д.К. Монтгомери.– Л.: Судостроение, 1980.– 383 с.
8. Ефимов А.В. Оценка эффективности тепловых схем энергоблоков по параметрам состояния и надежности оборудования. Интегровані технології та енергозбереження / А.В. Ефимов, Т.А. Гаркуша // – Харків: НТУ „ХПІ”.– 2006. – № 1. – С. 103–108.
9. Острейковский В.А. Вероятностное прогнозирование работоспособности элементов ЯЭУ / В.А. Острейковский, Н.Л. Сальников. – М.: Энергоатмиздат, 1990.– 416 с.
10. Ящура А.И. Система технического обслуживания и ремонта энергетического оборудования / А.И. Ящура. – Москва: изд-во НЦ ЭНАС. – 2006. – 504 с.
11. Мину М. Математическое программирование: Теория и алгоритмы / М. Мину. – М.: Наука, 1990. – 485 с.
12. Соболев И.М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями / И.М. Соболев, Р.Б. Статников. – М.: Наука, 1981. – 112 с.
13. Реклейтис Г. Оптимизация в технике / Г. Реклейтис, А. Рейвиндран, К. Рэгсдел. – М.: Мир, 1986. – 349 с.

Bibliography (transliterated)

1. Gardzilewicz A. The heat and flow diagnostic procedure leading to a steam turbine repair Plan A. Gardzilewicz, A. Jefimow Proc. 10th Conf. on Steam and Gas Turbines for Power and Cogeneration Plants. – Karlovy Vary (Czech. Rep.). – 1994. – P. 87–93.
2. Gardzilewicz A. Thermal Diagnostics of Thermal Cycle Components on an Example of a Regenerative Heat Exchanger Rep. A. Gardzilewicz, A. Jefimow IFFM-PAS 256 94 – Gdansk (in Polish). – 1994. – P. 34–40.
3. Gluch J. The analysis of performance of the turbine condenser with the prognosis of repair J. Gluch, A. Gardzilewicz Proc. of the International Joint Power Generation Conf. – Baltimore, Maryland (USA). – August 23-26, 1998. – V. 2. – P.179–190.
4. Palagin A.A. Modelirovanie funkcional'nogo sostojanija i diagnostika turbostanovok A.A. Palagin, A.V. Efimov, E.D. Men'shikova. – K. : Nauk. dumka, 1991. – 189 p.
5. Efimov A.V. Razrabotka imitacionnoj modeli jenerglobloka AJeS s VVJeR-1000 dlja reshenija zadach analiza, upravlenija i diagnostiki A.V. Efimov, T.V. Potanina Energetika: ekonomika, tehnologii, ekologija. – Nacional'nij tehnicnij universitet Ukraïni „Kiïvs'kij politehnicnij institut”. – Kiïv. – #2 – 2006. – p. 5–9.
6. Jefimow A. Symulacyjne modelowanie funkcjonowania energobloku elektrowni atomowej z reaktorem WWER-1000 A. Jefimow, T. Potanina Nauka i studia “Filologiczne nauki Biologiczne nauki Medycyna Techniczne nauki Fizyka Informatyka”. –Przemysl. – Nauka i studia. – #2(14)2009. – R. 59–69.
7. Montgomeri D.K. Planirovanie jeksperimenta i analiz dannyh D.K. Montgomeri.– L.: Sudostroenie, 1980.– 383 p.
8. Efimov A.V. Ocenka jeffektivnosti teplovyh shem jenergloblokov po para-metram sostojanija i nadezhnosti oborudovanija. Integrovani tehnologii ta energozbere-zhennja A.V. Efimov, T.A. Garkusha – Harkiv: NTU „HPI”.– 2006. – # 1. – p. 103–108.
9. Ostrejkovskij V.A. Verojatnostnoe prognozirovanie rabotosposobnosti jelementov JaJeU V.A. Ostrejkovskij, N.L. Sal'nikov. – M.: Jenergoatmizdat, 1990.– 416 p.

10. Jashhura A.I. Sistema tehničeskogo obsluzhivanija i remonta jenergetičeskogo oborudovanija A.I. Jashhura. – Moskva: izd-vo NC JeNAS. – 2006. – 504 p.
11. Minu M. Matematičeskoe programmirovanije: Teorija i algoritmy M. Minu. – M.: Nauka, 1990. – 485 p.
12. Sobol' I.M. Vybor optimal'nyh parametrov v zadachah so mnogimi krite-rijami I.M. Sobol', R.B. Statnikov. – M.: Nauka, 1981. – 112 p.
13. Reklejtis G. Optimizacija v tehnikе G. Reklejtis, A. Rejvindran, K. Rjagsdel. – M.: Mir, 1986. – 349 p.

УДК 621.165

Єфімов О.В., Каверцев В.Л., Гаркуша Т.А.

**МЕТОДИ І МОДЕЛІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ДІАГНОСТИКИ  
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ УСТАТКУВАННЯ, ПЛАНУВАННЯ  
РЕМОНТІВ ТА РОЗРАХУНКУ КОЕФІЦІЄНТІВ ГОТОВНОСТЕЙ  
ЕНЕРГОБЛОКІВ ТЕС ТА АЕС**

Серед найбільш важливих та актуальних проблем теплової та атомної енергетики особливе місце займають задачі раціонального планування та організації ремонтних робіт на енергоблоках електростанцій і розрахунку їх коефіцієнтів готовностей на основі результатів діагностики технічного стану устаткування. В статті запропоновані методи, моделі і підходи до вирішення цих актуальних задач, які можуть бути застосовані для розробки спеціалізованих інтелектуальних програмно-технічних засобів, що входять в АСУ ТП енергоблоків ТЕС та АЕС.

Yefimov A., Kavercev V., Garkusha T.

**THE METHODS AND MODELS OF AUTOMATED DIAGNOSTICS  
OF THE TECHNICAL STATE OF EQUIPMENT, PROGNOSIS OF REPAIR  
AND CALCULATION OF EFFICIENCY FOR TURBOSETS OF HEAT AND  
NUCLEAR POWER PLANTS**

The methods and models of automated diagnostics of the technical state of equipment of heat and nuclear turbosets, prognosis of repair and calculation of efficiency are developed. The results can be proved in automated systems of control of technological processes for turbosets of heat and nuclear power plants.

УДК 504.058

Маляренко В.А., Яковлев О.І.

## ФУЛЕРЕНИ – НОВА СТРУКТУРА МОЛЕКУЛЯРНОЇ ПОБУДОВИ РЕЧОВИНИ ДЛЯ АКУМУЛЮВАННЯ ВОДНЮ

Речовина, побудована на основі фулеренівих структур та інших часток, які використовуються в нанотехнологіях, була вперше синтезована в 1985 р. [1]. Це третя після графіту й алмазу форма чистого вуглецю. Її молекулу можна представити як сферичний многогранник, складений з 20 шестикутників і 12 п'ятикутників, з атомами вуглецю в кожній з його 60 вершин (рис. 1).

Теоретична можливість існування фулерену була передбачена японцем Осавой. Однак гідними Нобелівської премії по хімії за 1996 р. були визнані вчені зі США і Великобританії – Роберт Керл, сер Харольд Крото і Ричард Смолл, які вперше знайшли таку форму вуглецю під час лазерного випару графіту в атмосфері гелію. Відкриття цієї молекули завбільшки 1 нм, тобто в одну мільярдну частку метра, було визнано одним з найважливіших подій у науці ХХ сторіччя [1, 2].

Фулерен має дивну молекулу, створену природою у вигляді дволикого Януса, в якій гармонійно об'єдналися вакуум і матерія – дві основи світобудови. Якщо заглянути усередину цієї незвичайної кульки, то можна знайти порожнечу, пронизану електромагнітними полями (рис. 1, а). Фулерен є свого роду сполучною ланкою між органічною і неорганічною матерією. Зокрема, його геометрична форма має дивну подібність з найважливішими біологічними структурами живих організмів. Виявлено фрагментацію молекули ДНК. Якщо до цього додати здатність фулерена, на відміну від графіту й алмазу, розчинятися в органічних розчинниках і утворювати безліч нових з'єднань з різними елементами, то стає зрозуміло, чому від нього стали очікувати чудес.

Як тільки були розроблені прості способи одержання вуглецевих молекул, у науковому світі почався "фулереновий бум". Фахівці пророкували, що фулеренові "м'ячики", а також відкриті пізніше вуглецеві нанотрубки і нанолуковиці відкриють можливості нових механічних, оптичних, магнітних, біохімічних і інших ефектів, які можна використовувати в самих різних областях науки, техніки і медицини. У розвинутих країнах було налагоджено виробництво фулеренів і вуглецевих наноматеріалів на їх основі, створені спеціалізовані дослідницькі фірми, що вивчають фулерени. Сьогодні грам цього матеріалу коштує 100 \$ США. Але це ще не межа вартості нових матеріалів, які володіють зверхрозвинутою поверхнею (500 м<sup>2</sup>/г), міцністю і зверхелектропровідністю, один грам нанотрубок коштує кілька сотень доларів США.

Саме за їх допомогою сьогодні намагаються створити фантастичний космічний ліфт, на якому згодом можна буде відправитися на навколосемну орбіту. У такому ліфті головним компонентом конструкції буде надміцний кабель з нанотрубок довжиною в 100 тис. км. Наочне представлення про те, наскільки інженери наблизилися до реалізації цієї мрії, дають змагання "Космічний ліфт 2007", що відбулися недавно в штаті Юта (США) за підтримкою НАСА. Вони проводяться з 2005 р. і закінчаться в 2010 році. Їх ціль – стимулювати розробку космічного ліфта, що представляє собою трос, один кінець якого закріплений на супутнику, що знаходиться на геостаціонарній орбіті, а іншої на екваторі [2, 3].

У 2007 року було оголошено, що британські вчені в Манчестерському університеті разом з німецькими вченими з інституту Макса Планка створили нову стабільну

наноструктуру – вуглецеву плівку товщиною в один атом. У ній атоми розташовані в конфігурації, що нагадує бджолині стільники. Новий матеріал, який отримав назву "грейфін", найближчим часом зможе замінити кремнієві мікросхеми, що відкриє еру глобальних змін у комп'ютерній техніці, електроніці, медицині і багатьох інших галузях виробництва.

Технологія одержання такого матеріалу не проста. У процесі спалювання водню утворюються крапельки рідини. Гей-Люссаком і Гумбольдтом у 1805 р. була запропонована проста формула води  $H_2O$ . Однак уявлення про таку просту побудову було розвіяно, коли почалися дослідження за допомогою мас-спектрометрії. Була відкрита важка вода ( $D_2O$ ), виявлений третій ізотоп водню тритій  $H_3$  або  $T$ , отримана надважка вода ( $T_2O$ ), напівважка вода  $HOD$ . В наш час щодня створюються нові речовини і матеріали, які докорінно змінюють уявлення про техніку, що нас оточує. Це, наприклад, гнучкі органічні екрани, у яких транзистори виконані з використанням нанопровідників і провідникових окислів, що пропускають світло. Можливо використання подібних структур при виготовленні електронного паперу, окулярів, автомобільного скла і прозорих мікросхем [1].

Досліджуючи фулерени, фахівці припустили, що вони можуть утворюватись й у природних умовах – усюди, де є вуглець і високі енергії. Наприклад, поблизу вуглецевих зірок, у міжзоряному просторі і навіть на Землі – у місцях улучення блискавок чи поблизу кратерів вулканів. Можуть вони попадати на нашу планету і з космосу з метеоритною речовиною. У 1992 р. природні аналоги фулеренів були виявлені російськими вченими в Карелії, поблизу Онезького озера, де залягають унікальні мінеральні породи – шунгіти, вік яких складає близько 2 млрд. років. Вони містять до 90 % чистого вуглецю, у тому числі, приблизно одну соту частку відсотка у вигляді фулерену. Походження цього мінералу, можливо, пов'язано саме з падінням великого вуглецевого метеориту. У 1999 р. харківські вчені досліджували зразки шунгіту, передані фахівцями Карельського наукового центра, і підтвердили наявність у цих породах фулеренів.

Водяний розчин фулеренів – це жива вода: система, що складається з вільних і упорядкованих молекул. Частина упорядкованих молекул води являє собою так звані мерехтливі кластери – сферичні утворення, подібні тим структурам води, що належать живому організму. Кластери визначають біологічну активність води і її цілющість. Однак живуть вони дуже нетривалий час – мільярдні частки секунди: то розпадаються, то з'являються знову, за що й одержали назва мерехтливих.

Якщо фулерен розчинити в органічній сполуці, а потім додати отриманий розчин у воду, впливаючи на цю суміш ультразвуком, то окремі молекули фулерену миттєво "змінюють шкіру". Вони скидають оболонку з органічного розчинника й огортаються міцною водяною оболонкою, перетворюючись в гідратований фулерен. При цьому кожний формує й утримує навколо себе упорядкований водяний кластер, попередні розміри якого в десятки разів більше, ніж у нього самого. Такі кластери перестають бути мерехтливими і перетворюються в стабільні утворення, які можуть існувати необмежено довго. Саме молекула фулерена вуглецю  $C_{60}$  є утворенням, у центрі якого знаходиться молекула розміром у 1 нм, а навколо її структурована упорядкована вода, що простирається в усі сторони на відстань у 20–80 нм.

Американські вчені опублікували повідомлення про винятково високу токсичність фулеренів. За їхніми спостереженнях, у риб, що плавали у воді з добавками фулеренів, відбувалися негативні зміни в мозку, а клітки людської шкіри людини при контакті з розчином і зовсім гинули. Слід зазначити, що сама молекула фулерена в гідратованій формі не токсична. Більш того, вона взагалі не розпізнається живим організмом

як чужорідна речовина. Необхідно підкреслити, що сама молекула гідратованого фулерена не має скільки-небудь виражену біологічну активність. Вона тільки структурує воду, робить її подібною з тією живою водою, з якої на 80 % складається наш організм, і утримує її необмежено довго в такому стані.

Прогрес у масовому використанні водню як екологічно чистого джерела енергії багато в чому залежить від рішення проблеми ефективного способу його збереження і транспортування. Однак, жоден із застосовуваних у даний час засобів збереження водню - під високим тиском, у рідкому стані, у гідридах металів і інтерметалевих з'єднань, в адсорбованому стані при знижених температурах (табл. 1) - не задовольняє заданим вимогам.

Таблиця 1 – Традиційні засоби збереження водню [1]

Засоби збереження водню	Зміст водню в сорбенті, мас. %	Об'ємний зміст водню, кг/м <sup>3</sup>
Газоподібний H <sub>2</sub> (300 К, 10 МПа)	100	7,7
Рідкий H <sub>2</sub> (-253 °С или 20 К)	100	71
Металогідридні технології		
TiH <sub>2</sub>	4,0	150
MgH <sub>2</sub>	7,6	120
LaNi <sub>5</sub> H <sub>6,7</sub>	1,4	85
TiFeH <sub>2</sub>	1,9	96
Mg <sub>2</sub> NiH <sub>4</sub>	4,0	81
Кріоадсорбційна технологія		
Активоване вугілля (155 К, 6,9 МПа)	0,05–2	~ 1–2

Вважається, що для використання в якості матриці, яка акумулює водень, найбільш перспективними є вуглецеві наноструктури – фулерени, вуглецеві нанотрубки, графітові нановолокна, воднесорбційні можливості яких набагато перевищують відомі для інших відомих засобів збереження водню і близькі до необхідних вимог. Головна особливість структури їх макромолекул полягає в тому, що вони утворюють замкнутий каркас визначеної форми, у якому є, як правило, пустотілі "оболонки". Найпоширеніший з вуглецевих наноструктур – це фулерен C<sub>60</sub>. Приклади структур фулеренів і нанотрубок наведені на рис. 1.

Результати досліджень властивостей фулеренів по сорбції молекул водню представлені у роботі [1]. Вони свідчать про те, що водень при низьких температурах (40–100 К) формує навколо фулерена оболонку на відстані 2,29 А від його стінки. Товщина оболонки залежить від температури: чим вище температура, тим товще вона стає, при цьому зміст молекул водню в оболонці падає.

Металогідридні та інші технологічні установки дозволяють акумулювати водень у газоподібному стані, безпечно його зберігати і подавати споживачам із заданими показниками тиску і витрат [3]. Новий спосіб акумулювання водню базується на використанні алотропних модифікацій вуглецю класу фулеренів. Алотропні форми вуглецю - це алмаз, графіт, карбін. Останній має палочкообразну молекулу вуглецю і дозволяє створювати нанотрубки, нановолокна й атомні кластери – матеріальні частки з розмірами порядку 1 10<sup>-9</sup> м. Ці матеріали дозволяють використовувати чистий водень як паливо та енергоносії. Порівняльні характеристики нанотрубок наведені в табл. 2.

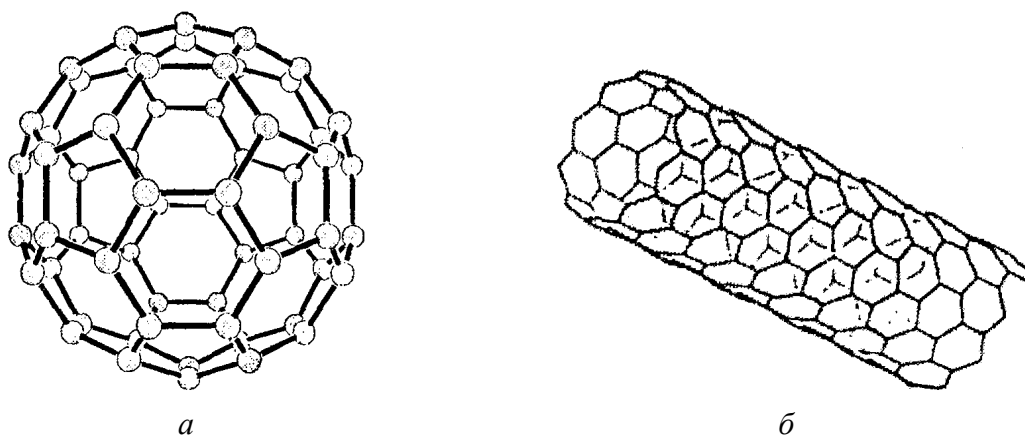


Рисунок 1 – Структура молекули фулерену и нанотрубки:  
а) фулерен C<sub>60</sub>; б) відкрита одношарова нанотрубка

Таблиця 2 – Характеристики засобів зберігання водню в порівнянні с другими енергоносіями та системами зберігання

Акумулююча система	Об'ємна ємність, Г <sub>м2</sub> /л	Питома масова ємність		Об'ємна енергоємність, кВт/л	Масова питома енергоємність, кВт/кг
		Г <sub>м2</sub> /кг	%		
Балон зі стиснутим газом 25 МПа	17,5	64	6	0,6	2,15
Рідкий водень (-253 °C або 20 К)	35	105	10	1,2	3,5
Метанол	95	120	12	4	3
Пористе залізо	65	35	3,5	1,4	0,7
Графітова нанотрубка	450	530	43	15	14

Кількість молекул у водневій оболонці фулеренів значно залежить від термодинамічних параметрів. Як показали обчислення [1, 2], зниження температури і підвищення тиску викликають істотне збільшення кількості водню в оболонці фулерена, а збільшення температури і зниження тиску погіршують процес сорбції.

Таким чином, фулерени після гідрування всіх подвійних зв'язків могли б містити до 7,7 мас. % водню (0,92 м<sup>3</sup> Н<sub>2</sub> на 1 кг С<sub>60</sub>Н<sub>60</sub>). Однак одержати таке з'єднання поки нікому не вдалося. Одержані гідриди фулеренів С<sub>60</sub>Н<sub>х</sub> (максимальний склад – С<sub>60</sub>Н<sub>36</sub>) містять до 6 мас. % водню. Для використання фулеренів як сорбентів водню необхідно підвищити сорбційну ємність, збільшити швидкість гідрування, знизити температуру дегідрування та усунути побічні реакції.

Характеристики сорбції водню вуглецевими нанотрубками і графітовими нановолокнами ще більш високі, чим фулеренами, що свідчить про можливість їх ефективного застосування для зазначеної мети (табл. 3). Стримуючим фактором застосування вуглецевих наноструктур є їх одержання в промислових масштабах. На сьогоднішній день немає промислових методів одержання фулеренів і нанотрубок в достатній кілько-



сті.

Таблиця 3 – Характеристики сорбції водню вуглецевими наноматеріалами

Матеріал	Максимальна ємність, мас. %	Температура, К	Тиск водню, МПа
Одноштинні нанотрубки	8,25	80	7,18
	5–10	133	0,04
	4,2	300	10–12
	3,5	77–300	5–10
	6,5–7	300	0,1
Графітове нановолокно	11–66	300	11
	10–12	373	11
Графітове нановолокно + К	14	473–673	0,1
Графітове нановолокно + Li	20	473–673	0,1

Вихідною сировиною для одержання фулеренів і нанотрубок (НТ) є графіт, насичені і ненасичені вуглеводні, ароматичні вуглеводні та інші речовини. Ці види сировини є дорогими. Крім того, відомі методи одержання фулеренів і НТ не дозволяють виготовляти їх у достатньо великих кількостях. Тому варто шукати шляхи рішення даної проблеми на основі використання дешевої вуглецевої сировини, зокрема, коксу, кам'яновугільної смоли, пеку й ін. [1, 2]. Дані про наявність фулеренових структур у коксі і колошниковому пилу, враховуючи багатомільйонний тоннаж виробництва коксу в Україні, дають підставу сподіватися на перспективу розвитку методів одержання наноструктур з коксохімічних продуктів, навіть при їх невеликому змісті. Таким чином, впровадження водневої енергетичної системи дозволить вирішити проблему децентралізованого виробництва тепла й електрики на підприємствах України.

Дослідження в області нановуглецевих матеріалів, у свою чергу, вимагають відповідних програм розвитку та фінансування. Прикладом позитивного рішення цієї проблеми є науково-дослідні роботи по збереженню водню у фулеренах, виконані в Росії (в інституті ІПФХ РАН). Співробітниками цього інституту були докладно вивчені хімічні перетворення в системах фулерен-метал-водень у широкому інтервалі тисків і температур. Гідрування при тисках 1,0–5,0 МПа і температурах 573–673 К приводить до утворення суміші гідридів металів і гідрідофулеренів  $C_{60}H_x$  (максимальний склад  $C_{60}H_{36}$ ). При нагріванні отриманої суміші до 800 К відбувається дегідрування з утворенням фулерен-металевих композицій. При нагріванні вище 950 К в ряді випадків утворюються карбіди металів.

Більш перспективними для збереження водню здаються інші вуглецеві наноструктури – графітові нановолокна, вуглецеві нанотрубки та їх допіровані металами модифікації, оскільки воднесорбційні можливості яких набагато перевищують можливості відомих інших способів збереження водню (табл. 3).

Для збереження паливних газів, наприклад, створення судин для водню, необхідні нові матеріали. Це, зокрема, може бути пряжа з надтонких мономолекулярних вуглецевих волокон, діаметром менше 0,1 мкм кожне (звідси приставка "нано", що вказує на типовий діаметр у трохи десятків нанометрів). Цей матеріал має незвичайно високий модуль пружності і межу міцності на розрив. При товщині з людський волос (50 мкм) він витримує вантаж масою 2 кг (у той час як сталевий дріт тієї ж товщини – тільки 200 г). Інші найважливіші властивості вуглецевих нановолокон – це висока електроп-

ровідність, найвища корозійна стійкість, сталість механічних властивостей при самих різних температурах (від криогенних до 1000 °С та вище) і прекрасна сумісність з живими тканинами. Вуглецеві нановолокна – це найближчі родичі звичайних мікронних вуглецевих волокон, які з'явилися відносно недавно і по всіх параметрах обганяють звичайні вуглецеві матеріали [2].

Порівняємо вуглецеві волокна з нановолокнами. Усі вуглецеві волокна можна розділити на кілька типів у залежності від того, як і з чого вони зроблені. Найпоширеніший спосіб виробництва – обвуглювання натурального чи синтетичного текстильного волокна без доступу повітря. Так можна обробити льон, бавовну і нейлон, однак у практику увійшли вуглецеві волокна на основі віскози і поліакрилонітрила (ПАН). ПАН-волокна – абсолютні лідери, їх частка у світовому виробництві складає 80 %. Їх товщина приблизно дорівнює товщині вихідного текстильного волокна (близько 35 мкм), а властивості залежать, у першу чергу від, параметрів обвуглювання, яке відбувається у декілька етапів і завершується відпалом у вакуумі або атмосфері інертного газу при 2000–3000 °С.

Основні характеристики волокна – це міцність (або міцність на розрив), твердість волокна при розтяганні (модуль подовжньої пружності) і максимальне подовження, при якому нитка не рветься (гранична деформація). Властивості вуглецевих волокон, з яких роблять ємності для збереження водню, залежать від параметрів вирощування шляхом розкладання вуглеводневих газів (метану, етилену, ацетилену, монооксиду вуглецю) на залізному каталізаторі при температурі 500–1500 °С. Потім ці волокна відпалюють у вакуумі або атмосфері інертного газу при 2000–3000 °С. За такою технологією можна зробити вуглецеві трубки товщиною 0,7 нм (діаметр однієї молекули), з яких виготовляють штапельні полотна для склейки судин. Порівняння різних матеріалів (рис. 2), запозичене з роботи [2], показує, що кращі характеристики у нановолокон, методи одержання яких загалом такі ж, як у звичайних газових і пекових волокон.

Виростити волокно з газу можна двома способами: на підкладці або в потоці газу. При першому способі графітову чи керамічну підкладку фарбують "залізною фарбою", тобто суспензією тонкого порошку заліза в органічному розчиннику, а в другому випадку до газу просто додають летуче з'єднання заліза (наприклад, карбоніл заліза, чи ферроцен  $\text{Fe}(\text{C}_5\text{H}_5)_2$ ). Різниця в тім, що на підкладці вдається отримати більш довгі волокна (до декількох десятків сантиметрів), тоді як у потоці газу, де вони утворюються безупинно, усього кілька міліметрів.

Вирощування нановолокон на практиці залежить від багатьох параметрів. Як показано в роботах [1, 2], крок у бік – і замість нановолокна виходить звичайне мікронне. Спочатку, при більш низьких температурах, волокно росте в довжину і тільки потім товщає. Якщо небагато підвищити температуру або каталізатор виявиться ледве менш активним – волокно починає рости в товщину і перетворюється в звичайне мікронне.

Нановолокна мають таку ж трубчасту будову, як і мікронні газові, – різниця в масштабі та у тім, що їх складові трубки – це окремі молекули, а не „пап'ємаше з графітових лусочок”. Саме це дає принципово нові властивості.

Ідеальна модель нанотрубки з рекордними параметрами за даними [1,2] виглядає так: графітовий лист звертають, сполучаючи верхній і нижній краї з утворенням циліндра, при цьому в його стінці виходить стрічка з вуглецевих шестикутників, що по спіралі оперізує трубку. Модуль пружності такої структури досягає 1800 ГПа і міцності на розрив 20–30 ГПа. Якщо робити нитки з ацетилену і додавати мало-мало порцеляни, то виходять спіралевидні нановолокна, що забезпечують високу міцність і гумоподібність виробів.

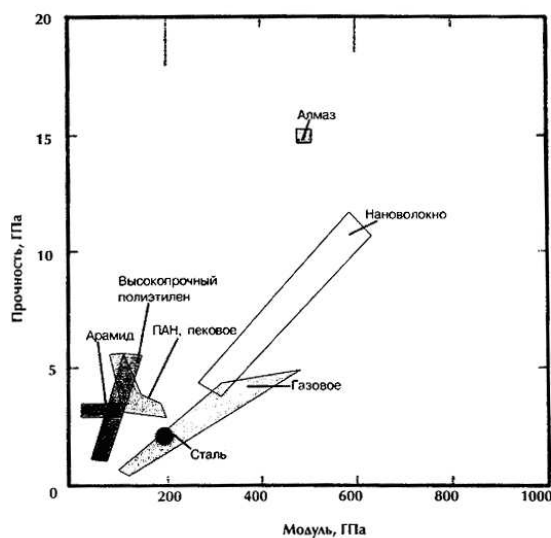


Рисунок 2 – Порівняння механічних властивостей різних волокон

За допомогою таких матеріалів прогнозується виготовлення судин, мостів, агрегатів авіакосмічної техніки, надміцних вишок, естакад, ліфтів, градирень і будівель в сейсмоопасних районах і т.п. відповідних споруджень.

#### Література

1. Трефилов Б.А. Фуллерены – основа материалов будущего / Б.А. Трефилов, Д.В. Щур, Б.П. Тарасов и др. // К.: Адеф-Украина, 2001. – 147 с.
2. Мордкович В.З. Материал для орбитального лифта / В.З. Мордкович // Х. – "Наука и техника" № 2, – 2010. – 7 с.
3. Металлогидридные технологии: дайджест / Под ред. В.В. Соловья и Ю.М. Мацевитого. – Х.: ИПМаш им. А.Н. Подгорного. – 2009. – 37 с.
4. Константинов А.В. Нанотехнологии в медицине: перспективы развития / "Наука и техника" № 3, 2010 – с. 75–79.

#### Bibliography (transliterated)

1. Trefilov B.A. Fullereny – osnova materialov budushhego B.A. Trefilov, D.V. Shhur, B.P. Tarasov i dr. K.: Adef-Ukraina, 2001. – 147 p.
2. Mordkovich V.Z. Material dlja orbital'nogo lifta V.Z. Mordkovich H. – "Nauka i tehnika" # 2, – 2010. – 7 p.
3. Metallogidridnye tehnologii: dajdzhest Pod red. V.V. Solov'ja i Ju.M. Macevitogo. – H.: IPMash im. A.N. Podgornogo. – 2009. – 37 p.
4. Konstantinov A.V. Nanotehnologii v medicine: perspektivy razvitija "Nauka i tehnika" # 3, 2010 – p. 75–79.

УДК 504.058

Маляренко В.А., Яковлев А.И.

**ФУЛЛЕРЕНА – НОВАЯ СТРУКТУРА МОЛЕКУЛЯРНОГО СОСТАВА  
ВЕЩЕСТВА ДЛЯ АККУМУЛИРОВАНИЯ ВОДОРОДА**

Проведена оценка способности веществ, построенных с использованием фуллеренов, аккумулировать водород. Рассмотрена технология производства и свойства изделий из углеродных волокон и фуллеренов.

Зроблено оцінку здатності речовин, побудованих за використанням фулеренів акумулювати водень у порівнянні з іншими структурами; коротко описана технологія виробництва та властивості виробів з вуглецевих волокон і фулеренів.

УДК 621.311.25

Потанина Т.В.

**МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ  
К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЕМ НАГРУЗОК  
МЕЖДУ ЭНЕРГБЛОКАМИ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

Исходной информацией при решении задач поиска оптимальных режимов управления работой энергетического оборудования, в том числе и задач оптимального распределения нагрузок между энергоблоками ТЭС и АЭС, являются эксплуатационные (энергетические) характеристики энергоблоков, позволяющие оценить результат воздействия различных возмущающих факторов на основные показатели выработки электрической и тепловой энергии.

Анализ работ по вопросу построения моделей энергетических характеристик для оптимального распределения нагрузок между энергоблоками в пределах одной станции позволяет сформулировать ряд проблем методологического характера, получивших наибольшее распространение:

- проблема выбора из множества управляемых параметров наиболее значимых в определении реального технического состояния оборудования;
- построение не только нормативных эксплуатационных (энергетических) характеристик энергоблоков на номинальных режимах работы, но и таких эксплуатационных характеристик, которые бы адекватно описывали состояние оборудования при работе в режимах, отличных от номинальных, то есть на частичных нагрузках;
- получение математических моделей систем и оборудования электростанций и постановка задачи их оптимизации в условиях неопределенности информации (при неточном задании исходных данных);
- проблема многокритериальной постановки задачи (учет фактора надежности работы систем и оборудования, экологические ограничения, оптимизация комплекса режимных параметров каждого энергоблока и другие);
- зависимость вида эксплуатационных характеристик от уровня детализации (блочный или общестанционный), на котором осуществляется постановка и решение оптимизационной задачи, и другие проблемы.

Энергоблоки АЭС и ТЭС характеризуются сложной тепловой схемой и разнообразием основного и вспомогательного оборудования. Получение эксплуатационных характеристик отдельных систем и оборудования, описывающих влияние изменения параметров технологических процессов на технико-экономические показатели выработки электроэнергии энергоблока, является достаточно сложной задачей, так как экономичность оборудования, особенно при работе на частичных режимах, зависит от большого числа факторов.

В [1] рассматривается методика выбора оптимальных параметров и метод итеративного решения внутростанционной задачи оптимального распределения нагрузки между генерирующими мощностями. На первой итерации производится распределение нагрузки на базе нормативных эксплуатационных характеристик отдельных энергоблоков в виде зависимости расхода теплоты или топлива от электрической мощности, полученных при номинальных начальных и конечных параметрах пара. Затем осуществляется поиск оптимальных начальных и конечных параметров пара в реальных условиях работы каждого энергоблока, с учетом которых на следующей итерации проводятся

коррекції характеристик і повторне оптимальне розподілення навантаження. Ітеративний процес продовжується до отримання достатньо близьких рішень між двома послідовними ітераціями. Таким образом, из множества управляемых параметров в качестве наиболее значимых выбраны начальное давление свежего пара, давление пара в конденсаторе, температура свежего пара, температура уходящих газов.

Для промышленно-отопительных ТЭЦ с поперечными магистралями в [2] на основе обобщенного анализа загрузки подогревателей высокого давления в различных режимах работы построены эксплуатационные характеристики теплофикационных турбоустановок с учетом влияния распределения потоков питательной воды. При расчете поправок к названным характеристикам используется математическая модель расчета гидравлической схемы питательного тракта, которая также может быть включена в расчет эксплуатационных характеристик турбин и котлов при их моделировании. В основу решения задачи распределения нагрузок положен прием декомпозиции исходной схемы ТЭЦ с целью снижения размерности оптимизационной задачи, что позволило использовать аппарат динамического программирования для малого числа турбоагрегатов при распределении не более двух видов нагрузки. В качестве критерия оптимизации при работе по тепловому графику принят удельный расход теплоты на группу обо-

рудования  $q = \frac{\sum Q_i}{\sum N_i} \rightarrow \min (Q_i - \text{тепловая нагрузка } i\text{-го агрегата, } N_i - \text{электрическая}$

нагрузка  $i\text{-го агрегата})$ . Для поиска глобального экстремума в [2] строится итерационная схема последовательного решения частных задач.

Состояние любой сложной технической системы нельзя определить точнее, чем это обусловлено ее теоретико-экспериментальной базой. Из-за сложности технических систем, коллархичности моделирующих их комплексов, а также шумового фона фактическая неопределенность будет гораздо выше базовой и должна оцениваться на каждом этапе моделирования. И потому в задачах оптимизации построение модели описания факторов неопределенности играет очень важную роль. Методологически целесообразно различать три основные ситуации: стохастическое, статистическое, интервальное и нечеткое описания [3]. Первое используется, когда факторам неопределенности можно приписать вероятностный, случайный характер. Случайные факторы полностью стохастически описаны, если задана их плотность вероятности. Исходя из этого, некоторые специалисты рассматривают эту ситуацию как детерминированную [3]. Статистическое описание применимо, когда модель объекта определяется по результатам выборочных экспериментов в условиях действия случайных помех и ошибок, а потому получают лишь оценки математического ожидания и дисперсии. Интервальное представление факторов неопределенности в последнее время привлекает все большее внимание как наименее ограничительное. В случаях, когда даже гипотетически нельзя предположить возможность многократного проведения эксперимента и относительно факторов неопределенности ничего неизвестно, кроме их свойства быть ограниченными, естественной моделью описания факторов является их представление в интервальной форме.

В работе [4] предлагается методика математического моделирования и оптимизации работы энергоагрегатов с учетом того, что параметры используемых моделей известны с точностью до интервала. В ней авторами в результате статистического анализа данных, полученных при натурных испытаниях энергоагрегатов, создается модель, и используются доверительные интервалы для всех коэффициентов регрессионных полиномов. С помощью методологии интервального анализа [5] минимизи-

рується інтервальна функція з інтервальними обмеженнями. Методика мінімізації забезпечує зменшення як середньінтервальних значень, так і ширини інтервала по мірі продвиження к минимуму. Інтервали порівнюються на основі теоретико-ймовірностного підходу. Розроблена методика дозволяє при розв'язанні задачі оптимізації сумісної роботи енергоблоків отримувати результати, які, на думку автора, краще відповідають реальній ситуації, ніж отримані при використанні традиційних підходів, коли при розрахунках недостатньо точно відомі параметри заміняються їх середніми значеннями і може статися втрата дуже цінної інформації.

Форма нечіткого описання факторів неопределенности використовує методи теорії нечітких множин. Використання елементів нечітко-інтервальної математики і узагальнення звичайного інтервального підходу [4] дозволяють трансформувати частотні розподіли в нечіткі інтервали з мінімальною втратою інформації [6]. Регресійні залежності згідно з принципом розширення Л. Заде заміняються їх нечітко-інтервальними аналогами [7]. Як алгоритм оптимізації використовується метод випадкового пошуку – «прямі виборочні процедури з зменшенням інтервала». Реалізація методу здійснюється при пошуку режимів роботи котлоагрегатів з метою максимізації КПД котельної установки, але з огляду на її загальність, по твердженню авторів, метод може застосовуватися і в інших задачах оптимізації.

Для планування основних виробничих показників, включаючи оптимізацію розподілу навантаження по станціям енергосистеми, в основному використовуються варіантні розрахунки, які представляють собою однофакторні експерименти. Ця методика не дозволяє оцінити очікувані значення інтегральних техніко-економічних показників при існуючій неопределенности в значеннях цілої системи визначаючих параметрів. Використання апарату інтервальної математики дозволяє формалізувати варіантні розрахунки [8]. Задача оптимального розподілу навантажень представляється як мінімаксимальна задача пошуку, побудована модель питомого витрати умовного палива дозволяє звести задачу оптимізації к задачі лінійного програмування по вектору навантажень.

В дослідженні [9] пошук оптимального рішення по розподілу навантажень між конденсаційними енергоблоками ТЭС з турбинами К-200-130 і К-210-130 проведено з урахуванням похибок витратних характеристик енергоблоків, математичні моделі яких побудовані на основі статистичної обробки результатів пасивного експерименту. Вводяться значення відносних похибок вимірювання для питомого витрати твердого палива на відпущену електроенергію  $\delta_b$  і для електричної потужності  $\delta_N$ . В інтервалі неопределенности витратної характеристики  $B(N)$ , визначеною абсолютною похибкою витрати палива на відпуск електроенергії  $B(N)\sqrt{\delta_N^2 + \delta_b^2}$ , побудовані характеристики з максимальною і мінімальною крутизою в заданому коридорі  $\left[ B(N) - B(N)\sqrt{\delta_N^2 + \delta_b^2}; B(N) + B(N)\sqrt{\delta_N^2 + \delta_b^2} \right]$ , і далі розподілення навантажень між енергоблоками проводиться методом динамічного програмування [10]. В результаті оптимального розподілення навантажень з урахуванням похибок витратних характеристик енергоблоків оператору АСУ ТП видаються не жорсткі рекомендації по навантаженню, а пропонується деякий діапазон електричної навантаження, в межах якого і слід навантажувати кожен блок.

Задача распределения электрической и тепловой нагрузки между  $n$  энергоблоками в [11] формулируется как многокритериальная задача статической оптимизации, включающая подзадачу оптимизации режимных параметров энергоблоков станции (решение, получаемое при оптимизации комплекса режимных параметров, является основой для решения задачи о распределении нагрузок); в качестве критериев выбраны критерии оптимальности по расходу топлива, надежности и экологическим показателям. В первых двух критериях расходные характеристики и характеристики надежности энергоблоков являются функциями режима работы станции, электрической и тепловой мощности энергоблоков и комплекса режимных параметров энергоблока, зависящих от нагрузок агрегатов и в общем случае требующих подбора оптимальных значений. Экологические характеристики – функции режима работы станции, электрической и тепловой мощности энергоблоков. В качестве ограничений рассматриваются допустимые пределы нагрузок для каждого энергоблока и заданные суммарные мощности для всей станции. Предполагается также включение ограничений по активным и полным мощностям энергоблоков, по числу работающих энергоблоков, по числу комбинаций включенных агрегатов. Выбор оптимальных режимных параметров энергоблока (первый этап задачи) осуществляется путем построения обобщенной расходной характеристики блока, как функции электрической и тепловой нагрузки  $B(p, q)$ , то есть, в процессе решения следующей задачи:

$$B(p, q) = \min_{\Pi_k} \{B(p, q, \Pi_k)\}, \quad (1)$$

где  $p$  – электрическая мощность,  $q$  – тепловая нагрузка,  $\Pi_k$  – комплекс оптимизируемых параметров.

Функция цели представляет собой сумму полученных характеристик, задача на определение ее минимума решается методом динамического программирования.

При решении задач управления энергоблоками, предусматривающих составление экономико-математических моделей на блочном и общестанционном уровнях важное место занимает проблема определения принципов моделирования распределенных систем управления технологическим процессом энергоблоков ТЭС [12]. На основе иерархического принципа организации управления тепловой электростанцией и присущей ему схеме обращения информации в многоуровневой иерархической системе, автор предлагает критерии, облегчающие декомпозицию сложных систем, и рекомендует использовать прямую передачу на верхний уровень только тех информационных сигналов, которые связаны с определением целевой функции этого уровня или с вычислением технико-экономических показателей подчиненных объектов. Эти принципы находят отражение в [12] при решении задачи оптимального распределения электрических нагрузок между параллельно работающими энергоблоками. Модель энергетической характеристики энергоблока с учетом влияющих факторов для решения задач оптимизации технологического процесса моноблока представляется в виде полиномов:

$$B_T = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i y_i + \sum_{i,j=1}^k b_{ji} y_j y_i,$$

где  $B_T$  – расход топлива.



В качестве факторов, применительно к энергоблоку ТЭС мощностью 210 МВт, рассматриваются электрическая мощность, избыточное содержание кислорода в дымовых газах, температура уходящих газов, циркуляционной воды на входе в конденсатор и первичного перегрева пара, давление пара в конденсаторе.

Блочная модель, применяемая на верхнем уровне, представлена в упрощенном виде полиномом второй степени  $B_{Ti} = b_{0i} + b_{1i}N_i + b_{2i}N_i^2$ . Это выражение используется как одна из составляющих семейства моделей по расходу топлива, образующих следующую целевую функцию на стационарном уровне ( $n$  энергоблоков):

$$B_{T\Sigma} = \sum_{i=1}^n B_{Ti} = \sum_{i=1}^n b_{0i} + \sum_{i=1}^n b_{1i}N_i + \sum_{i=1}^n b_{2i}N_i^2, \quad (2)$$

где  $B_{T\Sigma}$  – суммарный расход топлива.

В качестве критерия управления в задаче оптимального распределения нагрузок в работе [13] выбран минимум суммарных затрат топлива на выработку заданного количества электроэнергии, причем расходные характеристики по каждому энергоблоку задаются графически или аналитически, автономные ограничения нагрузок каждого энергоблока связаны с особенностями режимов работы и эксплуатационными факторами. Решение задачи распределения нагрузок достигается на основе метода неопределенных множителей Лагранжа. Функция Лагранжа, составляемая для решения данной задачи, включает только ограничения по нагрузке, задаваемые в виде равенств. Ограничения минимальной и максимальной нагрузок энергоблоков, задаваемые в виде неравенств в уравнение не включаются, и поэтому необходимо постоянное сопоставление получаемых оптимальных значений мощностей отдельных энергоблоков с заданными ограничениями и их перерасчет.

Результат разработки информационных средств оптимизации распределения тепловой и электрической нагрузки на ТЭС на основе непараметрических моделей эксплуатационных (энергетических) характеристик турбоагрегатов представлен в работе [14]. В качестве критерия эффективности используется суммарный расход теплоты, а ограничения определяются заданиями на выработку теплоты и электроэнергии; поиск решения осуществляется методом динамического программирования.

Метод динамического программирования применялся и для решения задачи распределения тепловых нагрузок при работе турбин ТЭС по тепловому графику [15]. Московским энергетическим институтом разработан программный комплекс по расчету оптимального распределения электрической нагрузки между параллельно работающими энергоблоками ТЭС. Программный комплекс работает в диалоговом режиме и предназначен для поиска при заданной суммарной нагрузке ТЭС и выбранного критерия оптимальных электрических нагрузок конденсационных энергоблоков. Критериями оптимизации могут являться: 1) суммарный расход условного топлива на ТЭС; 2) суммарные затраты на топливо (при одновременном сжигании несколько видов топлива). Оптимизация проводится с помощью метода динамического программирования, не накладывающего ограничений на вид расходных характеристик энергоблоков. Программный комплекс может применяться на электростанциях с конденсационными энергоблоками, участвующими в регулировании мощности энергосистемы. Программный комплекс включает в себя два раздела: 1) «Характеристики (просмотр и коррекция)» – процедура, позволяющая производить просмотр, коррекцию и внесение дополнительной информации в базу данных каждого энергоблока, а также просмотр и кор-

рекцию общестанционных данных; 2) “Расчет распределения нагрузки” – выполнение расчета оптимальных нагрузок блоков, расходов топлива по энергоблокам, суммарных затрат на топливо, выбросов в атмосферу, платы за выбросы.

Основным режимом работы программного комплекса является режим оптимизации. В данном режиме осуществляется: ввод значения заданной нагрузки; ввод информации о работе энергоблоков (состояние энергоблоков, допустимый диапазон изменения нагрузки для каждого энергоблока, топливный режим на каждом энергоблоке, наличие тепловой нагрузки, режим работы в однокорпусном режиме для дубль-блоков); вывод результатов расчета. Также предусмотрен учет текущего фактического состояния оборудования – отклонение ряда технологических параметров от номинальных значений из-за текущего технического состояния оборудования. По результатам расчетов выдается следующая информация: заданная нагрузка станции, для которой выполнен расчет; данные по оптимальному распределению нагрузки между энергоблоками.

Приведенные примеры показывают, что метод динамического программирования достаточно часто находил применение при решении задач оптимального распределения нагрузок между энергоблоками, особенно в ситуациях работы энергоблоков в режиме «пуска» или «останова». Между тем, объем вычислений по схеме динамического программирования возрастает экспоненциально в зависимости от размерности задачи, которая определяется числом параметров состояния, то есть числом ограничений минимального и максимального значений электрической мощности для каждого энергоблока. Таким образом, при наличии более трех параметров состояния, задачу практически невозможно решить.

В работе [16] представлены результаты использования метода перебора вариантов и метода относительных приростов [17,18] для оптимизации распределения электрической, теплофикационной и производственной нагрузок между турбоагрегатами. Турбоагрегаты разбиты на три группы. Оказалось, что если рассматривать распределение нагрузки между тремя группами (в группах объекты идентичны) по трем параметрам, то метод перебора всех вариантов предпочтительней, так как требуется меньше времени на оптимизацию по сравнению со вторым методом. Это связано с большим дроблением оптимизационной задачи на отдельные части, хотя, когда в работе находятся все турбоагрегаты, скорость оптимизации становится примерно равной. При использовании метода рассматривались математические модели диаграмм режимов работы турбин. Метод относительных приростов позволяет распределять три вида нагрузки между большим количеством объектов, но на это требуется больше времени. Данный метод более динамичен по сравнению с первым методом, так как позволяет работать не только с математическими моделями диаграмм режимов работы турбоагрегатов, но и с математическими моделями реально действующих объектов. Автор приходит к выводу, что самый лучший вариант при поставленной задаче оптимизации – это комбинирование методов. Вначале распределение методом перебора всех вариантов, который лучше всего подходит для предварительного распределения нагрузки, а затем – методом относительных приростов. Первым методом распределяется нагрузка между группами, а вторым – в группах между турбоагрегатами.

Разработанная “теория замещения” [17] позволяет определять, какие установки и в каких пропорциях компенсируют изменения мощности каждой из них. Задача распределения электрических нагрузок, в которой критерием оптимизации является минимум расхода топлива (топливных затрат), решается с помощью введения функции Лагранжа. Множители Лагранжа имеют вполне определенный физический смысл и представляют собой осредненные для всех рассматриваемых уста-

новок значения относительных приростов затрат по нагрузке. Изменение отпуска данного вида энергии компенсируется соответствующим изменением загрузки всех участвующих в работе установок, включая и рассматриваемую. Таким образом, в качестве балансирующей должна выступать не какая-то отдельная установка, а вся совокупность рассматриваемых, т.е. система. Условие оптимального распределения выработки энергии достигается в том случае, когда значения относительных приростов каждой установки приближаются к среднему относительному приросту всей группы (системы). Использование данной методики [18,19] позволило получить обобщенные расчетные функции для определения вектора-градиента приращений нагрузок котлов и турбин станций с одной и двумя секциями поперечных связей по свежему пару, нагрузок для ТЭЦ наиболее сложного типа с использованием секции, имеющей поперечную связь, и автономного блочного оборудования.

В настоящее время в качестве одного из принципов моделирования сложных технических систем рассматривается сочетание имитационных и эмпирико-статистических моделей. Статистические методы в ситуациях не слишком сложных имитационных моделей используются в основном для целей идентификации, в случаях повышения уровня сложности позволяют строить достаточно простые регрессионные модели изучаемого процесса, определяя неявные взаимосвязи в моделируемой сложной системе. Поэтому применение данных принципов моделирования для решения задачи построения эксплуатационных характеристик систем и оборудования энергоблоков электростанций, описывающих влияние изменения параметров технологических процессов на технико-экономические показатели производства электроэнергии оказывается весьма эффективным [20]. Эксплуатационные характеристики, построенные в виде регрессионных полиномов, описывают влияние изменения достаточно большого числа параметров технологических процессов, то есть систем и оборудования энергоблока, на значения электрической мощности и удельного расхода теплоты. Такие характеристики позволяют сформулировать задачу распределения нагрузок между энергоблоками электростанции как оптимизационную задачу с одним управляемым параметром – электрической мощностью, что дает возможность учитывать иерархический принцип организации управления электростанцией. При постановке такой задачи для моноэнергоблоков АЭС с ВВЭР-1000, она формулировалась как задача нелинейного программирования с линейными ограничениями и решалась методом проекции градиента Розена с выбором начальной точки итерационного процесса с помощью ЛП<sub>τ</sub>-последовательностей [21].

Из проведенного анализа видно, что при решении задачи распределения нагрузок между энергоблоками электростанций актуальной остается проблема учета в моделируемых объектах и процессах факторов неопределенности и выбор аппарата для их описания. Классическое «точечное» представление величин в задачах моделирования и оптимизации зачастую не позволяет добиваться максимально возможного соответствия моделей реальному объекту. Игнорирование интервального (или нечетко-интервального) характера задачи дает решение в виде некоторых «точных» чисел, при этом близость таких решений к нижним возможным или верхним возможным значениям не может быть оценена. На практике это приводит к неудовлетворенности полученными результатами лиц, принимающих решение [22].

Вполне очевидными в такой ситуации являются преимущества интервального анализа, средства которого позволяют учитывать неточности в задании исходных данных, неопределенности параметров и структуры модели системы, полирежимный характер функционирования таких сложных технических систем, как энергоблоки ТЭС и АЭС. Для повышения эффективности решения оптимизационной задачи распределения

нагрузок между энергоблоками электростанций перспективным представляется изучение возможностей представления целевых функций в виде регрессионных полиномов, коэффициенты которых известны с точностью до интервала, и интервального расширения методов поиска экстремумов интервальных целевых функций.

#### Литература

1. Аракелян Э.К. Методика выбора оптимальных параметров и режимов работы оборудования энергоблоков на частичных нагрузках / Э.К. Аракелян // Теплоэнергетика. – № 4. – 2002. – С. 57–60.
2. Ромашова О.Ю. Распределение нагрузок на ТЭЦ с поперечными связями с учетом потокораспределения воды: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.14.14: «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты»/ О.Ю. Ромашова. – Томск, 2007. – 20 с.
3. Вошинин А.П. Оптимизация в условиях неопределенности / А.П. Вошинин, Г.Р. Сотиров. – МЭИ (СССР); «Техника» (НРБ), 1989. – 224 с.
4. Севастьянов П.В. Моделирование и оптимизация работы энергоагрегатов при интервальной неопределенности / П.В. Севастьянов, А.В. Венберг // «Энергетика»: Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. – 1998. – № 3. – С. 66–70.
5. Moore R.E. Methods and applications of interval analysis / R.E. Moore. – Philadelphia: SIAM. – 1979. – 190 p.
6. Yager R.A foundation for theory of possibility // J / Of Cybernetics. – 1980. – Vol. 10. – № 1–3. – pp. 177–209.
7. Севастьянов П.В. Оптимизация технико-экономических параметров работы энергоагрегатов при нечетких исходных данных / П.В. Севастьянов, А.В. Венберг // «Энергетика»: Изв. вузов и энергетических объединений СНГ. – 2000. – № 1. – С.62–69.
8. Арончик Г.И. Математическое моделирование и оптимизация технико-экономических показателей региональной энергосистемы в условиях нечеткости исходной информации / Г.И. Арончик, В.П. Балтер, Б.З. Чертков // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия физико-математические науки. – 2002. – № 16. – С. 149–154.
9. Щедеркина Т.Е., Мерзликина Е.И. Учет неопределенности исходных данных при решении задач статической оптимизации // Вестник МЭИ. – № 3. – 2006. – С. 22–28.
10. Беллман Р. Динамическое программирование / Беллман Р.; пер. с англ. М.И. Андреевой – М.: Изд-во иностр. лит., 1960. – 400 с.
11. Аракелян Э.К. Оптимизация работы теплоэлектроцентрали со сложным составом оборудования в условиях переменных графиков энергопотребления / Э.К. Аракелян, Д.Ю. Цыпулев // Вестник МЭИ. – 2007. – № 1. – С. 32–37.
12. Плетнев Г.П. Методы моделирования распределенных систем управления технологическими процессами энергоблоков ТЭС / Г.П. Плетнев // Теплоэнергетика. – 2001. – № 10. – С. 49–52.
13. Плетнев Г.П. Управление электрической нагрузкой энергоблоков ТЭС с учетом эксплуатационных ограничений / Г.П. Плетнев, Т.Е. Щедеркина // Изв. Вузов. Энергетика. – 1983. – № 5. – С. 55–60.
14. Информационные средства оптимизации распределения нагрузки на тепловой электростанции / А.В. Лапко, В.А. Лапко, Д.А. Ларько [и др.] // Проблемы информатизации региона : VIII Всерос. научн.-практ. конф., 28–29 окт. 2003 г., Красноярск: материалы конф. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2003. – Т. 1. – С. 114–116.

15. Пашенко А.В. Частные случаи оптимизации режимов работы ТЭЦ / А.В. Пашенко, Ю.Б. Попова // «Энергетика»: Известия ВУЗов и энергетических объединений СНГ. – 2001. – № 6. – С. 81–87.
16. Басс М.С. Методы оптимального распределения нагрузок между турбоагрегатами. // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности : Четвертая Российская научн.-технич. конф., 24–25 апр. 2003 г., Ульяновск: материалы конф. – Ульяновск: УлГТУ, 2003. – С. 40–43.
17. Аминов Р.З. Градиентный метод распределения нагрузок на ТЭЦ / Аминов Р.З. – Саратов: СПИ, 1982. – 59 с.
18. Аминов Р.З. Определения вектора-градиента при распределении нагрузок в структурно-сложной ТЭЦ (I часть) / Р.З. Аминов // Изв. ВУЗов. Энергетика. – 1990. – №4. – С. 65–70.
19. Аминов Р.З. Определения вектора-градиента при распределении нагрузок в структурно-сложной ТЭЦ (II часть) / Р.З. Аминов // Изв. ВУЗов. Энергетика. – 1990. – № 5. – С. 67–70.
20. Potanina T. Problem of optimal load distribution between power units on the power stations / T. Potanina, A. Efimov // MOTROL – Lublin. – 2009. – Vol. 11A. – С.25-30.
21. Ефимов А.В. Применение метода проекции градиента для решения задачи оптимального распределения нагрузок между энергоблоками АЭС / А.В. Ефимов, Т.В. Потанина, И.С. Белов, Т.А. Гаркуша // Интегровані технології та енергозбереження. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2008. – № 1. – С. 89–96.
22. Дилигенский Н.В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология / Н.В. Дилигенский, Л.Г. Дымова, П.В. Севастьянов. – М.: Машиностроение – 1. – 2004. – 220 с.

Bibliography (transliterated)

1. Arakeljan Je.K. Metodika vybora optimal'nyh parametrov i rezhimov raboty oborudovaniya jenergoblokov na chastichnyh nagruzkah Je.K. Arakeljan Teplojenergetika. – # 4. – 2002. – p. 57–60.
2. Romashova O.Ju. Raspredelenie nagruzok na TJeC s poperechnymi svyazjami s uchetom potokoraspredelenija vody: avtoref. dis. na soiskanie nauch. stepeni kand. tehn. nauk: spec. 05.14.14: «Teplovyje jelektricheskie stancii, ih jenergeticheskie sistemy i agregaty» O.Ju. Romashova. – Tomsk, 2007. – 20 p.
3. Voshhinin A.P. Optimizacija v uslovijah neopredelennosti A.P. Voshhinin, G.R. Sotirov. – MJeI (SSSR); «Tehnika» (NRB), 1989. – 224 p.
4. Sevast'janov P.V. Modelirovanie i optimizacija raboty jenergoagregatov pri interval'noj neopredelennosti P.V. Sevast'janov, A.V. Venberg «Jenergetika»: Izv. vuzov i jenergeticheskij ob"edinenij SNG. – 1998. – # 3. – p. 66–70.
5. Moore R.E. Methods and applications of interval analysis R.E. Moore. – Philadelphia: SIAM. – 1979. – 190 p.
6. Yager R.A foundation for theory of possibility J Of Cybernetics. – 1980. – Vol. 10. – # 1–3. – pp. 177–209.
7. Sevast'janov P.V. Optimizacija tehniko-jekonomicheskijh parametrov raboty jenergoagregatov pri nechetkijh ishodnyh dannyh P.V. Sevast'janov, A.V. Venberg «Jenergetika»: Izv. vuzov i jenergeticheskijh ob"edinenij SNG. – 2000. – # 1. – p.62–69.

8. Aronchik G.I. Matematicheskoe modelirovanie i optimizacija tehniko-jekonomicheskikh pokazatelej regional'noj jenergosistemy v uslovijah nechetkosti is-hodnoj informacii G.I. Aronchik, V.P. Balter, B.Z. Chertkov Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tehničeskogo universiteta. Serija fiziko-matematičeskie nauki. – 2002. – # 16. – p. 149–154.
9. Shhederkina T.E., Merzlikina E.I. Uchet neopredelennosti ishodnyh dannyh pri reshenii zadach statičeskoj optimizacii Vestnik MJeI. – # 3. – 2006. – p. 22–28.
10. Bellman R. Dinamičeskoe programmirovanie Bellman R.; per. s angl. M.I. Andreevoj – M.: Izd-vo inostr. lit., 1960. – 400 p.
11. Arakeljan Je.K. Optimizacija raboty teplojelektrocentrali so slozhnym so-stavom oborudovanija v uslovijah peremennyh grafikov jenerGOPotreblenija Je.K. Ara-keljan, D.Ju. Cypulev Vestnik MJeI. – 2007. – # 1. – p. 32–37.
12. Pletnev G.P. Metody modelirovanija raspredelennyh sistem upravlenija tehnologičeskimi processami jenerGoblokov TJeS G.P. Pletnev Teplojenergetika. – 2001. – # 10. – p. 49–52.
13. Pletnev G.P. Upravlenie jelektricheskoj nagruzkoj jenerGoblokov TJeS s uche-tom jekspluatacionnyh ogranichenij G.P. Pletnev, T.E. Shhederkina Izv. Vuzov. Jenergetika. – 1983. – # 5. – p. 55–60.
14. Informacionnye sredstva optimizacii raspredelenija nagruzki na teplo-voj jelektrostantsii A.V. Lapko, V.A. Lapko, D.A. Lar'ko [i dr.] Problemy infor-matizacii regiona : VIII Vseros. nauchn.-prakt. konf., 28–29 okt. 2003 g., Krasnojarsk: materialy konf. – Krasnojarsk: IPC KGTU, 2003. – T. 1. – p. 114–116.
15. Pashhenko A.V. Chastnye sluchai optimizacii rezhimov raboty TJeC A.V. Pashhenko, Ju.B. Popova «Jenergetika»: Izvestija VUZov i jenergetičeskikh ob"e-dinenij SNG. – 2001. – # 6. – p. 81–87.
16. Bass M.S. Metody optimal'nogo raspredelenija nagruzok mezhdru turboagregatami. JenerGosberezhenie v gorodskom hozjajstve, jenergetike, promyshlennosti : Chetvertaja Rossijskaja nauchn.-tehnič. konf., 24–25 apr. 2003 g., Ul'janovsk: materialy konf. – Ul'janovsk: UIGTU, 2003. – p. 40–43.
17. Aminov R.Z. Gradientnyj metod raspredelenija nagruzok na TJeC Aminov R.Z. – Saratov: SPI, 1982. – 59 p.
18. Aminov R.Z. Opredelenija vektora-gradienta pri raspredelenii nagruzok v strukturno-slozhnoj TJeC (I chast') R.Z. Aminov Izv. VUZov. Jenergetika. – 1990. – #4. – p. 65–70.
19. Aminov R.Z. Opredelenija vektora-gradienta pri raspredelenii nagruzok v strukturno-slozhnoj TJeC (II chast') R.Z. Aminov Izv. VUZov. Jenergetika. – 1990. – # 5. – p. 67–70.
20. Potanina T. Problem of optimal load distribution between power units on the power stations T. Potanina, A. Efimov MOTROL – Lublin. – 2009. – Vol. 11A. – C.25-30.
21. Efimov A.V. Primenenie metoda proekcii gradienta dlja reshenija zadachi optimal'nogo raspredelenija nagruzok mezhdru jenerGoblokami AJeS A.V. Efimov, T.V. Potanina, I.S. Belov, T.A. Garkusha Integrovani tehnologii ta energozberezhenija. – H.: NTU «HPI». – 2008. – # 1. – p. 89–96.
22. Diligenskij N.V. Nechetkoe modelirovanie i mnogokriterial'naja optimi-zacija proizvodstvennyh sistem v uslovijah neopredelennosti: tehnologija, jekonomika, jekologija N.V. Diligenskij, L.G. Dymova, P.V. Sevast'janov. – M.: Mashinostroenie – 1. – 2004. – 220 p.

УДК 621.311.25

Потаніна Т.В.

**МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ  
ДО РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧІ УПРАВЛІННЯ РОЗПОДІЛОМ НАВАНТАЖЕНЬ  
МІЖ ЕНЕРГОБЛОКАМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ**

В статті проаналізовано проблеми методичного характеру, що виникають при розв'язанні задачі управління розподілом навантажень між енергоблоками та устаткуванням ТЕС та АЕС. Запропоновано застосування методів інтервального аналізу для побудови моделей та розв'язання оптимізаційних задач.

Potanina T.

**THE METHODOLOGICAL APPROACH TO THE SOLUTION OF A PROBLEM OF  
OPTIMAL LOAD DISTRIBUTION BETWEEN POWER UNITS ON THE POWER  
STATIONS**

In paper the methodical problems at the solution of the problem optimal load distribution between power units and equipment on the power stations are analyzed. Application of the interval analysis methods for construction of models and solution of optimization problems is offered.

УДК 697.1

Левченко С.А., Баташова Н.А., Мных А.С.

## О ВЫБОРЕ СТРУКТУРЫ МОДЕЛИ КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ОТОПЛЕНИЯ

**Актуальность вопроса.** Для возможности оценки эффективности работы комбинированной системы, а также решения оптимизационной задачи по подбору состава и мощностей энергетического оборудования, теплоизоляционных материалов ограждающих конструкций, их толщин, типов окон и других изменений, влияющих на тепловую нагрузку, а, следовательно, на эксплуатационные затраты, необходимо создание модели, учитывающей все параметры здания и компоненты системы отопления.

**Основная часть.** Основой модели комбинированной системы отопления должна стать модель расчета тепловой мощности, которая, помимо температуры наружного и внутреннего воздуха, учитывает:

- конструктивные параметры здания;
- коэффициенты теплопередачи каждого слоя всех ограждающих конструкций;
- типы окон;
- количество проживающих или работающих в здании людей;
- теплопоступления от осветительных приборов и нагревательного оборудования;
- тип вентиляции.

Не менее важными составляющими модели являются параметры энергетического оборудования (его мощности и КПД), а также цены на оборудование, теплоизоляционные материалы, стеклопакеты и тарифы на энергоносители.

И так как основной целью отопления является создание благоприятных условий для жизни и деятельности человека система должна покрывать всю тепловую нагрузку независимо от ее компонентов и их комбинации, но в то же время должна быть наименее затратной. Наиболее целесообразно рассматривать представленную модель комбинированной системы отопления в виде, на рис. 1.

Модель комбинированной системы отопления должна быть динамической (посуточной или почасовой), учитывающей колебания температуры наружного воздуха, так как от последней зависит тепловая нагрузка, а следовательно и время работы миникотла(ов), теплоэлектрического нагревателя(ей) и преобразователя(ей) в режиме потребления энергии. Такая особенность расчета затрат комбинированной системы отопления связана еще и с использованием электрической энергии по внепиковому тарифу, который действует определенный промежуток времени в сутках. Накопление энергии в электрическом теплоаккумулирующем преобразователе будет осуществляться ежедневно с различными начальными условиями, зависящими от степени разряженности электрического теплоаккумулирующего преобразователя (ЭТАПа) на момент начала действия следующего внепикового тарифа.



Модель теплообменника должна позволить рассчитать эффективную площадь теплообмена и подобрать соответствующий теплообменный аппарат.

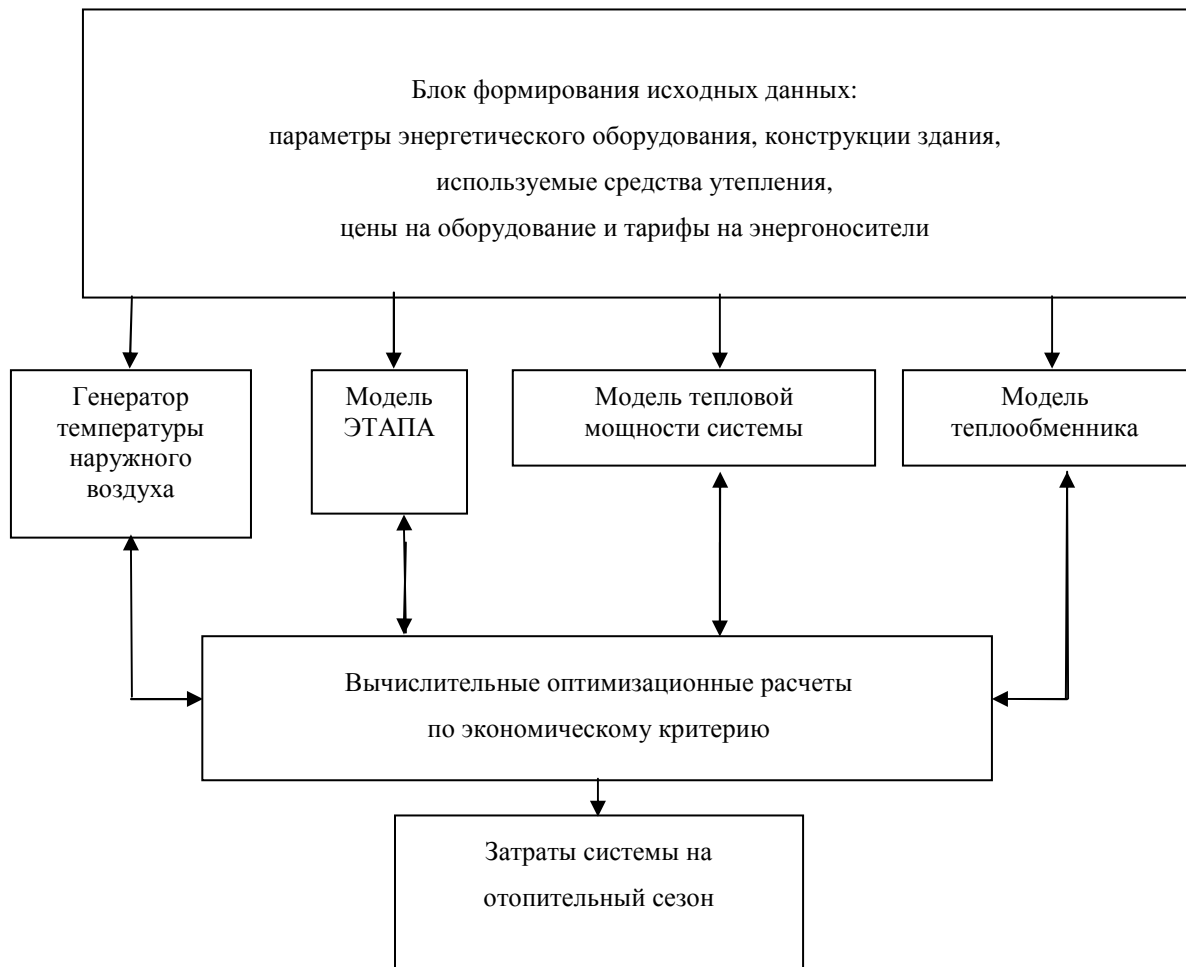


Рисунок 1 – Структура модели комбинированной системы отопления

Основными исходными данными для решения данной задачи являются:

- тепловая мощность системы отопления;
- входная температура греющего теплоносителя;
- выходная температура последнего;
- входная температура нагреваемого теплоносителя;
- выходная температура нагреваемого теплоносителя;
- теплофизические свойства теплоносителей;
- потеря напора по греющему и нагреваемому теплоносителю.

Подобные расчеты теплообменных аппаратов подробно описаны в литературе [1–3].

Для предварительной оценки затрат на теплообменный аппарат можно воспользоваться рекомендациями фирм-производителей по типу теплообменника в зависимости от тепловой нагрузки, температурного графика и допустимых потерь давления.

Данные о температуре наружного воздуха для модели комбинированной системы отопления могут браться из архивов местных Гидрометцентров либо генерироваться. Последний вариант позволяет прогнозировать температуру на будущие отопительные сезоны. Моделирование температуры наружного воздуха  $t$  рассмотрено в работе [4] может быть осуществлено на основе статистических данных о среднемесячных и среднесуточных значениях температур и дисперсиях их суточных (возможно и почасовых) значений. Случайные некоррелируемые величины (суточное изменение температуры окружающего воздуха) с равномерным законом распределения, генерируемые блоком Г (в соответствии с блок-схемой, приведенной на рис. 2), преобразуются в блоке П из равномерного в заданный. Согласно [5] практические наблюдения лучше всего описываются  $\beta$ -законом распределения с соответствующими параметрами  $\alpha$  и  $\beta$ . Блок Ф преобразует некоррелируемые случайные последовательности в коррелируемые с заданной автокорреляционной функцией, которые в блоке Д приводятся к реальным случайным последовательностям.

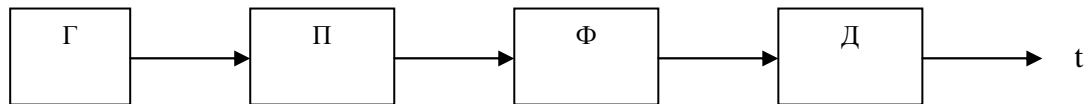


Рисунок 2 – Блок-схема генератора наружных температур:

Г – генератор некоррелируемых случайных последовательностей с равномерным законом распределения;

П – преобразователь нормального распределения;

Ф – блок преобразования из некоррелированной случайной последовательности в центрированную последовательность с заданной автокорреляционной функцией;

Д – блок реализации различных случайных последовательностей температуры наружного воздуха

**Выводы.** Комбинированные системы отопления следует рассматривать как сложные энергетические системы. Структура модели комбинированной системы отопления должна учитывать все элементы самой системы, модель тепловой мощности системы, данные о температуре наружного воздуха или генератор температуры, а также существующие цены и тарифы на энергорынке и позволять проводить оптимизационные расчеты и оценивать затраты за рассматриваемый период времени.

#### Литература

1. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л. Пластинчатые теплообменники в теплоснабжении / [Л.Л. ТОВАЖНЯНСКИЙ, П.А. КАПУСТЕНКО, Г.Л. ХАВИН та ін.]. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2007. – 448 с.

2. Зингер Н.М. Пластинчатые теплообменники в системах теплоснабжения / Зингер Н.М., Тарадай А.М., Бармина Л.С. – М.: Энергоиздат. – 1995. – 256 с.

3. Тарадай А.М. Основы разработки пластинчатых теплообменников для систем теплоснабжения / Тарадай А.М. – Харьков: Основа. – 1998. – 192 с.

4. Качан Ю.Г. Моделирование потока солнечной радиации для гелиосистем горячего водоснабжения / Ю.Г. Качан, С.А. Левченко. // Матеріали VII міжнародної конференції «Відновлювана енергетика XXI століття», с.м.т. Миколаївка, АР Крим. – 2006. – С. 102–105.

5. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосфер. – Л.: Гидрометео-издат. – 1976. – 693 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Tovazhnjanskij L.L. Plastinchatye teploobmenniki v teplosnabzhenii [L.L. Tovazhnjanskij, P.A. Kapustenko, G.L. Havin ta in.]. – Har'kov: NTU «HPI». – 2007. – 448 p.

2. Zinger N.M. Plastinchatye teploobmenniki v sistemah teplosnabzhenija Zinger N.M., Taradaj A.M., Barmina L.S. – M.: Jenergoizdat. – 1995. – 256 p.

3. Taradaj A.M. Osnovy razrabotki plastinchatyh teploobmennikov dlja sistem teplosnabzhenija Taradaj A.M. – Har'kov: Osnova. – 1998. – 192 p.

4. Kachan Ju.G. Modelirovanie potoka solnechnoj radiacii dlja geliosistem gorjachego vodosnabzhenija Ju.G. Kachan, S.A. Levchenko. Materialy VII mizhnarodnoj konferencii «Vidnovljuvana energetika XXI stolittja», s.m.t. Mikolaïvka, AR Krim. – 2006. – p. 102–105.

5. Matveev L.T. Kurs obshhej meteorologii. Fizika atmosfer. – L.: Gidrometeo-izdat. – 1976. – 693 p.

УДК 697.1

Левченко С.А., Баташова Н.А., Мних А.С.

#### **ПРО ВИБІР СТРУКТУРИ МОДЕЛІ КОМБІНОВАНОЇ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ**

У роботі наведені рекомендації щодо основних елементів структури моделі комбінованої системи опалення та запропонована сама структура для комбінування різних джерел енергії. Також запропоновано використання генератора зовнішніх температур для динамічності моделі.

Levchenko S.A., Batashova N.A., Mnykh A.S.

#### **ABOUT CHOICE OF HEATING COMBINED SYSTEM MODEL STRUCTURE**

The resulted recommendations about relation to the basic elements of heating combined system model structure and the structure is offered in the article for combining different energy sources. The use of external temperatures generator is also offered for dynamic of the model.

«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 (210x297 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 соответствие 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**