

ISSN 1999-9801



АУЭС

Образован в 1975

Алматы энергетика және  
байланыс университетінің  
**ХАБАРШЫСЫ**

**ВЕСТНИК**

Алматинского университета  
энергетики и связи

4(2) 43

2018

# **В Е С Т Н И К**

---

**АЛМАТИНСКОГО УНИВЕРСИТЕТА  
ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ**

---

**№ 4(2) (43)**

**2018**

---

**Научно-технический журнал  
Выходит 4 раза в год**

**Алматы**



**АУЭС**  
Образован в 1975

АЛМАТИНСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ЭНЕРГЕТИКИ И СВЯЗИ

**057**  
КОД ВУЗА

ГОСУДАРСТВЕННАЯ ЛИЦЕНЗИЯ НА ОБРАЗОВАТЕЛЬНУЮ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ №01377445 ОТ 4 ОВ 2010. СВИДЕТЕЛЬСТВО ОБ ИНСТИТУЦИОНАЛЬНОЙ АККРЕДИТАЦИИ № 000003

## БАКАЛАВРИАТ

- 5B060200 - Информатика
- 5B070200 - Автоматизация и управление
- 5B070300 - Информационные системы
- 5B070400 - Вычислительная техника и программное обеспечение
- 5B071600 - Приборостроение
- 5B071700 - Теплоэнергетика
- 5B071800 - Электроэнергетика
- 5B071900 - Радиотехника, электроника и телекоммуникации
- 5B073100 - Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды
- 5B081200 - Энергообеспечение сельского хозяйства
- 5B074600 - Космическая техника и технологии
- 5B100200 - Системы информационной безопасности

## КОЛЛЕДЖ

- 0901000 - Электрооборудование электрических станций и сетей
- 0906000 - Теплоэнергетические установки тепловых энергетических станций

## ВОЕННАЯ КАФЕДРА

Министерство обороны РК выделяет квоту студентам АУЭС для получения специальности на военной кафедре, а также предлагает пройти курс «Молодого бойца».

## ЯЗЫКИ ОБУЧЕНИЯ



КАЗАХСКИЙ



РУССКИЙ



АНГЛИЙСКИЙ

## МАГИСТРАТУРА

- 6M070200 - Автоматизация и управление
- 6M071700 - Теплоэнергетика
- 6M071800 - Электроэнергетика
- 6M071900 - Радиотехника, электроника и телекоммуникации
- 6M070400 - Вычислительная техника и программное обеспечение
- 6M070300 - Информационные системы
- 6M073100 - Безопасность жизнедеятельности и защита окружающей среды
- 6M071600 - Приборостроение

## ДОКТОРАНТУРА

- 6D071700 - Теплоэнергетика
- 6D071800 - Электроэнергетика
- 6D071900 - Радиотехника, электроника и телекоммуникации

- 1302000 - Автоматизация и управление
- 1304000 - Вычислительная техника и программное обеспечение
- 1305000 - Информационные системы
- 1306000 - Радиоэлектроника и связь

ИНОГОРОДНИМ ПРЕДОСТАВЛЯЕТСЯ ОБЩЕЖИТИЕ

### НАШИ КОНТАКТЫ:

🏠 г.Алматы, ул.А.Байтурсынулы 126/1  
☎ +7 (727) 292 0303  
✉ aues1975@gmail.com



AUES University



@aues\_university



AUES University



Aues University

#АУЭС  
#АUES  
#АUPЕТ  
#БУДНИАУЭС

A U E S . K Z

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯ

- Р.К. Орумбаев, М.С. Коробков, Г.А. Ханасилова, Т.В. Ходанова**  
ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ МАЛОЙ  
МОЩНОСТИ НОВОЙ СЕРИИ КСГН НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ.....5
- А.А.Кибарин, А.М.Достияров, Д.Р.Умышев, Г.С.Катранова**  
ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ  
ОКСИДОВ АЗОТА ЗА ПРОФИЛЯМИ ЛОПАТОК.....13
- В.В.Стояк, В.А.Завадский, С.К.Кумызбаева**  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ  
ГЕНЕРАЦИЕЙ: ВИРТУАЛЬНЫЕ ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ -  
ЭНЕРГОСИСТЕМЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ.....19
- И.Т.Алдибеков, Р.Л.Мукашева, Т.Д.Иманбекова**  
СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ  
ЭЛЕКТРОДНОГО ПАРОВОДОНАГРЕВАТЕЛЯ.....26
- С.Т.Демесова, Р.А.Омаров, Д.Р.Омар, А.Е.Байболов,  
Т.К.Султангазиев**  
ТЕПЛОНАСОСНАЯ СИСТЕМА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ  
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ.....34
- Ю.М.Голдобин, А.А.Ядрышникова**  
ДИФфуЗИОННОЕ СЖИГАНИЕ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ КОКСОВОЙ  
ПЫЛИ В ПОТОКЕ.....44
- А.А.Торгаев, Ж.А.Дуйсенбек**  
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ.....49
- А.А.Генбач, Н.О.Джаманкулова**  
ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОФОРСИРОВАННОГО ПОРИСТОГО  
ТЕПЛООБМЕННИКА.....54
- С.К.Абильдинова, Р.А.Мусабеков, А.С.Расмухаметова**  
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
РАБОТЫ ПАРОВОМПАССИОННЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ СО  
СТУПЕНЧАТЫМ СЖАТИЕМ.....59

## АВТОМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ

**Ж.Искаков**

КУБТЫҚ БЕЙСЫЗЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ БАР ТІК ҚАТАҢ  
ГИРОСКОПТЫҚ ТЕҢГЕРІЛМЕГЕН РОТОРДЫҢ РЕЗОНАНСТЫҚ  
ТЕРБЕЛІСТЕРІ.....67

**С.Г.Хан, Ә.Ә.Әлібек, Ә.Қ.Батыр**

РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОГО ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО  
ИНФОРМАЦИОННО - МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА (ГИМК)  
ПОВЕРКИ РАСХОДОМЕРОВ.....75

**S.G.Khan, L.K.Ibrayeva, G.N.Bukayeva**

COMPARATIVE ANALYSIS OF EVALUATION METHODS OF  
MEASUREMENT UNCERTAINTY.....82

**Б.Х.Айтчанов, А.С.Тергеусизова**

ПРИМЕНЕНИЕ СИГМА ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ВЫТЯЖКИ  
ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА.....86

**А.К.Аталыкова**

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ИЗДЕЛИЙ ТИПА ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ.....100

**Т.О.Чигамбаев, Б.А.Ниязов**

ӨНДІРІСТІК ЖЕЛІЛЕРГЕ ШОЛУ.....105

**Е.О.Елеукулов**

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ  
ДЛЯ ТОКАРНОГО СТАНКА.....110

**В.А.Мунц, С.А.Ивакина, Ю.Г.Мунц, Н.С.Василевский**

ОБЖИГОВАЯ ПЕЧЬ КИПЯЩЕГО СЛОЯ КАК ОБЪЕКТ  
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ.....116

## **ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА И ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЯ**

**ГРНТИ 55.36.13**

**Р.К.Орумбаев, М.С.Коробков, Г.А.Ханасилова, Т.В.Ходанова**  
Некоммерческое АО «Алматинский университет энергетики и связи»

### **ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОДОГРЕЙНЫХ КОТЛОВ МАЛОЙ МОЩНОСТИ НОВОЙ СЕРИИ КСГН НА ПРИРОДНОМ ГАЗЕ**

**Аннотация:** В работе представлен опыт эксплуатации водогрейных котлов новой серии КСГн, разработанной авторами по техническому заданию ТОО «Алматытеплокоммунэнерго». Котлы данной серии, тепловой мощностью до 3,15 МВт действуют в системе ТОО «АТКЭ» с 1997 года. Новая конструкция позволяет конструкторам изменять и реализовывать оптимальный профиль эффективного котла в зависимости от конкретного вида сжигаемого топлива, что сложно выполнять на классических водогрейных котлах призматической или цилиндрической формы с достаточно жесткими привязками к габаритным размерам. Как показал длительный опыт эксплуатации водогрейных котлов серии КСГн, проведенные модернизации, режимные, наладочные испытания, проведенные после длительной эксплуатации (5-7 лет) в системе ТОО «АТКЭ» технические параметры и экономические характеристики котлов соответствуют современным требованиям. Как показали результаты теплотехнических испытаний модифицированной конструкции котлов КСГн-0,63 и КСГн-1,16 КПД котлов на малом горении достигает 93%, а на нагрузках близких к номинальным 92 %. Была улучшена газоплотность котла.

**Ключевые слова:** водогрейный котел, водотрубный котел, двусветный экран, тепловые испытания.

Первые водогрейные котлы серии КСГн в системе котельных ТОО «Алматытеплокоммунэнерго» были опробованы в 1997-1999 годах. Новые водогрейные котлы КСГн разрабатывались авторами по техническому заданию ТОО «АТКЭ» с целью увеличения единичной мощности, КПД, улучшения экологических показателей и замены морально и физически устаревших отопительных котлов серий «Братск-1Г» и других аналогичных зарубежных котлов.

После промышленных испытаний в течение двух отопительных сезонов 1997-1999 гг. руководство ТОО «Алматытеплокоммунэнерго» приняло решение о создании и широком внедрении новых водогрейных котлов малой мощности от 0,43 до 3,15 МВт в соответствии с ГОСТ 10617, а в дальнейшем с новым Казахстанским ГОСТ 30735-2001. В задачу создания новых водогрейных котлов входила на первом этапе адаптация новых котлов к автоматизированным горелкам Л1-Н с автоматикой серии КСУМ тепловой мощностью от 0,43 до 1,16 МВт. Для более мощных водогрейных котлов (более 1,5 МВт) планировалась установка новых зарубежных автоматизированных горелочных блоков как при работе только на природном газе, так и комбинированных автоматизированных горелочных блоков, работающих на газе и легком жидком топливе. При разработке новых водогрейных котлов предпочтение было отдано водотрубным котлам, с максимальным использованием поверхности труб в активном теплообмене до 96 %, так как обычные традиционные водогрейные водотрубные котлы классического исполнения в активном теплообмене использовали всего до 84 % поверхности труб.

При создании водотрубного котла по Патенту РК [1] авторы решали задачу по обеспечению надежной работы при давлениях воды, соответствующих работе водогрейных котлов по открытой схеме горячего водоснабжения, когда давление воды могло снизиться до предельных величин близких к температуре закипания. Или для режимов работы котлов, когда в условиях эксплуатации регулировались и

перераспределялись расходы воды между соседними котлами в котельной с изменением давления воды.

Для этого отдельно собирался внутренний цельносварной экран, и с горизонтальным расположением параллельных труб, за которым размещался наружный экран, собранный из параллельных труб и расположенных в рассечку относительно труб внутреннего экрана. С фронта котла размещался фронтальной цельносварной экран и с верхней стороны цельносварной потолочный экран закрывал топку и всю конвективную часть котла. Наружная тыльная и две боковые стороны котла закрывались съемными панелями и фиксировались к стальной планке болтами. Конструкция съемных теплоизолированных панелей позволяла оперативно без остановки работы водогрейного котла по водяной стороне производить ревизию, осмотр и обслуживание (очистку) всех конвективных и радиационных поверхностей нагрева. Указанные разработчиками преимущества в эксплуатации, обслуживании и ремонте котлов серии КСГн неоспоримы и еще раз доказываются тем, что до настоящего времени специалисты ремонтной группы ТОО «АТКЭ» изготавливают и устанавливают все большее количество таких котлов на своих участках по РЭКХ (район эксплуатации котельного хозяйства г. Алматы) для работы на природном газе. Поэтому авторы по официальному запросу проектировщиков ТОО «Казахский Сантехпроект» предоставили проектные исходные данные по водогрейным котлам такого типа для проектирования расширения теплоснабжения города Талдыкорган на 2020–2022 годы.

Известно, что для наиболее часто встречающихся на практике значений средней температуры продуктов сгорания (одной и той же среды при  $Pr^{-0,07} = 1$ ), отношение коэффициента теплоотдачи при поперечном обтекании  $\alpha_{п}$  к коэффициенту теплоотдачи при продольном течении  $\alpha_{пр}$ , при прочих практически равных условиях это отношение определяется по формуле:

$$\frac{\alpha_{попер}}{\alpha_{пр}} = 15,65 \left( \frac{wd}{v} \right)^{-0,2} \approx 2,97. (1)$$

Организация поперечного обтекания газами конвективных труб между цельносварным внутренним экраном и наружной теплоизолированной стенкой по Патенту РК [2] позволила разработчикам оптимизировать конвективную поверхность нагрева котла. А последовательная схема циркуляции сначала по трубам цельносварного внутреннего экрана, далее по трубам наружного конвективного экрана и перед выходом из котла последовательно три хода по фронтальному экрану, и далее к выходному верхнему тыльному патрубку позволила сформировать компактную призматическую в плане топку и эффективный водогрейный котел.

Порядок соединения экранов, предложенный авторами в новом котле, позволяет эффективно работать в условиях эксплуатации как в оптимальном режиме с номинальным расходом воды, так и снижать тепловую нагрузку до 20 % - до минимального давления воды. При этом в водогрейных котлах достигнута устойчивая работа на минимальной нагрузке в 20 %. Такой широкий диапазон работы с варьированием и изменением расхода и давления воды в традиционных типовых водогрейных котлах с классической схемой компоновки или в цилиндрических котлах с жаровыми трубами - реализовать не представляется возможным. Такая возможность достигается только в новых водогрейных котлах, конструкция которых предусматривает работу на пониженных давлениях воды. В условиях длительной эксплуатации на водогрейных котлах КСГн-0,63 и КСГн-1,16 проводились испытания с работой на пониженных давлениях до 0,11 - 0,12 МПа с проверкой и установкой граничных условий, при которых возникает закипание воды и возможное опрокидывание циркуляции воды в контуре котла. Только указанные водогрейные котлы серии КСГн имеют расчетную среднюю самую верхнюю точку в верхнем экране с равными половинами от гидравлического сопротивления котла, когда

обе симметричные стороны водогрейного котла от указанной точки имеют равные величины по гидравлическому сопротивлению [1]. Соединение такой точки с резервной емкостью воды, размещенной выше котла, и с открытыми двумя симметричными нижними дренажными вентилями надежно обеспечивает циркуляцию по всем экранам котла, даже при отключении электрической энергии в котельной и отсутствии принудительной циркуляции теплоносителя. Предложенная авторами конструкция полностью устраняет закипание и взрыв в малых водогрейных котлах, продолжающих работать на твердом топливе в мелких котельных.

Конструкция водогрейного котла серии КСГн позволяет варьировать отношением длины топки к поперечному ее сечению, а также отношению радиационной поверхности к конвективной. Новая конструкция позволяет конструкторам изменять и реализовывать оптимальный профиль эффективного котла в зависимости от конкретного вида сжигаемого топлива, что сложно выполнять на классических водогрейных котлах призматической или цилиндрической формы с достаточно жесткими привязками к габаритным размерам.

При тепловых расчетах конвективной части котла использовалась эмпирическая формула, полученная авторами в результате экспериментального исследования теплообмена и гидродинамики на натуральных элементах каналов с поперечным обтеканием однорядного, двухрядного и трехрядного ряда труб, применительно к конвективному каналу котлов серии КСГн. Для поперечного обтекания одного ряда труб, размещенного в канале между цельносварными трубными панелями, в тепловых расчетах и при конструировании применялась эмпирическая формула авторов в следующем виде:

$$Nu = 0,72 \times Re^{0,53} \times Pr_{ж}^{0,636} \times \left( \frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0,25} \quad (2)$$

На рисунке 1 представлен общий вид водогрейного котла КСГн-0,63 с тыльной стороны в первом варианте сборки со съёмными прижимными теплоизолированными панелями толщиной до 75 мм, с фронтальной стороны котла в первой партии котлов устанавливались горелки Л1-Н. Водогрейный котел КСГн-1,16 изготовлен по такой же конструктивной схеме и в основу теплового расчета котла, при определении коэффициента теплоотдачи конвективной части поверхности нагрева, использовалась эмпирическая формула (2). Конструктивной особенностью водогрейного котла КСГн-1,16 было удлинение топки, при использовании зарубежных автоматизированных горелок с длинным факелом на природном газе и зауженным с тыльной стороны закранным газоходом.

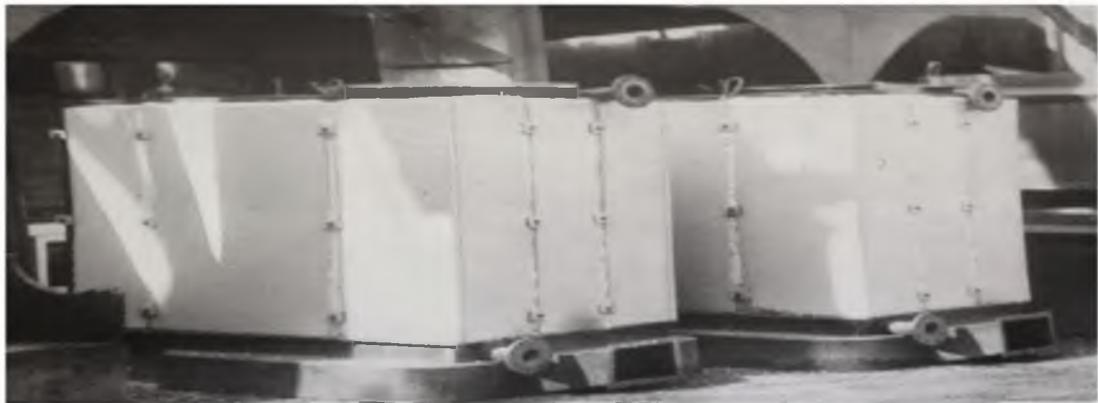


Рисунок 1 – Фотография общего вида котлов КСГн-1,16

Оптимальная геометрия топочной части котла КСГн-1,16 с более зауженным с тыльной стороны закранным газоходом обуславливалась размещением сборного

коллектора короба газохода с тыльной нижней стороны котла. А также с целью обеспечения равномерного обтекания продуктами сгорания боковых конвективных поверхностей с размещенным по всей длине топки поперечным одним рядом труб.

Как показал длительный опыт эксплуатации водогрейных котлов серии КСГн и проведенные модернизации с проверкой режимов работы и наладочные испытания, проведенные после длительной эксплуатации (5-7 лет) в системе ТОО «АТКЭ», технические параметры и экономические характеристики котлов вполне удовлетворяют руководство компании.

В таблице 1 приведены основные технико-экономические показатели по итогам теплотехнических испытаний первых головных двух водогрейных котлов КСГн-0,63 стационарный №1 и №2 на двух режимах с горелкой Л1-Н и автоматикой КСУМ на малом и большом горении по тепловой производительности.

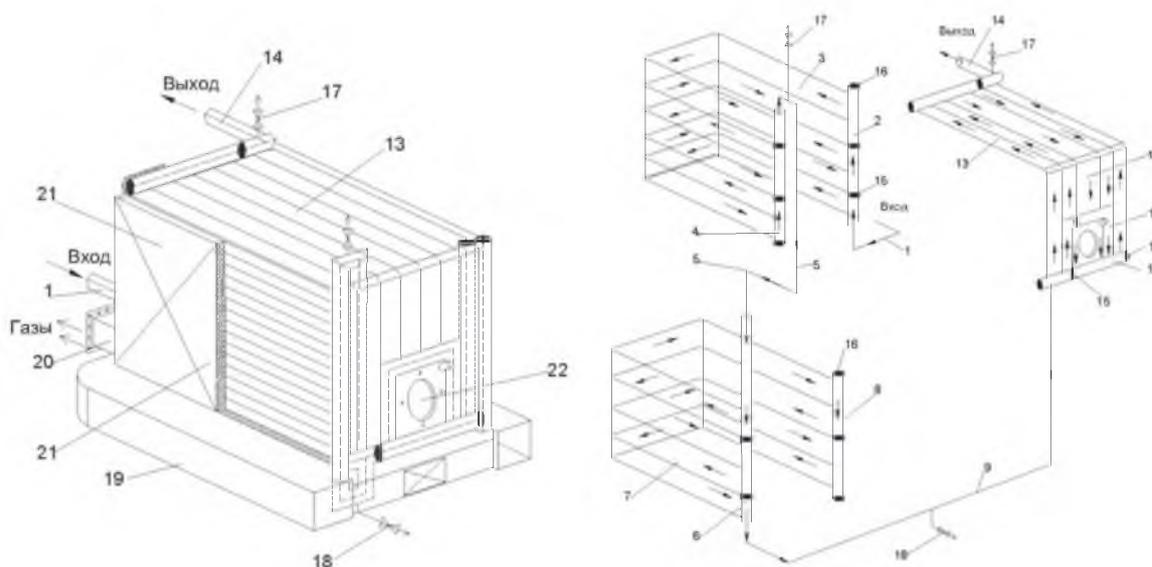
Таблица 1– Результаты испытаний на котлах КСГн-0,63 (ст. №1 и №2) в котельной «Тех. Лицей №71» РЭКХ 3 участок, г. Алматы

	Котел №1		Котел №2	
	малое	большое	Малое	большое
Тепловая мощность, МВт,	0,174	0,417	<b>0,417</b>	<b>0,51</b>
Давление газа, кгс/см <sup>2</sup>	15	45	25	30
Расход воды через котел, т/ч	30	30	20	20
Температура воды вход/выход, °С	52/57	51/63	62/80	62/84
Расход газа по прибору, м <sup>3</sup> /час	21	51	50	62
Гидравлическое сопротивление котла, кгс/см <sup>2</sup>	0,9	0,9	0,9	0,9
КПД, на природном газе, %	87,03	87,48	88,57	87,64
Температура уличного воздуха °С	20	20	20	20
Содержание O <sub>2</sub> в уходящих газах, %	11,8	11,2	12,2	12,6
Разрежение в топке, Па	5	10	10	12
Температура уходящих газов, °С	120	155	130	140
Потери тепла с уходящими q <sub>2</sub> , %	8,3	10,6	9,5	10,8
Потери тепла с хим. недожог. q <sub>3</sub> , %	0	0	0	0
Потери тепла в окружающую среду, q <sub>5</sub> , %	4,67	1,94	1,94	1,59
Удел. расход условного топлива, кг.у.т./Гкал	164,16	164,16	164,16	164,16
Теплота сгорания газа, Q <sub>н</sub> , ккал/м <sup>3</sup>	8048,4	8048,4	8048,4	8048,4
Удел. расход натурального топлива, м <sup>3</sup> /Гкал	140,3	139,58	137,86	139,32

По результатам теплотехнических испытаний составлена режимная карта котла, являющаяся регламентирующим документом для работы операторов в котельной «Технический Лицей №71» РЭКХ, 3 участок. Тепловая мощность котла изменялась от 0,174 МВт (0,15 Гкал/час) до 0,417 МВт (0,36 Гкал/час) на первом котле №1, с расходом газа (калорийностью 8048,4 ккал/м<sup>3</sup>) на малом горении - 21 м<sup>3</sup>/час и на большом горении - 51 м<sup>3</sup>/час. Избыток воздуха α в уходящих газах составил соответственно от 2,15 до 2,02, а содержание окиси углерода СО в уходящих газах составило ноль процентов. Тепловая мощность котла №2 изменялась от 0,417 МВт (0,36 Гкал/час) до 0,51 МВт (0,44 Гкал/час), с расходом газа на малом горении - 50 м<sup>3</sup>/час и на большом горении - 62 м<sup>3</sup>/час с избытком воздуха α в уходящих газах при малом горении - 2,24 и при большом горении - 2,34. Большие значения коэффициента избытка воздуха объясняются существенными присосами воздуха через зазоры между наружными теплоизолированными стенками и недостаточно плотного прилегания самих стенок к вертикальным полосам из-за их нагрева и теплового расширения. Низкие значения КПД и высокие значения удельных расходов натурального и условного топлив объясняются отсутствием в первых котлах поперечных профильных пластин, набрасывающих поток газов на каждую конвективную

однорядную трубу, интенсифицирующие теплоотдачу и дополнительно увеличивающие коэффициент теплоотдачи на 40-45% относительно коэффициента теплоотдачи при обычном поперечном обтекании газами. Качество сжигания контролировалось анализом состава уходящих газов непрерывно. Из-за неплотного прилегания и достаточно малой толщины теплоизолированных панелей в первых образцах водогрейных котлов КСГн-0,63 были получены большие величины тепловых потерь в окружающую среду  $q_5$ , доходившие до 4,67%.

В результате оптимизации двусветных экранов, разработки новой конструкции трубного ограждения котла, использования нижнего экрана, выполненных авторами (рисунок 2), удалось существенно снизить потери с наружными ограждениями и значительно повысить эффективность котла.



1 – вход воды, 2 – правый внутренний цельносварной экран, 4 – левый внутренний коллектор, 5 – перепускной патрубок, 6 – левый внешний коллектор, 7 – наружный двусветный экран, 8 – правый внешний коллектор, 9 – перепускной патрубок, 10 – нижний фронтальный коллектор, 11 – фронтальная коллекторная рама, 12 – фронтальный экран, 13 – потолочный экран, 14 – выход воды, 15 – перегородка, 16 – заглушка, 17 – отвод воздуха, 18 – дренаж, 19 – короб газохода, 20 – выход газов, 21 – декоративный кожух, 22 – установка горелки

Рисунок 2 - Конструктивная схема нового водогрейного котла КСГн

В таблице 2 представлены результаты теплотехнических испытаний водогрейного котла КСГн-0,63, а в таблице 3 КСГн-1,16.

Таблица 2 - Результаты испытаний котлов КСГн-0,63 (РЭКХ 2 котельная Таштитова)

	Котел №4		Котел №5	
	малое	большое	Малое	большое
Тепловая мощность, МВт,	0,28	0,4	<b>0,26</b>	<b>0,5</b>
Давление газа, кгс/см <sup>2</sup>	1,035	1,05	1,015	1,095
Расход воды через котел, т/ч	20	20	20	20
Температура воды вход/выход, °С	48/62	48/68	48/61	48/73
Расход газа по прибору, м <sup>3</sup> /час	38	54	35	67
Гидравлическое сопротивление котла, кгс/см <sup>2</sup>	0,9	0,9	0,9	0,9
КПД, на природном газе, %	90,13	90,49	88,98	89,98

	Котел №4		Котел №5	
	малое	большое	Малое	большое
Температура дутьевого воздуха, °С	20	20	20	20
Содержание O <sub>2</sub> в уходящих газах, %	6,9	5,7	8,8	8,1
Температура уходящих газов, °С	113	138	115	141
Потери тепла с уходящими q <sub>2</sub> , %	5,41	6,39	6,21	7,52
Потери тепла с хим. недожогом q <sub>3</sub> , %	0	0	0	0
Потери тепла в окружающую среду, q <sub>5</sub> %	4,46	3,13	4,81	2,5
Удел. расход условного топлива, кг.у.т./Гкал	158,5	157,88	160,55	158,77
Теплота сгорания газа, Q <sub>н</sub> , ккал/м <sup>3</sup>	8203	8203	8203	8203
Удел. расход натурального топлива, м <sup>3</sup> /Гкал	135,26	134,72	137,01	135,49

Таблица 3 - Результаты испытаний котлов КСГн-1,16 (РЭКХ 4 котельная Л.Толстого)

	Котел №3		Котел №9	
	малое	большое	Малое	большое
Тепловая мощность, МВт,	0,5	0,84	<b>0,42</b>	<b>0,6</b>
Давление газа, кгс/см <sup>2</sup>	70	153	25	30
Расход воды через котел, т/ч	30	30	30	30
Температура воды вход/выход, °С	48/73	48/90	45/59	45/84
Расход газа по прибору, м <sup>3</sup> /час	65	111	50	62
Гидравлическое сопротивление котла, кгс/см <sup>2</sup>	0,9	0,9	0,9	0,9
КПД, на природном газе, %	93,46	93,95	92,85	92,74
Температура дутьевого воздуха, °С	22	22	22	22
Содержание O <sub>2</sub> в уходящих газах, %	7,5	3	8,7	7,2
Температура уходящих газов, °С	95	116	95	113
Потери тепла с уходящими q <sub>2</sub> , %	4,44	4,52	4,79	5,4
Потери тепла с хим. недожогом q <sub>3</sub> , %	0	0	0	0
Потери тепла в окружающую среду, q <sub>5</sub> %	2,1	1,53	2,37	1,87
Удел. расход условного топлива, кг.у.т./Гкал	152,85	152,06	153,86	154,05
Теплота сгорания газа, Q <sub>н</sub> , ккал/м <sup>3</sup>	8197	8197	8197	8197
Удел. расход натурального топлива, м <sup>3</sup> /Гкал	130,51	129,84	131,38	131,54

Тепловое напряжение конвективной поверхности  $V_p Q / H_k$  и тепловое напряжение объема топки  $V_p Q / V_T$  нового котла КСГн-0,63 сравнивается с классическими серийными котлами как призматическими, так и цилиндрическими.

За счет новой конструкции с использованием двухсветного экрана в конструкции котлов КСГн при теоретических поверочных расчетах были получены высокие технико-экономические показатели. Эти данные были подтверждены экспериментально. При проведении испытаний были смоделированы непроектные условия эксплуатации для котла, а именно 20% от номинальной нагрузки и 120% с превышением номинальной мощности. Результаты испытаний показали стабильность работы котлов на обоих режимах.

В настоящее время разработчиками конструкции водогрейных котлов серии КСГн производится модернизация и доработка с учетом особенностей и замечаний эксплуатирующих организаций и доводится до совершенства, а технические и экономические показатели новых водогрейных котлов не имеют аналогов по СНГ [3].

Работа выполнена в рамках грантового финансирования научных исследований по теме АР05133388 «Исследование и разработка широкой линейки перспективных водогрейных котлов тепловой мощностью от 0,63 до 145 МВт на природном газе, жидком и твердом топливе для собственного промышленного производства в Казахстане».

### **Выводы**

Опыт эксплуатации водогрейных котлов КСГн-0,63 и КСГн-1,16 в котельных г. Алматы в системе ТОО «АТКЭ» при работе на природном газе показал высокий уровень КПД, низкий уровень выбросов вредных веществ и парниковых газов, при соблюдении в надлежащем состоянии поверхностей нагрева и прижимных теплоизолированных панелей, обеспечивающих низкие присосы воздуха. За весь период эксплуатации новых котлов (более 30 штук) до настоящего времени квалифицированный персонал соблюдает и выполняет жесткие требования по соблюдению режимов, по качеству питания котлов химически очищенной водой и технически корректно проводит консервацию котлов в летний период простоя.

Как показали результаты теплотехнических испытаний модифицированной конструкции котлов КСГн-0,63 и КСГн-1,16, КПД котлов на малом горении составлял порядка 93 %, а на нагрузках, близких к номинальным, порядка 92 %.

В настоящее время конструкции водогрейных котлов серии КСГн дорабатываются с учетом особенностей и замечаний эксплуатирующих организаций. При прямом участии специалистов ТОО «АТКЭ» проводится изготовление и плановая замена физически и морально устаревших водогрейных котлов на котлы малой тепловой мощности КСГн-0,63, КСГн-1,16 и КСГн-2,32 в городе Алматы.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- 1 Орумбаев Р.К., Чижов В.Э. и др. «Водогрейный котел» // Патент Республики Казахстан. №11229.. Оpubл. Бюлл. №2, 15.02.2002г.
- 2 Орумбаев Р.К. Айрих Ю.Э. и др. «Водогрейный котел» // Патент Республика Казахстан. №18797.. Оpubл. Бюлл. №9, 17.09.2007 г.
- 3 Орумбаев Р.К., Орумбаева Ш.Р. Кибарин А.А., Касимов А.С, Ходанова Т.В., Коробков М.С. «Водогрейный котел» // Патент РК на изобретение. №32881. Оpubл. 18.06.2018. Бюлл. №22.

### **REFERENCES**

- 1 Orumbayev R.K., Chijov V.E. and others. «Hot-water boiler» // Patent of the Republic of Kazakhstan №11229.. publ. in bull. №2, 15.02.2002.
- 2 Orumbayev R.K. Airich Y.E. and others. « Hot-water boiler » // Patent of the Republic of Kazakhstan №18797.. publ. in bull. №9, 17.09.2007.
- 3 Orumbayev R.K., Orumbayeva Sh.R. Kibarin A.A., Kassimov A.S, Khodanova T.V., Korobkov M.S. «Hot-water boiler» // Patent of the Republic of Kazakhstan. №32881. publ. in bull.№22, 18.06.2018.

**ТАБИҒИ ГАЗДА ҚЫЗМЕТ АТҚАРАТЫН КСГН ЖАҢА СЕРИЯСЫНДАҒЫ ТӨМЕН  
ҚУАТТЫ СУ ЖЫЛЫТУ ҚАЗАДЫҚТАРЫН ПАЙДАҒА АСЫРУТӘЖІРИБЕСІ**

Орумбаев Р.К., Коробков М.С., Ханасилова Г.А., Ходанова Т.В.

«Алматы энергетика және байланыс университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамы

**Андатпа.** Жұмыста «Алматы жылу коммунал энергия» ЖШС-тің техникалық тапсырмасы бойынша авторлармен әзірленген, жаңа КСГн сериясындағы су жылыту қазандықтарын пайдаға асыруының тәжірибесі ұсынылған. Бұл сериядағы қазандықтар 3,15 МВт дейінгі жылулық қуатты, 1997 жылдан бастап «АЖКЭ» ЖШС-нің жүйесінде әрекет етеді. Жаңа құрылым құрастырушыларға, габариттік өлшемдеріне жеткілікті күрделі байланыстағы призмалық немесе цилиндрлік пішімдегі классикалық су жылыту қазандықтарында орындауға күрделі, нақты жағылатын отын түрінен тәуелділікте тиімді қазандықтың оңтайлы профилін жүзеге асыруға және өзгертуге мүмкіндік береді. КСГн сериясындағы су жылыту қазандықтарын пайдаға асыруының ұзақ мерзімдегі тәжірибесі көрсеткендей, жүргізілген жаңартулар, тәртіптік, реттеу сынақтары, «АЖКЭ» ЖШС-нің жүйесінде ұзақ мерзім (5-7 жыл) пайдаға асырылғаннан кейін қазандықтардың техникалық параметрлері және экономикалық сипаттамалары қазіргі заманғы талаптарға сәйкес. КСГн-0,63 және КСГн-1,16 қазандықтарының жаңартылған құрылымдарына жылутехникалық тәжірибелердің нәтижелері көрсеткендей, қазандықтардың ПӘК-і аз жануда 93%-ға жетеді, ал номиналдыға жақын төменінде - 92%. Қазандықтың ғазтығыздығы жақсартылған.

**Кілт сөздер:** су жылыту қазандығы, сукұбырлық қазандық, қос жарық экран, жылулық тәжірибе.

**THE EXPERIENCE OF OPERATION OF SMALL HEAT CAPACITY KSGN NEW SERIES  
HOT-WATER BOILERS WORKING ON NATURAL GAS**

Orumbayev R.K., Korobkov M.S., Khanassilova G.A., Khodanova T.V.

Non-profit JSC "Almaty university of power engineering and telecommunications"

**Annotation.** The paper presents the experience of operation of hot water boilers of a new KSG series, developed by the authors on the terms of reference of LLP "Almaty teplokommunenergo" (ATKE). Boilers of this series of heat capacity up to 3.15 MW has been operated under the LLP "ATKE" since 1997. The new design allows designers to change and implement the optimal profile of the efficient boiler, depending on the specific type of fuel burned, which is difficult to perform on the prismatic or cylindrical shaped classic hot-water boilers with a strong requirements to the overall boiler dimensions. Long-term experience of operation of KSGn series hot-water boilers, as well as all modernizations, profile and adjustment thermal tests carried out after long operation time (5-7 years) under the LLP "ATKE" showed that technical parameters and economic characteristics of boilers still meet modern requirements. Results of thermal tests of the modified design KSGn-0,63 and KSGn-1,16 hot-water boilers showed that the boiler efficiency rate in low combustion regime reaches by 93% and in close to nominal regime – is around 92%. The gas density of the boiler has been improved.

**Key words:** hot-water boiler, water tubes boiler, biradiated furnace screen, thermal tests

621.438

Кибарин А.А.<sup>1</sup>, Достияров А.М.<sup>2</sup>, Умышев Д.Р.<sup>3</sup>, Катранова Г.С.<sup>4</sup>

<sup>1</sup>доцент, заведующий кафедры «ТЭУ» Алматинского университета энергетики и связи

<sup>2</sup>д.т.н., профессор кафедры «Теплоэнергетика» Казахского Агротехнического университета им С.Сейфуллина

<sup>3</sup>PhD, сениор - лектор кафедры «Энергетика» КазННТУ им К.И.Сатпаева

<sup>4</sup>докторант кафедры «ТЭУ» Алматинского университета энергетики и связи

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА ЗА ПРОФИЛЯМИ ЛОПАТОК

**Аннотация.** В статье представлены результаты анализа численного моделирования процессов горения за профилями лопаток с накладками с углами 45°. Приводятся контуры температур и графики концентраций оксидов азота. Проанализированы основные механизмы образования оксидов азота в данном частном случае. Представлены теоретические положения для расчетов профилей лопаток.

Показано, что лопаточные профили имеют хорошие показатели стабилизации при различных избытках топлива, а также низкие концентрации оксидов азота на выходе из моделируемой области.

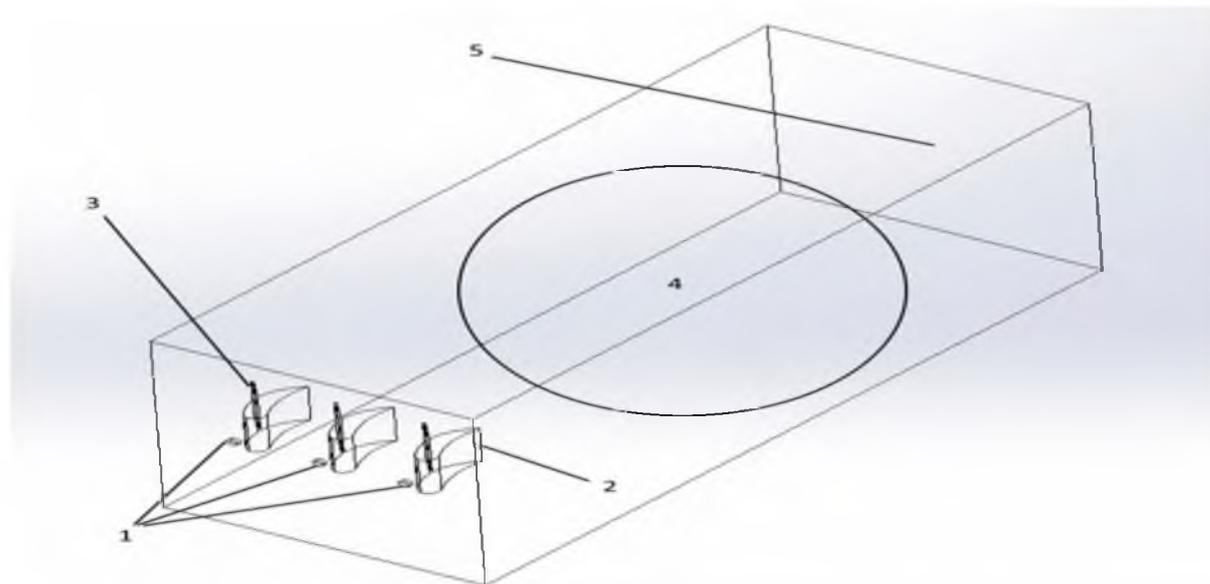
**Ключевые слова:** камеры сгорания, профили лопаток, оксиды азота, избыток топлива, воздух.

**Введение.** Главной идеей статьи является изучения влияния избытка топлива (воздуха), т.е. «бедные» и «богатые» концентрации и их влияние на структуру пламени и зоны рециркуляции и срывов. Это интересно с нескольких точек зрения. Во первых, целью изучения лопаточных профилей является разработка камер сгорания газотурбинных установок, которые используются повсеместно в энергетике, судостроении и авиастроении. В процессе эксплуатации турбин возможно появление режимов при которых существует большой избыток воздуха или так называемые «бедные» режимы, а также существует обратные режимы, когда топлива больше чем необходимого воздуха или так называемые «богатые» режимы. Учитывая это, необходимо исследовать уголки для нахождения оптимальных режимов работы.

Другим важным момент является то, что при «обеднении» смеси происходит химический недожог топлива (нам казалось наоборот – при богатом режиме быстрее произойдет появление недожога), что в целом снижает температуру в зоне горения. Известно [1-10,13], что снижение температуры снижает концентрацию оксидов азота в уходящих газах. Обогащение же смеси приводит к появлению зон с высокой концентрацией топлива, что увеличивает концентрацию оксидов азота в уходящих газах.

Учитывая все вышесказанное, целесообразно произвести численный анализ процессов в достаточно широком диапазоне коэффициента избытка топлива (воздуха).

**1. Общие данные о процессе моделирования.** На рисунке 1 представлен изометрический вид на область моделирования.



1 – сопла для подачи воздуха, 2 – профили лопаток, 3 – пластинки с углом  $45^{\circ}$ , 4 – область горения, 5 – выходной участок.

Рисунок 1 – Изометрический вид области моделирования

Область моделирования состоит из сопел для подачи топлива, трех профилей лопаток, причем все профили участвуют в процессе горения. Профили снабжены регулируемые накладками, угол которых был равен  $45^{\circ}$  от касательной к выпуклой стороне профиля. Угол был выбран исходя из прошлых результатов моделирования и [1-10]. Начальные параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Начальные параметры

Расход топлива, кг/ч	Скорость воздуха, м/с (бралась согласно экспериментальной установке)	$\varphi$ , коэффициент избытка топлива по [1]	Начальная температура окислителя (воздуха)/топлива, К	Количество тетраэдрических элементов в моделируемой области
1,1-12,6	3	0,2-2,3	300	200000

При моделировании использовалась модель турбулентности k- $\epsilon$  realizable, которая согласно [12] является наиболее оптимальным решением.

При моделировании скорость была постоянной, а значение расхода топлива изменялось в диапазоне 1,1-12,6, что обеспечивало изменение коэффициента избытка топлива в диапазоне  $\varphi=0,2-2,3$  ( $\alpha=5-0,4$ ). Избыток топлива (воздуха) рассчитывался согласно [1].

## 2. Результаты

**Температура.** Контуры температур в зависимости от избытка топлива  $\varphi$  представлены на рисунке 2. Видно, что при стехиометрическом горении  $\varphi=1$ , существует высокотемпературная зона. При снижении избытка топлива высокотемпературная зона отсутствует. Увеличение избытка топлива приводит к утоньшению высокотемпературной зоны. По сути, это говорит о недостатке воздуха и высоком недожоге топлива за счет отсутствия окислителя.

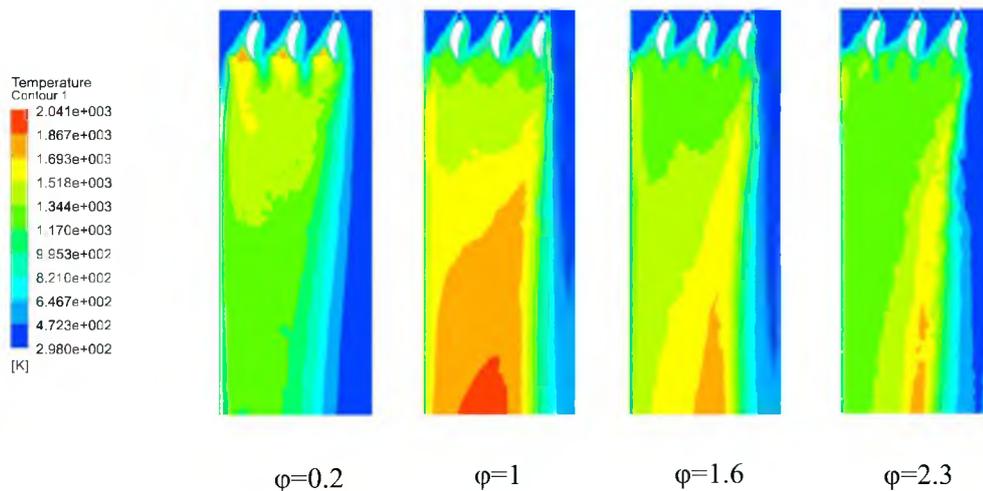


Рисунок 2 – Температурные контуры в зависимости от избытка топлива  $\phi$

**Оксиды азота.** На рисунке 3 представлены зависимости концентрации оксидов азота (ppm) от избытка топлива в зоне горения. Видно, что на процесс образования в значительной мере влияет концентрация топлива в топливно-воздушной смеси. При стехиометрической концентрации ( $\phi=1$ ) имеются максимальные концентрации оксидов азота, что объясняется максимальной температурой в зоне горения. Снижение же концентрации оксидов азота связано с высокой степенью недожога топлива, проявляющейся в снижении температуры в зоне горения. Причем увеличение избытка топлива ведет к снижению концентрации оксидов азота. Это связано с тем, что увеличение расхода ТВС снижает время нахождения газов в высокотемпературной зоне.

Механизмы образования оксидов азота по обе стороны стехиметрии различны. До стехиометрии - это в основном время нахождения газов в высокотемпературной зоне, после стехиометрии - это низкое перемешивание топлива с воздухом, создающее локальные зоны высоких температур, в которых существует большой избыток топлива.

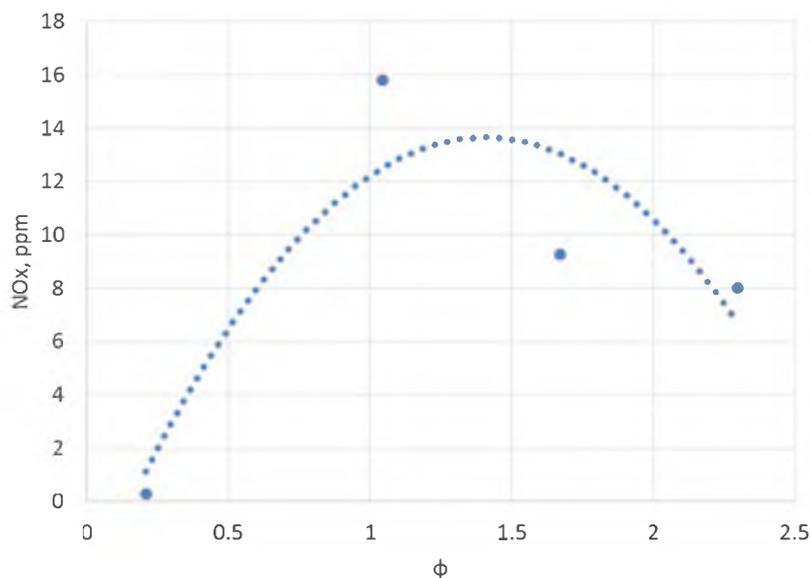


Рисунок 3 – Зависимость эмиссии оксидов азота от коэффициента избытка топлива

**Температура на выходе.** На рисунке 4 представлены температуры на выходе из зоны моделирования. Как видно из рисунка, увеличение избытка топлива приводит к снижению температуры на выходе из моделируемой области. Причем максимум

температур приходится на стехиометрическое соотношение избытка топлива, что подтверждают предыдущие графики и температурные контуры. Снижение избытка топлива (в сторону уменьшения) приводит к значительному снижению температуры, что очевидно в виду «размывания» температуры большим количеством воздуха (или топлива).

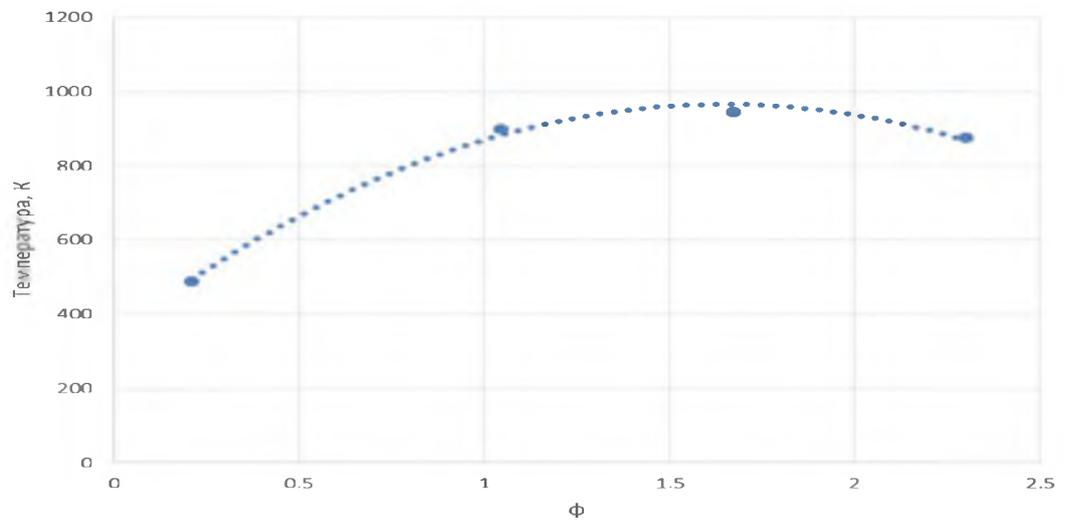


Рисунок 4 – Температуры продуктов сгорания на выходе из зоны моделирования

**Недожог топлива.** На рисунке 5 представлена зависимость концентрации топлива на выходе из моделируемой области от коэффициента избытка топлива  $\phi$ . Очевидно, что снижение концентрации топлива приводит к уменьшению недожога топлива. Увеличение же концентрации топлива (т.е. увеличение коэффициента избытка топлива) приводит к увеличению химического недожога. Соответственно увеличивается концентрация топлива на выходе из моделируемой области.

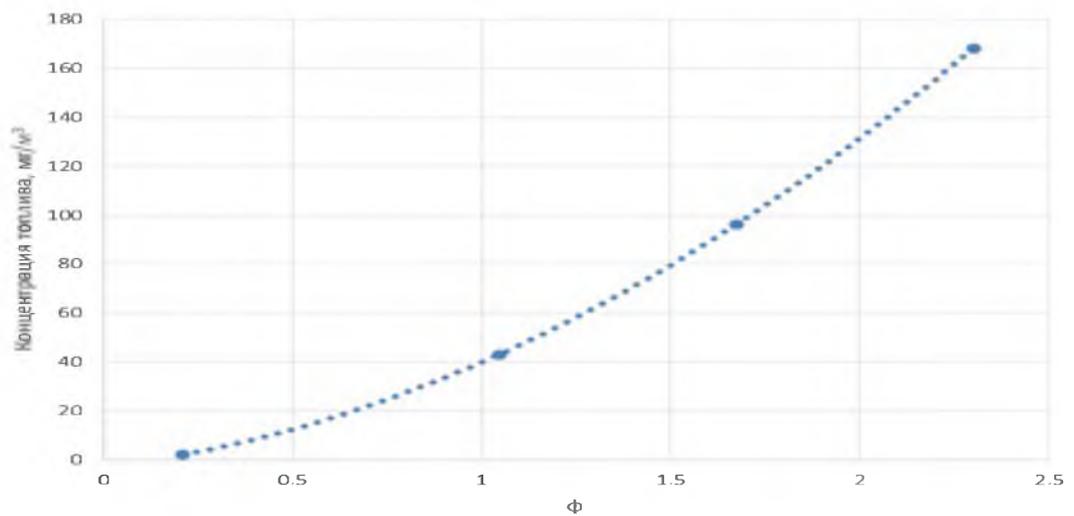


Рисунок 5 - Зависимость концентрации топлива на выходе из моделируемой области от коэффициента избытка топлива  $\phi$

**Заключение.** Исходя из проведенного анализа можно сделать вывод, что профили лопаток имеют достаточно высокие стабилизационные показатели. Однако следует иметь в виду, что в данном моделировании не учтены потери давления, которые в большинстве случаев увеличиваются при повышении стабилизации за счет увеличения «плохообтекаемости».

Повышение коэффициента избытка топлива, очевидно, приводит к повышению недожога топлива, снижению температуры в зоне горения и соответственно к снижению

концентрации оксидов азота на выходе из моделируемой области. Максимальные концентрации оксидов азота и температуры соответствуют и стехиометрическим концентрациям топлива и воздуха.

Для полноценного анализа необходимо продолжить изучение турбинных профилей с точки зрения стабилизации пламени и взаимодействия с друг другом.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Достияров А.М., Умышев Д.Р., Катранова Г.С. Численное моделирование процессов горения за профилями лопаток. В сб. материалов// Матер. 8-ой междунаод. науч. – прак. конф. «Академическая наука - проблемы и достижения». - North Charleston; USA, 2017. - С.82-87.
2. Умышев Д.Р., Достияров А.М., Туманов М.Е., Тютёбаева Г.М., Результаты исследования уголковых стабилизаторов для камер сгорания// Сбор. матер. 8-ой междунаод. научи. - прак. конф. «Advances in Science and Technology». – М.: Актуальность.РФ, 2017. – С. 159-160.
3. Dias R. Umyshev, Abay M. Dostiyarov, Musagul Y. Tumanov, Quiwang Wang. Experimental investigation of v-gutter flameholders// Thermal Science. – 2017. Vol.21, № 2. - P. 1011-1019.
4. Umyshev et.al. Application of semi perforated v-gutter flameholders in heat-generating systems for autonomous building heating// International journal of mechanics and mechanotronics. – 2016. - Vol.16, №6. - P. 63-69.
5. Dias R. Umyshev, Abay M. Dostiyarov, Musagul Y. Tumanov, Galia M. Tuytebayeva. Experimental investigation of recirculation zones behind v-gutter type flameholders// International Journal of Pharmacy and Technology. – 2016. - Vol. 8, №4. - P. 27369-27380.
6. Umyshev D.R., Dostiyarov A.M., Tyutebayeva G.M. Experimental investigation of the management of NOx emissions and their dependence on different types of fuel supply// Espacios. – 2017. - Vol.38, №24. – P.17.
7. Достияров А.М., Туманов М.Е., Умышев Д.Р. Численное моделирование процессов горения в газовой микрофакельной горелке// Матер. форума с международным участием «Неделя науки СПбПУ». – Санкт-Петербург: СПбПУ, 2015. - С. 174-176.
8. Достияров А.М., Туманов М.Е., Умышев Д.Р. Экспериментальное исследование горелок с микрофакельными насадками// Вестник КазНТУ. – 2016. - №1. - С. 174-182.
9. Достияров А.М., Тютёбаева Г.М., Умышев Д.Р. Результаты исследования уголковых стабилизаторов для камер сгорания ГТД// Вестник ПГУ. – 2016. - №1. - С. 68-80.
10. Достияров А.М. Разработка топливосжигающих устройств с микрофакельным горением и методики их расчета: дис. ... док. техн. наук: 05.14.04. - Алматы: КазНИИ Энергетики им. Чокина, 2000. – 237 с.
11. Достияров А.М., Умышев Д.Р., Мусабеков Р.А., Яманбекова А.К. Изучение влияния выходного регистра на процессы горения в воздушной форсунке стабилизатора. Ежемесячный международный научный журнал «European multi science journal». - Szabadság út 27, Budaörs, Венгрия, 2017. – С. 73-77.
12. ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide: «ANSYS» <http://ansys.com> 2009.
13. Лефевр А. Процессы в камерах сгорания ГТД. - М.: Изд-во Мир, 1986. – 566 с.

#### **REFERENCES**

1. Dostiyarov A.M., Umyshev D.R., Katranova G.S. Chislennoe modelirovanie protsessov goreniya za profilyami lopatok. V sb. materialov// Mater. 8-oy mezhdunarod. nauch. – прак. конф. «Akademicheskaya nauka - problemy i dostizheniya». - North Charleston; USA, 2017. - S.82-87.
2. Umyshev D.R., Dostiyarov A.M., Tumanov M.E., Tyutebaeva G.M., Rezultaty issledovaniya ugolkovyih stabilizatorov dlya kamer sgoraniya// Sbor. mater. 8-oy mezhdunarod. nauchn. - прак. конф. «Advances in Science and Technology». – М.: Aktualnost.RF, 2017. – S. 159-160.
3. Dias R. Umyshev, Abay M. Dostiyarov, Musagul Y. Tumanov, Quiwang Wang. Experimental investigation of v-gutter flameholders// Thermal Science. – 2017. Vol.21, # 2. - P. 1011-1019.
4. Umyshev et.al. Application of semi perforated v-gutter flameholders in heat-generating systems for autonomous building heating// International journal of mechanics and mechanotronics. – 2016. - Vol.16, #6. - P. 63-69.

5. Dias R. Umyshev, Abay M. Dostiyarov, Musagul Y. Tumanov, Galia M. Tuytebayeva. Experimental investigation of recirculation zones behind v-gutter type flameholders// International Journal of Pharmacy and Technology. – 2016. - Vol. 8, #4. - P. 27369-27380.
6. Umyshev D.R., Dostiyarov A.M., Tuytebayeva G.M. Experimental investigation of the management of NOx emissions and their dependence on different types of fuel supply// Espacios. – 2017. - Vol.38, #24. – P.17.
7. Dostiyarov A.M., Tumanov M.E., Umyshev D.R. Chislennoe modelirovanie protsessov goreniya v gazovoy mikrofelknoy gorelke// Mater. foruma s mezhdunarodnyim uchastiem «Nedelya nauki SPbPU». – Sankt-Peterburg: SPbPU, 2015. - S. 174-176.
8. Dostiyarov A.M., Tumanov M.E., Umyshev D.R. Eksperimentalnoe issledovanie gorelok s mikrofelknyimi nasadkami// Vestnik KazNTU. – 2016. - #1. - S. 174-182.
9. Dostiyarov A.M., Tuytebaeva G.M., Umyshev D.R. Rezultaty issledovaniya ugolkovyih stabilizatorov dlya kamer sgoraniya GTD// Vestnik PGU. – 2016. - #1. - S. 68-80.
10. Dostiyarov A.M. Razrabotka toplivoszhigayuschih ustroystv s mikrofelknyim goreniem i metodiki ih rascheta: dis. ... dok. tehn. nauk: 05.14.04. - Almaty: KazNII Energetiki im. Chokina, 2000. – 237 s.
11. Dostiyarov A.M., Umyshev D.R., Musabekov R.A., Yamanbekova A.K. Izuchenie vliyaniya vyihodnogo registra na protsessyi goreniya v vozdushnoy forsunke stabilizatore. Ezhemesyachnyiy mezhdunarodnyiy nauchnyiy zhurnal «European multi science journal». – Szabads
12. ANSYS FLUENT 12.0 Theory Guide: «ANSYS» <http://ansys.com> 2009.
13. Lefevr A. Protssyyi v kamerah sgoraniya GTD. - M.: Izd-vo Mir, 1986. – 566 s.

#### NUMERICALSIMULATION OF THE FORMATION OF NITROGEN OXIDES BEHIND THE PROFILES OF THE BLADES

Kibarın A.A.<sup>1</sup>, Dostiyarov A.M.<sup>2</sup>, Umyshev D.R.<sup>3</sup>, Katranova G.S.<sup>4</sup>

**Annotation.** The article presents the results of the analysis of numerical modeling of combustion processes behind profiles of blades with plates with angles of 45°. The contours of temperatures and graphs of concentrations of nitrogen oxides are given. The basic mechanisms of the formation of nitrogen oxides in this particular case is analyzed. Theoretical positions for calculating blade profiles are presented.

It has been shown that blade profiles have good stabilization indicators at various fuel ratios, as well as low concentrations of nitrogen oxides at the exit from the simulated area.

**Keywords.** Combustion chambers, blade profiles, nitrogen oxides, excess fuel, air.

#### ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ АЗОТА ЗА ПРОФИЛЯМИ ЛОПАТОК

Кибарин А.А.<sup>1</sup>, Достияров А.М.<sup>2</sup>, Умышев Д.Р.<sup>3</sup>, Катранова Г.С.<sup>4</sup>

**Андатпа.** Мақалада 45° пластинасы бар турбиналық профильдердің сандық модельдеу нәтижелері келтірілген. Температуралық контурлар және азот тотығының концентрациясы графиктері келтірілген. Осы жеке жағдай үшін, азот тотықтарының түзілу механизмдері қарастырылған. Қалақша профильдерін санаудың теориялық бастамалары келтірілген.

Мақалада, қалақша профильдерінің тұрақтандыру көрсеткіштерінің жоғары дәрежелігі бар екені, сонымен қоса салыстырмалы түрдегі азот тотықтарының концентрациясы төмен екені де көрсетілген.

**Кілт сөз.** Жану камерасы, қалақша профильдері, азот тотықтары, отын артықтылығы, ауа.

**МРНТИ 87.17.81**

**В.В.Стояк, В.А.Завадский, С.К.Кумызбаева**

Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, Казахстан

## **ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЁННОЙ ГЕНЕРАЦИЕЙ: ВИРТУАЛЬНЫЕ ТЕПЛОЭЛЕКТРОЦЕНТРАЛИ - ЭНЕРГОСИСТЕМЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ**

**Аннотация.** Развитие экономики в условиях неравномерного распределения энергоресурсов ставит порой противоречивые требования к развитию энергосистемы и локализации генерирующих источников электроэнергии. Современные требования к наращиванию мощностей возобновляемых источников энергии (ВИЭ) также меняют парадигму развития энергосистем. Одним из наиболее перспективных направлений является решение по комбинированному производству тепловой и электрической энергии вблизи источника потребления в сочетании с интеллектуальным управлением генерацией и потреблением. Данное решение требует совершенно новых подходов к управлению энергосистемой. Виртуальная теплоэлектростанция (VHPP) – это совершенно новая концепция, которая является логическим развитием идеи создания виртуальных электростанций (VPP) и предполагает создание систем интеллектуального управления распределенной генерацией разнородными, географически распределенными энергетическими активами тепловой и электрической энергии, включая генерацию на основе ВИЭ.

**Ключевые слова:** виртуальная теплоэлектростанция (VHPP), виртуальная электростанция (VPP), интеллектуальное управление генерацией, распределенная генерация, возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

С ростом спроса на электроэнергию и все более острыми проблемами нехватки энергии в отдалённых районах, а также экологическими проблемами становятся все более заметными недостатки традиционного производства электроэнергии [1]. В результате страны во всем мире ввели политику, стимулирующую компании оптимизировать свою энергетическую структуру, содействовать энергосбережению и сокращению выбросов, а также добиваться устойчивого экономического развития. В этой новой ситуации активно развиваются распределенные энергетические ресурсы. Это позволяет более гибко подходить к вопросам защиты окружающей среды, более эффективно осуществлять производство тепловой и электроэнергии и решить вопросы, связанные с гибкостью энергосистемы [2, 3]. Для эффективного управления распределённой генерацией разработана концепция виртуальных электростанций (VPP).

Самая последняя концепция VPP имеет различные определения, все из которых отражают тот факт, что VPP представляет собой совокупность блоков распределённой генерации с различными технологиями для того, чтобы работать как единая электростанция, которая способна контролировать агрегированные блоки и управлять потоком электрической энергии между этими устройствами для улучшения работы системы [3]. Например, имеется и такое определение: VPP определяется как «гибкое представление портфеля распределенных энергоресурсов, которое можно использовать для заключения контрактов на оптовом рынке и для предоставления услуг системному оператору» [4]. Из представленных определений предлагается использовать следующее определение: VPP может быть определен как «совокупность структур распределённой генерации, элементов накопления энергии и управляемых нагрузок, сопровождаемых информационными и коммуникационными технологиями, с целью формирования единой виртуальной электростанции, которая планирует, контролирует и координирует потоки энергии между ее компонентами для минимизирования затрат на производство энергии, выбросов парниковых газов, максимизирование прибыли и обеспечение потребителей

энергией в необходимом количестве»[3].

В АУЭС предложена концепция виртуальных теплоэлектростанций (VNPP). Виртуальная теплоэлектроцентраль (VNPP) - это совершенно новая концепция, которая является логическим развитием идеи создания виртуальных электростанций.

VNPP предполагает интеллектуальное управление распределенными системами комплексной (комбинированной) генерацией тепловой и электрической энергии.

Данная концепция базируется на распределенных генераторах, которые подключены, контролируются и визуализируются как единое целое через виртуальную структуру с использованием современных информационных и телекоммуникационных технологий. Данные генерирующие объекты могут включать в себя любые источники тепловой и электрической энергии, которые могут быть агрегированы и взаимодействовать друг с другом как на местном уровне, так и на уровне энергосистемы в целом. Генерирующие объекты VNPP могут включать в себя установки комбинированного производства тепловой и электрической энергии с вовлечением одного или более возобновляемых источников.

Несмотря на то, что реализация принципа VNPP позволяет использовать практически любые энергоисточники в энергосистеме с максимальной эффективностью, однако, род энергоисточника всё же имеет значение и может ограничивать использование в полной мере возможностей концепции VNPP. Поэтому в АУЭС разработана современная высокотехнологичная альтернатива существующим энергоисточникам для распределённой генерации, позволяющая существенно снизить удельные затраты первичного топлива на производство тепловой энергии в 3-5 раз, за счет вовлечения неисчерпаемых низкопотенциальных источников тепла (НИТ) и обеспечивающая надежное и качественное комплексное энергоснабжение различных объектов [5-8]. Это геотермальные полигенерационные установки (ГТПУ), включающие тепловой двигатель, электрический генератор, компрессионный и/или абсорбционный тепловой насос, геотермальный коллектор и/или другой источник низкопотенциального тепла, микросети тепло-холодо-, электроснабжения, геотермальные полигенерационные установки (ГТПУ), включающие тепловой двигатель, электрический генератор, компрессионный и/или абсорбционный тепловой насос, геотермальный коллектор и/или другой источник низкопотенциального тепла, микросети тепло-холодо- и электроснабжения, необслуживаемая система автоматического управления (Рисунок 1).

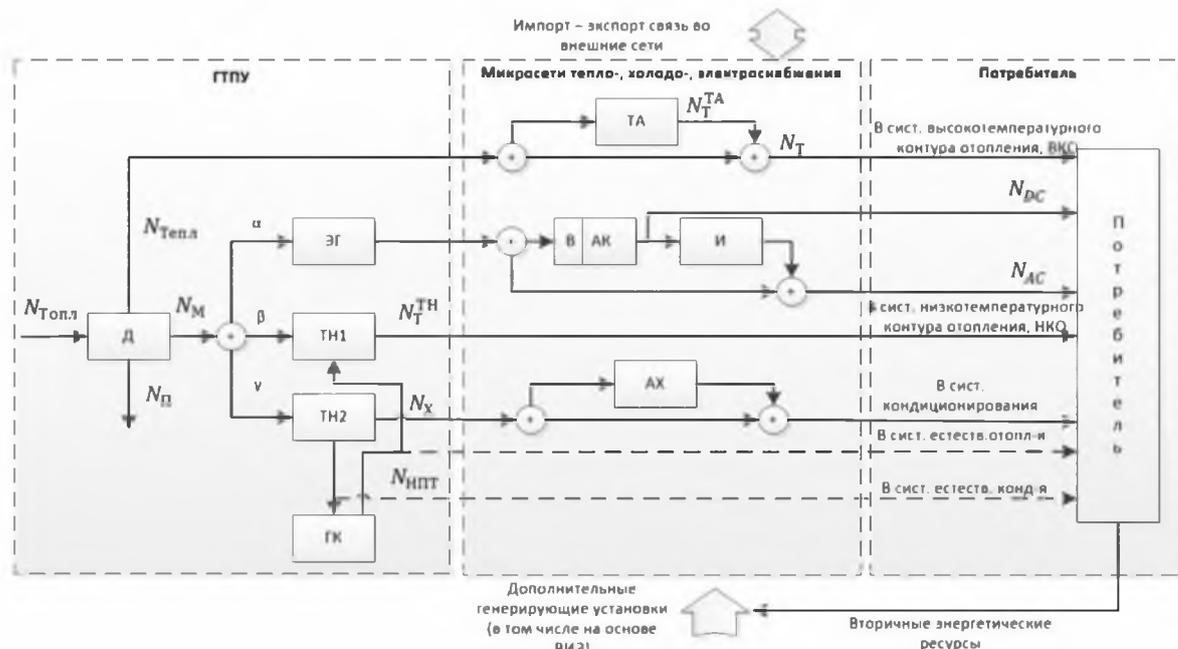


Рисунок 1 – Обобщённая техническая структура ГТПУ в составе VNPP

При этом, в предлагаемом оборудовании реализованы следующие основные требования:

- исключается прямое сжигание ископаемого топлива (жидкого или газообразного) для нужд теплоснабжения;
- обеспечивается высокая энергетическая эффективность систем энергоснабжения в течение всего года, т.е. в широком диапазоне изменения соотношений потребности в различных видах энергии – электричества, тепла и холода, обусловленных климатическими условиями;
- обеспечивается вовлечение доступного возобновляемого источника энергии, не подверженного существенному влиянию климатических и погодных условий.

Данные требования определяются исходя из существующего состояния энергосистемы в Республике Казахстан:

- Низкая энергетическая эффективность систем топливной генерации;
- Высокая степень морального устаревания и физического износа энергетического оборудования ТЭС, как следствие, КПД производства электроэнергии на ТЭС обычно не превышает 20-30%;
- Недопустимо высокие транспортные энергопотери и малозагруженные протяженные линии электропередачи распределенных сетей;
- Неудовлетворительное качество и надежность централизованного электроснабжения отдаленных населенных пунктов и производств, обусловленное физическим износом сетевого оборудования и сложными климатическими условиями;
- Наличие большого числа объектов сельского хозяйства, ферм, малых населенных пунктов, жители которых практически лишены доступа к современным энергетическим услугам;
- Недостаточная гибкость энергосистем, ограничивающая проникновение ВИЭ (ФЭС, ВЭС) со свойственной им неоднородностью и непредсказуемостью генерации.
- Высокая роль теплоснабжения в системах энергообеспечения, обусловленная климатическими условиями Казахстана;
- Снижение доли генерации тепловой энергии в комбинированном цикле с электрогенерацией, продолжение и расширение «котельнизации» систем теплоснабжения;
- Основной объем тепла для отопления (более 80%) производится путем прямого сжигания горючих полезных ископаемых;
- Неудовлетворительное состояние и недопустимо высокие потери энергии в системах централизованного теплоснабжения;
- Генерация холода для систем кондиционирования, холодильных и морозильных камер осуществляется (практически безальтернативно) в установках с электрическим приводом.

Использование концепции VHPP позволяет эксплуатировать геотермальные полигенерационные установки в различных регионах Казахстана. За счёт реализации принципа полигенерации при производстве электроэнергии, тепла, холода (кондиционировании) возможна значительная экономия топлива [6]. Общая энергетическая эффективность использования энергии топлива при производстве тепла с использованием ГТПУ с прямым приводом может достигать до 250-300% [7,8].

Включение ГТПУ в состав VHPP предполагает наличие импорт – экспорт связи локальных электрических микросетей с централизованной системой электроснабжения. Импорт-экспорт тепловой энергии, как правило, ограничивается работой на тепловую микросеть. Наличие таких связей и свободных мощностей по сути превращает потребителя электро- и тепловой энергии в их производителя и полноценного участника рынка (Рисунок 2) [9].

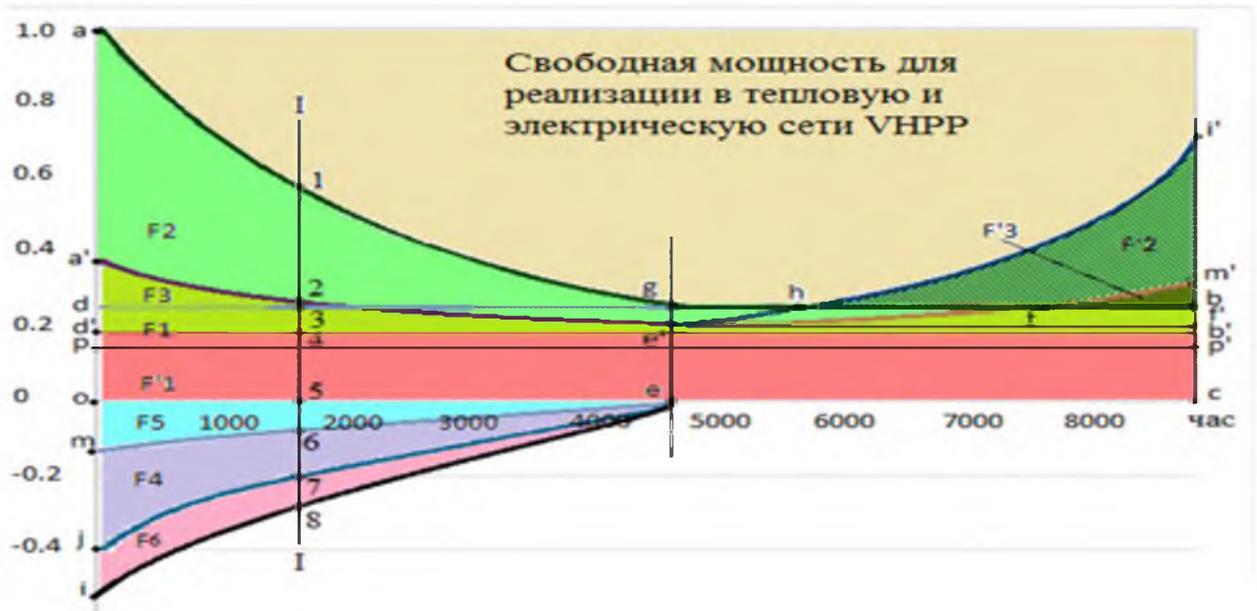


Рисунок 2 – График относительных мощностей и энергий в ГТПУ в составе ВНРР

В создаваемой системе реализуются следующие преимущества:

- Как правило, отсутствует необходимость в аккумуляторных батареях и владении резервным оборудованием для тепловой и электроэнергетики;
- Возможность повысить КИУМ установок и, соответственно, сократить сроки окупаемости оборудования;
- Возможность продавать в сеть излишки тепловой и электроэнергетики;
- При отсутствии ограничений по экспорту электроэнергии в сеть возможно исключить моногенерацию тепловой энергии прямым сжиганием топлива;
- Возможность проникновения в электрические сети неуправляемых источников энергии (например – ВИЭ) без нарушения режимов работы и устойчивости сети.

Однако, на сегодняшний день существуют некоторые ограничения по широкому применению данных систем, наиболее значительное из которых - это отсутствие соответствующей законодательной базы, регулирующей отношения владельцев распределенных систем комплексного энергоснабжения и сетевых операторов.

Предлагаемая концепция обладает широкими возможностями применения как в локальных энергосистемах, так и в масштабе региональном. Автономные индивидуальные системы комплексного энергоснабжения сверхмалой и малой мощности (АИСКЭ) (электричество, тепло, холод) встраиваются в строительные конструкции и инженерные сети отдельно стоящего жилого многоквартирного или многоквартирного жилого дома, отдельного здания или сооружения коммунального или другого назначения.

АИСКЭ предполагает либо полное отсутствие внешних электрических и тепловых коммуникаций, либо имеет подключение электрической микросети к системе централизованного электроснабжения (импорт-связь).

Автономные локальные (островные) системы комплексного энергоснабжения (АЛСКЭ) и Автономные распределенные системы комплексного энергоснабжения (АРСКЭ) на базе ГТПУ в составе ВНРР обеспечивают энергоснабжение компактного комплекса однотипных или разнородных потребителей, объединенных общими электрическими и тепловыми распределительными микросетями.

Например:

- небольшой комплекс жилых и общественных зданий;

- фермерское хозяйство, включающее жилые здания, производственные помещения, теплицы, холодильники, морозильники и т.п.
- промышленное предприятие МСБ, размещенное в нескольких зданиях и сооружениях.

При реализации АРСКЭ предусматривается применение дополнительных электросиловых устройств обеспечивающих импорт-экспорт связь с централизованной электрической сетью и оборудование для импорт – экспорт связи с тепловой сетью и централизация управления посредством системы SCADA DEMS. Предполагается возможность применения дополнительных тепло- и электрогенерирующих установок на основе вторичных и возобновляемых источников энергии.

Таким образом, ГТПУ позволят обеспечить качественное энергоснабжение удаленных объектов (ЖКХ, фермерские хозяйства, технические объекты, промышленные предприятия), многократно снизить выбросы парниковых газов, обладают возможностью интеграции с дополнительными генерирующими мощностями на основе возобновляемых источников энергии (ветроэлектрические и фотоэлектрические станции, микрогэс т.п.), с любой степенью замещения. Также они обеспечивают независимость энергоснабжения от погодных и климатических условий при использовании низкопотенциального тепла верхних слоев земли, возможность адаптации ГТПУ к широкому спектру первичных топлив - природный газ, сжиженный газ, дизельное и биодизельное топливо, биогаз и др.

Использование принципа виртуальных теплоэлектростанций (VHPP) позволит не только максимально эффективно использовать энергетические ресурсы и организовать управление энергосистемой, но и позволит субъектам промышленности, бизнеса, ЖКХ быть как потребителями, так и производителями тепловой и электрической энергии.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- [1] Петерсен М.К., Hansen, L.H.; Bendtsen, J., Эдлунд, К., Стоуструп Дж. Интеграция на рынке виртуальных электростанций; IEEE: Нью-Йорк, Нью-Йорк, США, 2013; с. 2319–2325.
- [2] Dabbagh, S.R. ; Шейх-эль-Эслами, М.К. Распределение прибыли с учетом рисков на глобальную электростанцию с использованием совместной теории игр. *Электр. Power Syst. Местожителство* 2015, 121, с. 368–378.
- [3] Эхсан А., Ян, Q. Обзор аналитических методов. *Appl. Энергия* 2018, 210, 44–59.
- [4] Махмуд М. Отман, Ю. Г. Хегазы, Альмоатаз Ю. Абдельазиз, Обзор определений, компонентов, структуры и оптимизации виртуальных электростанций, *IEAJ Vol. 6 (2015) № 9*, стр. 2010-2024 ISSN 2078-2365
- [5] D. Pudjianto, C. Ramsay и G. Strbac, *ИЕТ возобновляемая энергетика*, 1 (2007) 10-16
- [6] Стояк В.В., Кумызбаева С.К., Апсеметов А.А., Ибрагимова М.В. Комбинированное энергоснабжение децентрализованных потребителей энергии в условиях экстремального континентального климата // *Энергетические процедуры*. - 2016. - С.159-166.
- [7] Кумызбаева С.К., Ибрагимова М.В., Стояк В.В., Апсеметов А.А. Гибридная автономная система энергоснабжения в условиях экстремального континентального климата в Центральной Азии // *Международная конференция 2016 года по когенерации, малым электростанциям и районной энергетике (ICUE 2016, Бангкок)*. - 2016 г. - С.11.
- [8] Стояк В.В., Кумызбаева С.К., Ибрагимова М.В., Апсеметов А.А. Энергоэффективность комбинированных автономных систем энергоснабжения на основе наземных полигенерационных установок в условиях экстремального континентального климата Казахстана // *Инженерно-прикладные науки*. - №1 (13). - 2018. Р.119-129.

[9] Стояк В.В., Кумызбаева С.К., Ибрагимова М.В., Джеймс П.А.Б. Структурная оптимизация сложных систем энергоснабжения на основе геотермальной полигенерационной установки // Вестник АУЭС. - №2 (37) .- 2017. С.18-26.

#### REFERENCES

- [1] Petersen, M.K.; Hansen, L.H.; Bendtsen, J.; Edlund, K.; Stoustrup, J. Market Integration of Virtual Power Plants;IEEE: New York, NY, USA, 2013; pp. 2319–2325.
- [2] Dabbagh, S.R.; Sheikh-El-Eslami, M.K. Risk-based profit allocation to DERs integrated with a virtual powerplant using cooperative Game theory. *Electr. Power Syst. Res.* **2015**, 121, 368–378.
- [3] Ehsan, A.; Yang, Q. Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques. *Appl. Energy* **2018**, 210, 44–59.
- [4] Mahmoud M. Othman, Y. G. Hegazy, Almoataz Y. Abdelaziz, A Review of Virtual power plant Definitions, Components, Framework and Optimization, *International Electrical Engineering Journal (IEEJ)* Vol. 6 (2015) No.9, pp. 2010-2024 ISSN 2078-2365
- [5] D. Pudjianto, C. Ramsay and G. Strbac, Virtual power plant and system integration of distributed energy resources IET renewable power generation , 1 (2007) 10-16
- [6] Stoyak V.V., Kумызбайева S.K., Apsemetov A.A., Iбрагимова M.V., Combined power supply of decentralized energy consumers in conditions of extreme continental climate// *Energy Procedia.*- 2016. – P.159-166.
- [7] Kумызбайева S.K., Iбрагимова M.V., Stoyak V.V., Apsemetov A.A., Hybrid stand-alone power supply system in conditions of extreme continental climate in Cental Asia // *The 2016 International Conference on Cogeneration, Small Power Plants and District Energy (ICUE 2016, Bangkok).* – 2016 – P.11.
- [8] Stoyak V.V., Kумызбайева S.K., Iбрагимова M.V., Apsemetov A.A., Energy efficiency of combined autonomous energy supply systems based on ground source polygeneration plants in the conditions of the extreme continental climate of Kazakhstan//*Journal of Engineering and Applied Sciences.* - №1 (13). – 2018. P.119-129.
- [9] Stoyak V.V., Kумызбайева S.K., Iбрагимова M.V., James P.A.B., Structural optimization of complex systems energy supply on the basis of geothermal polygeneration installation// *Vestnik AUES.* - №2(37).- 2017. P.18-26.

#### INTELLECTUAL MANAGEMENT OF DISTRIBUTED GENERATION: VIRTUAL HEAT POWER PLANTS - ENERGY SYSTEMS OF A NEW GENERATION

**Stoyak V.V., Zavadsky V.A., Kумызбайева S.K.**

Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan

**Annotation.** The development of the economy in the conditions of uneven distribution of energy resources sometimes puts conflicting requirements for the development of the energy system and localization of generating sources of electricity. Modern requirements for increasing the capacity of renewable energy sources (RES) also change the paradigm of development of power systems. One of the most promising areas is the decision on the combined production of heat and electricity near the source of consumption, combined with intelligent generation and consumption management. This solution requires a completely new approach to power management. Virtual Heat Power Plant (VHPP) is a completely new concept, which is a logical development of the idea of creating virtual power plants (VPP) and involves the creation of

intelligent control systems for distributed generation of heterogeneous, geographically distributed energy assets of thermal and electrical energy, including generation based on renewable energy.

**Keywords:** virtual heat power plant (VHPP), virtual power plant (VPP), intelligent generation control, distributed generation, renewable energy sources (RES).

**ТАРАТЫЛҒАН ГЕНЕРАЦИЯНЫ ИНТЕЛЛЕКТУАЛДЫ БАСҚАРУ: ВИРТУАЛДЫ ЖЫЛУ  
ЭЛЕКТР ОРТАЛЫҚТАРЫ - ЖАҢА БУЫН ЭНЕРГИЯ ЖҮЙЕЛЕРІ  
Стояк В.В., Завадский В.А., Кумызбаева С.К.**

Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан

**Андатпа.** Энергия ресурстарын біркелкі бөлу жағдайында экономиканың дамуы энергия жүйесін дамытуға және электр энергиясының генерациялайтын көздерін окшаулауға қарама-қайшы талаптар қояды. Жаңартылатын энергия көздерінің (ЖЭК) қуатын арттыруға қойылатын қазіргі заманғы талаптар энергия жүйелерінің даму парадигмасын өзгертеді. Ең перспективалы бағыттардың бірі генерация мен тұтынуды интеллектуалды басқарумен ұштастыра отырып, тұтыну көзіне жақын жылу және электр энергиясын құрамдастырылған өндіру бойынша шешім болып табылады. Бұл шешім энергожүйені басқарудың мүлдем жаңа тәсілдерін талап етеді. Виртуалды жылу электр станциясы (VHPP) - бұл виртуалды электр станцияларын (VPP) құру идеясының қисынды дамуы болып табылатын мүлдем жаңа тұжырымдама және ЖЭК негізінде генерацияны қоса алғанда, жылу және электр энергиясының әр текті, географиялық бөлінген энергетикалық активтермен таратылған генерацияны интеллектуалды басқару жүйесін құруды болжайды.

**Кілт сөздер:** виртуалды жылу электр станциясы (VHPP), виртуалды электр станциясы (VPP), генерацияны интеллектуалды басқару, бөлінген генерация, жаңартылатын энергия көздері (ЖЭК).

**МРНТИ 68.85.39**

**И.Т.Алдибеков<sup>1</sup>, Р.Т.Мукашева<sup>1</sup>, Т.Д.Иманбекова<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Алматинский университет энергетики и связи, г.Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Международный университет информационных технологий, г.Алматы, Казахстан

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЭЛЕКТРОДНОГО ПАРОВОДОНАГРЕВАТЕЛЯ**

**Аннотация.** В статье дано обоснование актуальности снижения энергоемкости животноводческой продукции и необходимости вовлечения солнечной энергии в энергобаланс молочных ферм. Приведен ряд предпосылок и условий, определяющих целесообразность использования электрических пароводонагревателей, предназначенных для раздельного получения пара низкого давления и горячей воды в одной установке. Проведен анализ их конструкций и режимов работы. Приведена конструктивно-технологическая схема многофункциональной тепловой установки, которая предусматривает комбинированное использование солнечной и электрической энергии и состоит из солнечного водонагревателя и электродного пароводонагревателя с усовершенствованной конструкцией. Приведены описание конструкции и режимы работы пароводонагревателя, где в качестве теплообменников используются антиэлектроды. Показана возможность нагрева воды как для системы горячего водоснабжения, так и для системы отопления, а также получения пара для технологических нужд.

**Ключевые слова:** молочные фермы, горячее водоснабжение, пароснабжение, солнечные водонагреватели, электродные пароводонагреватели.

В соответствии со стратегией развития энергетики в сельском хозяйстве снижение энергоемкости производства сельскохозяйственной продукции является актуальной задачей [1].

В настоящее время основными производителями молока в аграрном секторе республики стали личные подворья сельского населения и фермерские (крестьянские) хозяйства с поголовьем коров 50...200 голов, а также немногочисленные средние и крупные специализированные хозяйства.

В настоящее время интенсификация животноводческой отрасли требует решения комплекса сложных задач, к числу которых относятся вопросы разработки энергоэффективных систем теплообеспечения фермерских хозяйств молочного направления.

При существующих технологиях и системах машин в молочном скотоводстве на получение центнера молока затрачивается 32...35 кВт·ч электрической энергии и 8...10 кг топлива, что выше в 2,5...3,5 раза, чем в молочных хозяйствах США и других ведущих зарубежных странах [2].

Казахстан относится к государствам с благоприятными условиями для развития солнечной энергетики. В южных областях республики годовая длительность солнечного света составляет 2200—3000 часов в год, а средняя за год пиковая мощность доходит до 1200 Вт/м<sup>2</sup> [3]. В настоящее время во многих странах вовлечение солнечной энергии в энергобаланс молочных ферм рассматривается как один из путей снижения энергоемкости животноводческой продукции. В то же время в известных системах теплообеспечения молочных ферм республики не уделяется должного внимания к использованию солнечных водонагревателей.

Одной из причин сравнительно низкой эффективности систем теплообеспечения молочных ферм является отсутствие комплексного подхода при выборе оптимального состава теплогенерирующего оборудования, способствующего снижению как и капитальных затрат, так и энергетических затрат.

Поэтому научные работы, направленные на разработку и совершенствование ресурсо- и энергосберегающих систем теплообеспечения в молочном животноводстве на базе инновационных технических средств с использованием возобновляемых источников энергии, являются актуальными.

Молочные блоки ферм отличаются высокой концентрацией тепловых процессов. В них приготовление горячей воды, получение пара и отопление помещений осуществляются, как правило, децентрализованными системами, предусматривающими использование нескольких автономно работающих электротепловых установок разных типов (водонагреватель емкостного типа, парогенератор, проточный водонагреватель). Коэффициенты загрузки и коэффициенты использования этих установок в условиях молочных блоков сравнительно низки (0,2...0,5), что снижает эффективность использования капитальных затрат на теплоснабжение, особенно при небольшом объеме производимого молока в фермерском хозяйстве [4,5].

Известно, что график потребления пара и горячей воды на животноводческих фермах и комплексах имеет выраженный неравномерный характер. Именно специфический характер потребления теплоносителей и необходимость повышения эффективности работы теплогенерирующих установок в условиях сельскохозяйственного производства послужили основанием для разработки комбинированных электротепловых установок (пароводонагревателей), предназначенных для получения пара низкого давления и горячей воды в одном устройстве.

Существует ряд предпосылок и условий, определяющих целесообразность использования пароводонагревателей на молочных фермах.

Суточные режимы работы пароводонагревателей должны быть настроены на обеспечение технологических процессов горячей водой и паром в соответствии с суточным графиком их потребления, а также создание требуемого температурного режима в молочном блоке в зимний период.

В молочном блоке горячая вода в основном расходуется во время утренней и вечерней доек коров, а пар используется утром или вечером, после мытья молочного оборудования. При этом для генерации пара пароводонагреватель работает по свободному графику согласно режиму потребления, а для приготовления горячей воды используются периоды технологических пауз потребления пара.

Анализ конструкций и режимов работы известных пароводонагревателей показывает, что в одних установках их теплогенерирующие устройства могут работать поочередно как парогенератор, так и как водонагреватель [4]. При этом переход теплогенерирующего устройства с одного режима на другой обеспечивается отключением от него одного контура с соответствующими техническими средствами, например, для нагрева воды, и подключением другого контура с необходимыми средствами для получения пара. Такая переналадка гидравлической схемы установки и выход установки на новый номинальный режим работы требуют определенных затрат времени и квалифицированного труда.

В других пароводонагревателях их теплогенерирующие устройства (электродные парогенераторы) работают только в режиме генерации пара. При этом горячую воду получают либо смешиванием поступающего от парогенератора пара и холодной воды в специально предусмотренном нагревателе струйного типа, либо нагревают воду в специальном бойлере путем подачи пара в его пароводяной теплообменник [4].

В связи с этим определенный научный и практический интерес представляет разработанная в КазНИИМЭСХ гелиоэлектрическая многофункциональная тепловая установка (ГЭТУ) с микропроцессорной системой управления, в которой предусмотрены комбинированное использование электрической и солнечной энергии, централизация

выработки теплоты в пределах молочного блока и выполнение установкой нескольких тепловых процессов [6].

В состав ГЭТУ входят электродный пароводонагреватель со встроенными теплообменниками, солнечный водонагреватель, состоящий из группы гелиоколлекторов и бойлера для горячей воды с пароводяным теплообменником, радиаторы отопления, циркуляционные насосы, микропроцессорная система для управления режимами работы установки. ГЭТУ может работать в следующих режимах: режим пароснабжения, летний режим и зимний режим.

Достоинствами данной установки являются:

- многофункциональность, т.е. возможность ее использования для получения горячей воды и пара, а также отопления помещений;
- возможность круглогодичного использования солнечной энергии для нагрева воды, что позволяет значительно снизить расход электроэнергии;
- высокая степень автоматизации с применением микропроцессорной системы управления;

Однако, на наш взгляд, электродный пароводонагреватель данной установки имеет недостатки, обусловленные наличием двух спиралевидных встроенных теплообменников, расположенных над электродами, и других вспомогательных элементов, а также подводом электроэнергии к электродам со стороны днища корпуса, что усложняет и удорожает конструкцию, увеличивает ее габаритные размеры, создает определенное неудобство при обслуживании.

В связи с этим определенным интерес представляют работы, направленные на совершенствование конструкции электродного пароводонагревателя.

На рисунке 1 показана теплотехническая схема ГЭТУ, в состав которой входит пароводонагреватель с усовершенствованной конструкцией. Пароводонагреватель состоит из цилиндрического корпуса 1 с патрубками 2, 4 для подвода и отвода воды соответственно, и съемной крышки 5 с патрубком 3. Внутренняя полость корпуса 1 имеет водогрейное и небольшое паровое пространство 6,7 соответственно. В водогрейном пространстве 6 установлены по окружности три электродные группы. Каждая группа состоит из соосно и с зазором размещенных цилиндрического фазного электрода 8 с токовводом 9, пропущенным сквозь проходной изолятор 10, и антиэлектрод (нулевой электрод) 11. Каждый антиэлектрод 12 выполнен из двух цилиндров разного диаметра с образованием кольцевой герметичной камеры 12. Эквивалентной электрической схемой соединения взаимодействующих электродов является «звезда».

Водоподводящие и водоотводящие трубки двух кольцевых камер 12 соединены с коллекторами 14, 15 холодной и горячей воды соответственно, связанными с обратным и подводящим трубопроводами 16,17 системы горячего водоснабжения. Трубопровод 16, в свою очередь, соединен с нижней частью бойлера 36 через вентиль 37 и циркуляционный насос 38, а трубопровод 17 – с верхней частью через шаровой вентиль 39 и электромагнитный вентиль 40. Образовавшийся при этом замкнутый нагревательный контур, включающий две кольцевые камеры 12, используется для нагрева воды в бойлере 36. Насос 38 применяется для циркуляции воды по данному контуру.

Водоподводящая и водоотводящая трубки третьей кольцевой камеры 12 соединены с радиаторами отопления 41 через подводящий и обратный трубопроводы 42 и 43. Трубопровод 42 оборудован шаровым вентиляем 45 и расширительным бачком 46, а трубопровод 43 – циркуляционным насосом 48, электромагнитным вентиляем 44 и шаровым вентиляем 47. При этом образуется второй нагревательный контур, включающий третью кольцевую камеру и используемый для нагрева воды в системе отопления.

В пароводонагревателе предусмотрены датчики 18, 19 для контроля нижнего и верхнего уровней котловой воды и пароперегреватель 24, соединенный с патрубком 3 и

паропроводом 25. На паропроводе 25 установлены измерительные датчики 26, 27 давления и температуры соответственно, показывающий манометр 28, предохранительный клапан 29, воздухоотводчик 30, электромагнитный и шаровой вентили 31, 32. Патрубок 4 соединен с электромагнитным вентилем 33 и краном 34, используемым для слива котловой воды.

Пароводонагреватель имеет компенсационный бачок 20, соединенный с его нижней частью через трубу 49 и шаровые вентили 22, 23, и предназначенный для приема вытесняемой котловой воды.

Для заполнения системы отопления водой используется шаровой вентиль 52, а для подпитки пароводонагревателя в режиме пароснабжения – шаровой и электромагнитный вентили 51, 35 и трубопровод 53.

В качестве преобразователя солнечной энергии в тепло выбран всесезонный солнечный коллектор 55, который состоит из определенного количества вакуумированных колб с тепловой трубкой. Он подключен к теплообменнику 56 бойлера 36 через подводящий и обратный трубопроводы 57, 58, и образует вместе с обратным клапаном 59, циркуляционным насосом 60 и вентилем 61 солнечный нагревательный контур, работающий в круглогодичном режиме.

Датчик 67 служит для контроля температуры воды на выходе из солнечного коллектора 55, а датчики 68 и 69 – температуры воды в бойлере. Заполнение бойлера 36 холодной технологической водой и отбор горячей воды осуществляется через трубопровод 53 и вентили 72, 71.

Данный пароводонагреватель может работать в следующих режимах: зимний режим, летний режим и режим пароснабжения.

При зимнем режиме обеспечивается одновременное теплоснабжение систем горячего водоснабжения и отопления. Для этого водогрейное пространство корпуса заполняется водой до уровня верхних торцов фазных электродов путем открытия электромагнитного вентиля 35, что контролируется датчиком верхнего уровня 19. При подаче напряжения на фазные электроды происходит нагрев котловой воды до кипения, находящейся в межэлектродных пространствах 13, протекающим через нее током.

Для отопления помещения открывают электромагнитный вентиль 44 и включают насос 48, а электромагнитный вентиль 31 должен быть в закрытом состоянии. Для нагрева технологической воды в бойлере 36 открывают электромагнитный вентиль 40 и включают насос 38.

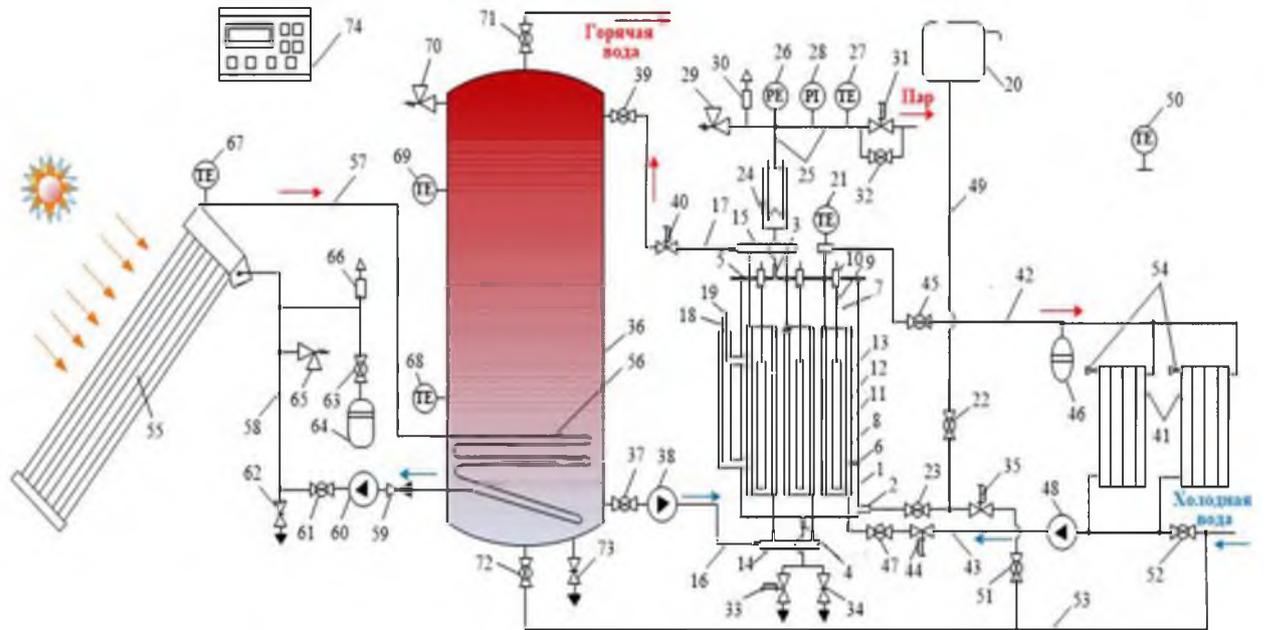
Нагреваемая вода, идущая от радиаторов 41 отопления по обратному трубопроводу 43 второго нагревательного контура, поступает в третью кольцевую камеру 12. Она, проходя внутри камеры, нагревается за счет теплоты, передаваемой ей от нагретой электродным способом котловой воды через внутреннюю цилиндрическую стенку камеры 12, и в дальнейшем поступает в подводящий трубопровод 42 системы отопления.

Одновременно холодная вода, используемая в системе горячего водоснабжения, проходя по обратному трубопроводу 16 первого нагревательного контура, поступает в кольцевые камеры 12 двух антиэлектродов 12 через коллектор 14 холодной воды. Она, проходя внутри камер 1, нагревается за счет теплоты, выделяемой в двух других межэлектродных пространствах и передаваемой ей через внутренние цилиндрические стенки двух камер 12. Дальше она поступает в коллектор 15, соединенный с подводящим трубопроводом 17.

Таким образом, греющей водой в обоих случаях является котловая вода, нагретая электродным способом в межэлектродных пространствах и передающей свою теплоту через цилиндрические стенки нагреваемым теплоносителям, движущихся в соответствующих камерах.

Благодаря выполнению антиэлектродов 12 из двух цилиндров разного диаметра с образованием герметичных кольцевых камер 13, обеспечивается осуществления ими двух функций:

- во-первых, они участвуют в электродном нагреве котловой воды, находящейся в межэлектродных пространствах;



1 – корпус пароводонагревателя; 2,3,4 – патрубки для подвода воды, отвода пара и слива воды соответственно; 5 – крышка; 6 – водогрейное пространство; 7 – паровое пространство; 8 – фазный электрод; 9 – токоввод; 10 – проходной изолятор; 11 – антиэлектрод (нулевой электрод); 12 – кольцевая камера; 13 – межэлектродное пространство; 14,15 – коллекторы холодной и горячей воды соответственно; 16,43,59 – обратные трубопроводы; 17,42,57 – подводящие трубопроводы; 18,19 – датчики контроля уровня котловой воды; 20 – компенсационный бачок; 21,27,50,67,68,69 – датчики температуры; 22, 23, 32, 37, 39, 45, 47, 51, 52, 61, 63, 71, 72, – шаровые вентили; 24 – пароперегреватель; 25 – паропровод; 26 – датчик давления; 28 – манометр; 29, 65, 70 – предохранительные клапаны; 30,66 – воздухоотводчики; 31,35,40,44 – электромагнитные вентили; 34, 62, 73 – краны для слива; 36 – бойлер; 38, 48, 60 – циркуляционные насосы; 41 – радиаторы отопления; 46,64 – расширительный бачок; 49 – труба для вытесняемой воды; 54 – краны Маевского; 55 – гелиоколлектор; 56 – теплообменник бойлера; 59 – обратный клапан; 74 – щит управления

Рисунок 1 – Теплотехническая схема многофункциональной тепловой установки с усовершенствованным пароводонагревателем

- во-вторых, они используются как теплообменники для нагрева воды, используемой в системах отопления и горячего водоснабжения.

В дневное время нагрев технологической воды, используемой в вечернее время, осуществляется солнечным коллектором при включенном насосе 60 через теплообменник 56 бойлера 36. При необходимости ее температуру доводят до требуемого значения ближе к концу дня, прогоняя ее по первому нагревательному контуру.

В ночное время для нагрева воды, используемой в утреннее время, обеспечивают ее непрерывную циркуляцию по первому контуру. При этом она нагревается только за счет электроэнергии, потребляемой электродным пароводонагревателем.

Температура воды в бойлере контролируются датчиками 68, 69, и при достижении заданного значения система управления останавливает работу насоса 38 и закрывает электромагнитный вентиль 40.

Горячая вода в бойлере подается к потребителям путем открытия вентилей 71, 72.

Датчики 21 и 50 предназначены для контроля температуры горячей воды на входе системы отопления и температуры воздуха в помещении соответственно. При достижении температурой воздуха заданного значения или в случае закипания воды в системе они дают сигнал системе управления, которая отключает насос 48 и закрывает электромагнитный вентиль 44.

В процессе работы пароводонагревателя температура нагреваемой воды, проходящей через кольцевые камеры, повышается. Это приводит к уменьшению значения температурного напора (т.е. разности температур котловой воды и нагреваемой воды). В результате возникает дисбаланс между мощностью, выделяемой в межэлектродном пространстве, и мощностью, передаваемой через теплообменную поверхность камер к нагреваемой жидкости. Это, в свою очередь, приводит к кипению котловой воды и парообразованию. В результате давление над котловой водой начинает превышать атмосферное давление. Появившееся избыточное давление начинает вытеснять некоторую часть котловой воды через трубу 49 в компенсационный бачок 20 до тех пор, пока не наступит равновесие в давлении. При этом объем парового пространства увеличивается, а уровень котловой воды в межэлектродном пространстве понижается.

Так как при электродном нагреве величина электрической мощности прямо пропорциональна активной высоте электродной системы (высоте уровня котловой воды в межэлектродном пространстве), то понижение уровня котловой воды приводит к снижению мощности нагревателя до величины, соответствующей значению передаваемой жидкостям тепловой мощности в данный момент времени.

Поскольку температурный напор с течением времени постоянно уменьшается, и ближе к концу нагрева он становится минимальным, то и уровень котловой воды, а следовательно, потребляемая электрическая мощность, тоже будет минимальной.

Таким образом, в предложенном пароводонагревателе имеет место гидравлический способ автоматического регулирования электрической мощности. Регулирование происходит в соответствии с динамикой изменения тепловой мощности, потребляемой системами горячего водоснабжения и отопления в течение процесса нагрева.

В летнем режиме контур отопления не задействован, а нагрев воды в бойлере до заданной температуры осуществляется солнечным коллектором, и при необходимости доводится до требуемой температуры при помощи второго нагревательного контура пароводонагревателя.

В режиме пароснабжения электромагнитные вентили 40, 44 закрыты, насосы 38, 48 отключены. Подача подпиточной воды в пароводонагреватель осуществляется через электромагнитный клапан 35.

При подаче напряжения на фазные электроды котловая вода, находящаяся в водогрейной части 7 корпуса 1, по истечении определенного промежутка времени закипает и начинается процесс парообразования. Образовавшийся при этом пар заполняет паровое пространство 7 в корпусе 1. Пар поступает к потребителям при открытом состоянии электромагнитного клапана 31. Температура и давление пара контролируются контрольно-измерительными приборами 26, 27 и 28. При необходимости для повышения температуры пара может быть использован пароперегреватель 24.

В процессе генерации пара происходит периодическое включение и выключение электромагнитного клапана 35 подпитки при снижении уровня воды в результате выпаривания и превышении рабочего тока номинального значения, контролируемого при помощи реле тока.

В процессе выпаривания воды солесодержание котловой воды непрерывно растет. Чтобы при этом мощность оставалась постоянной, поддерживают соответствующий уровень воды при помощи электромагнитного клапана 35, работой которого управляют по сигналу реле тока.

При достижении солесодержания котловой воды максимально допустимого значения, при котором уровень воды достигнет нижней допустимой отметки, по сигналу датчика 18 контроля нижнего уровня система управления останавливают работу установки и дает команду на осуществление продувки. Открывается электромагнитный клапан 33 на время, достаточное для удаления из котла засоленной воды.

Таким образом, в пароводонагревателе с усовершенствованной конструкцией обеспечивается возможность одновременного получения в одной установке горячей воды, как для системы отопления, так и для системы горячего водоснабжения, а также получения пара для технологических нужд, при меньших капитальных затратах и более простом конструктивном исполнении. Это свидетельствует о его более широкой функциональной возможности, повышающей эффективность использования в системе теплоснабжения молочных ферм.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

[1] Программа по развитию агропромышленного комплекса в Республике Казахстан на 2013–2020 годы «АГРОБИЗНЕС–2020»: утв. Постановлением Правительства Республики Казахстан от 18 февраля 2013 года, № 151.

[2] Морозов Н.М. Энергоемкость и эффективность производства продукции животноводства // Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве: Труды 5-й Международной научно-технической конференции (г. Москва, 2006 г.). – М.: 2006.- С. 81-87.

[3] Жамалов А., Умбетов Е.С., Кунелбаев М.М. Системы солнечного теплоснабжения. Монография. – Алматы: Полиграфия Сервис К<sup>0</sup>, 2010. – 180 с.

[4] Кешуов С.А., Алдибеков И.Т., Барков В.И. Ресурсосберегающие системы и установки для электротеплообеспечения в малом молочном животноводстве. Алматы: ТОО «Нур-Диас», 2012.- 320 с.

[5] Расстригин В.Н., Тихомиров Д.А., Минчин Ю.В. Электропароводонагреватель ЭПВ-30 // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – М., 1997.- №10 - С. 17-18.

[6] Кешуов С.А., Алдибеков И.Т., Хасанов А.Р. Обоснование режимов работы пароводонагревателя с двумя встроенными теплообменниками // Исследования, результаты. Алматы: КазНАУ, - №3, 2014.- С. 251...259

#### **REFERENCES**

[1] The Program for development of the agro-industrial complex in the Republic of Kazakhstan for 2013-2020 – "AGROBUSINESS 2020": approved by the Decree #151 of the Government of the Republic of Kazakhstan dated February 18, 2013(in russian).

[2] Morozov N.M. – Energy intensity and efficiency of livestock production // Energy supply and energy saving in agriculture: treatises of the 5th International Scientific and Technical Conference (Moscow, 2006). – М.: 2006. – p. 81-87(in russian).

[3] Jamalov A., Umbetov E.S., Kunelbaev M.M. – Systems of solar heat supply. Monograph. – Almaty: Polygraphy Service Co, 2010 – p. 180(in russian).

[4] Keshuov S.A, Aldibekov I.T, Barkov V.I. – Resource-saving systems and installations for electric heat supply in small dairy cattle production. Almaty: "Nur-Diaz" LLP, 2012 – p. 320(in russian).

[5] Rasstrigin V.N, Tikhomirov D.A, Minchin Yu.V. – Electric steam water heater ESWH-30 // Mechanization and electrification of agriculture. – М., 1997 – №10 – p. 17-18(in russian).

[6] Keshuov S.A, Aldibekov I.T, Khasanov A.R – Justification of the operation modes of the steam water heater with two built-in heat exchangers // Research and results. Almaty: KazNAU, – №3, 2014 – p. 251-259(inrussian).

### **ЭЛЕКТРОДТЫ БУ-СУ ЖЫЛЫТҚЫШЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫН ЖАҚСARTУ**

И.Т.Алдібеков<sup>1</sup>, Р.Т. Мукашева<sup>2</sup>, Т.Д. Иманбекова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан

<sup>1</sup>Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы, Қазақстан

<sup>3</sup>Ақпараттықтехнологиялар халықаралық университеті, Алматы, Қазақстан

**Аннотация.**Мақалада мал өнімдерін өндіруге жұмсалатын энергия шығынын азайтудың өзектілігі мен сүт фермаларының энергетикалық балансына күн энергиясын ендіру қажеттілігі негізделген. Төменгі қысымды бу мен ыстық суды дайындауға арналған электрлік бу-сужылытқыштарын пайдаланудың тиімді екендігін негіздейтін бірқатар алғышарттар мен жағдайлар келтірілген. Олардың құрылымдары мен жұмыс режимдері талданған.

Күн және электр энергиялар пайдалануға негізделген, күндік су жылытқышы мен құрылымы жетілдірілген электродты бу-су жылытқышы бар көп функционалды жылулық кондырғының конструктивтік-технологиялық сұлбасы ұсынылған. Антиэлектродтары жылуалмастырғыш ретінде қолданылған бу-су жылытқышының құрылымы мен жұмыс режимдері сипатталған. Ыстық сумен қамтамасыз ету жүйесі үшін де, бөлмелерді жылыту жүйесі үшін де ыстық су дайындау және технологиялық мұқтаждықтар үшін бу өндіру мүмкіндіктері қарастырылған.

**Түйінді сөздер:** сүт фермалары, ыстық сумен қамтамасыз ету, бумен қамтамасыз ету, күндік су жылытқыштар, электродты бу-су жылытқыштар.

### **IMPROVEMENT OF THE ELECTRODE STEAM-WATER HEATER CONSTRUCTION**

I.T. Aldibekov<sup>1</sup>, R.T. Mukashova<sup>2</sup>, T.D. Imanbekova<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup>International University of Information Technologies, Almaty, Kazakhstan

**Annotation.** The article substantiates the urgency of reducing the energy intensity of livestock products and the need to involve solar energy in the energy balance of dairy farms. A number of prerequisites and conditions that determine the feasibility of using electric steam water heaters for separate production of low pressure steam and hot water in one installation are given. The analysis of their designs and operating modes is carried out. The constructive technological scheme of a multifunctional thermal installation providing for combined use of solar and electric energy and containing a solar water heater and an electrode steamwater heater with an improved design is given. The description of the design and operation modes of the steamwater heater are given, where the anti-electrodes are used as heat exchangers. The possibility of heating water, as well as for a hot water supply system, as well as for a heating system, as well as obtaining steam for technological needs is shown.

**Key words:** dairy farms, hot water supply, steam supply, solar water heaters, electrode steamwater heaters.

**МРНТИ 44.37**

**С.Т.Демесова, Р.А.Омаров, Д.Р.Омар, А.Е.Байболов, Т.К.Султангазиев**  
Казахский национальный аграрный университет, г. Алматы

## **ТЕПЛОНАСОСНАЯ СИСТЕМА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

**Аннотация.** Использование ВИЭ в процессах сельского хозяйства, снижение потребления традиционных энергоносителей, энергосбережение являются актуальной технологической и экономической задачей. Предлагаемая теплонасосная система позволяет использовать солнечную энергию, утилизированное тепло животных, молока, грунта. Система связана и тесно взаимодействует с технологическими процессами, регулируя тепловые процессы микроклимата, охлаждения и хранения продукции, одновременно утилизируя образующееся избыточное тепло процессов. В статье описаны устройство, принцип работы, основные закономерности системы. Проведена оценка функциональных характеристик при работе в составе микроклимата коровника, соответствия показателей техническому заданию, качества и стабильности выполнения технологического процесса в установленный период.

**Ключевые слова:** животноводческая ферма, тепло- и хладоснабжение, микроклимат, тепловой насос, солнечная энергия, тепло животных.

### **Введение**

Развитие мировой цивилизации, активизация экономического роста, увеличение энергопотребления и связанное с этим загрязнение окружающей среды подошли к опасной черте [1]. Проблема очень острая, глобальная. Киотским протоколом, рамочными конвенциями по изменению климата (РКИК) ООН принимаются меры по решению этой глобальной проблемы [2], [3]. Определено, что основными загрязнителями являются выбросы продуктов сжигания традиционных энергоносителей, включая уголь, нефтепродукты, газ. В качестве главных критериев оценки состояния экологии приняты: учет и регулирование объемов выбросов в атмосферу продуктов сгорания, повышение эффективности энергосберегающих мероприятий, снижение влияния производственных предприятий на состояние экологии. Предусмотрены существенные вложения в новые технологии, способствующие снижению выбросов в атмосферу CO<sub>2</sub>, включая освоение возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Одним из новых направлений возобновляемой энергетики является мультizonальная система (МЗС) использования ВИЭ, основанная на суммировании энергий вторичного тепла, образующегося при функционировании технологических процессов и ВИЭ. Система также осуществляет охлаждение продукции, кондиционирование воздуха и полезное использование их избыточной тепловой энергии. Как следствие, достигается существенный энергосберегающий и экологический эффект.

Предлагаемая система разработана применительно к животноводческим фермам. Поэтому отличается от известных устройством, выполняемыми функциями и параметрами [4], [5], [6].

**2. Материалы и методы исследований.** Литературный анализ и патентные исследования проведены по базам отечественных и зарубежных журналов и патентного фонда. На их основе обоснованы конструктивно-технологические решения системы. Теоретические исследования проведены с использованием методов термодинамики. Новизной системы являются технические решения устройств, осуществляющих функции: суммирование потоков энергий, поступающих от нескольких, различных по физической

природе, ВИЭ, охлаждение продукции, кондиционирование воздуха, утилизации избыточной вторичной тепловой энергии. Устройства защищены патентами РК [7], [8]. Основные исследования по теме проведены в процессе выполнения грантового проекта Комитета науки МОН РК: «Энерго- и ресурсосберегающая система теплоснабжения для сельского хозяйства на основе интегрированного использования энергий возобновляемых источников с микропроцессорным управлением» [9].

### 3. Состояние проблемы и исследования

В предлагаемой системе рисунки 1 и 2) низкопотенциальными источниками тепла (НПИ), которые будут преобразовываться и использоваться, служат: тепло грунта (ТГ), тепло молока (ТМ), вторичное технологическое тепло (ВТТ), тепло солнечной энергии (ТСЭ). Для этих целей разработана система, которая состоит из теплового насоса (ТН) 1, грунтового теплообменника 2, охладителя молока (ОМ) 3, устройства микроклимата 4, гелиоколлектора (ГК) 5, аккумулятора тепловой энергии (АТЭ) 6. Функционально система делится на четыре подсистемы: «ТН-гелиоколлектор», «ТН-микроклимат», «ТН-охладитель молока», «ТН-грунтовой теплообменник». Согласованная работа МЗС регулируются микропроцессорным блоком 33.

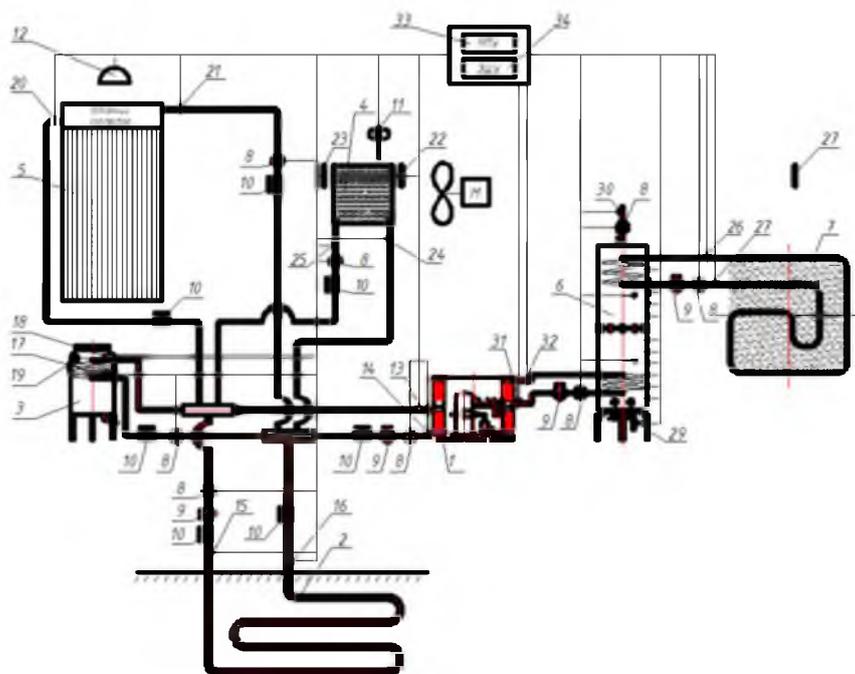


Рисунок 1 – Принципиальная схема теплонасосной системы

Система работает следующим образом.

При пуске в работу микропроцессорный блок 33, учитывая приоритетность задачи, подключает к ТН один из 4-х источников. То есть функционирует одна из подсистем и тепло от источника, посредством циркуляционного насоса 9, подается к испарителю ТН. Далее тепло поглощается хладагентом, циркулирующим во внутреннем контуре ТН. Хладагент, посредством компрессора, передает тепло конденсатору. Из конденсатора тепло снимается теплоносителем и накапливается в АТЭ. Например, в ночное время, когда животные находятся в коровнике, система осуществляет забор избыточного тепла из воздуха помещения посредством теплообменника 4. При этом одновременно с утилизацией избыточного тепла идет кондиционирование поддержания параметров воздуха внутри помещения и на заданном уровне.

В утреннее время, после дойки, ТН автоматически подключается к охладителю молока и забирает его тепло. При этом молоко охлаждается до нормативной температуры за определенное время.



Рисунок 2 – Общий вид лабораторного стенда

В дневное время переключающие клапаны подключают к испарителю ТН солнечные коллекторы 5. При отсутствии солнечного излучения ТН подключается к грунтовому теплообменнику 2 и осуществляет съем тепла из слоя грунта окружающего теплообменник до определенного значения температуры грунта. Накопленное в АТЭ тепло, при помощи циркуляционного насоса может подаваться в теплый пол 7 или на горячее водоснабжение 30. При необходимости, при помощи электрического нагревателя (ТЭНа) встроенного в нижней части АТЭ, осуществляется доводка температуры горячей воды до требуемого технологического значения. Подпитка холодной водой осуществляется из системы водоснабжения по трубопроводу 29.

Схема и общий вид лабораторного стенда для исследований характеристик подсистемы «ТН-гелиоколлектор» приведены на рисунке 3.

Исследования проводятся в зимний и летний периоды.

В процессе экспериментов фиксируются:  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$ ,  $G_1$ ,  $G_2$ . Частота между измерениями выбирается в зависимости от динамики процесса. Одновременно записываются показания пиранометра ( $E$ ) и температуры окружающей среды –  $t_m$ .

Исследуются характеристики гелиоколлектора со светопрозрачным покрытием и без него. Мощности, развиваемые гелиоколлекторами, рассчитываются по формуле:

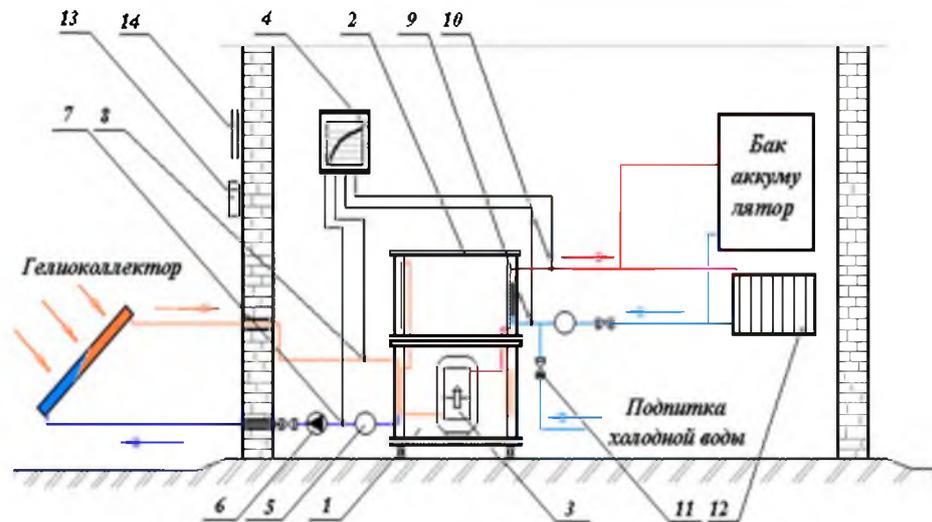
$$P_1 = c_p \cdot G_1 \cdot (t_2 - t_1) \cdot \frac{1}{S}, \quad (1)$$

где:  $t_1$  и  $t_2$  – температуры теплоносителя, соответственно, на входе и выходе гелиоколлектора, °С;  $S$  – площадь гелиоколлектора, м<sup>2</sup>.

Эксперименты с гелиоколлекторами со светопрозрачным покрытием и без него проводятся в одинаковых условиях. Для этого был выбран промежуток устойчивого солнечного излучения, от 12-00 до 15-00 часов.

Результаты экспериментальных измерений показаны на рисунке 4. На графиках, левая вертикальная ось координат показывает изменение температуры во времени, а

правая – изменение теплопроизводительности. Эксперименты проводились в зимних условиях в пасмурную и солнечную погоду.



1, 2, и 3, соответственно: испаритель, конденсатор и компрессор теплового насоса,  
 4 – измерительный блок, 5 – расходомер; 6 – циркуляционный насос; 7,8,9,10 – датчики температуры; 11– вентиль; 12 – отопительная нагрузка;  
 13 – пиранометр; 14 – термометр

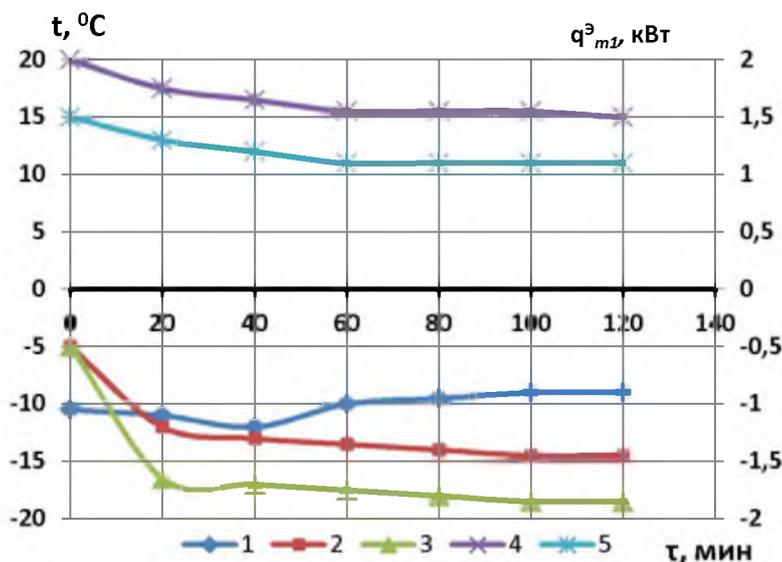


Рисунок 3 – Схема и общий вид стенда для исследования подсистемы «ТН-гелиоколлектор»

Анализ показывает, что при температуре окружающей среды минус 10°C и плотной облачности, температура антифриза подаваемого из теплового насоса в гелиоколлектор составляла минус 18°C. Протекая через гелиоколлектор, его температура повышалась на 4°C. При этом расчетная теплопроизводительность гелиоколлектора составляла от 1,1 до 1,5 кВт\*ч теплопроизводительность ТН:  $q_{ТН}^0=1,5...2,0$  кВт\*ч. Среднее расчетное значение коэффициента преобразования равнялось  $\phi=1,9...2,5$ .

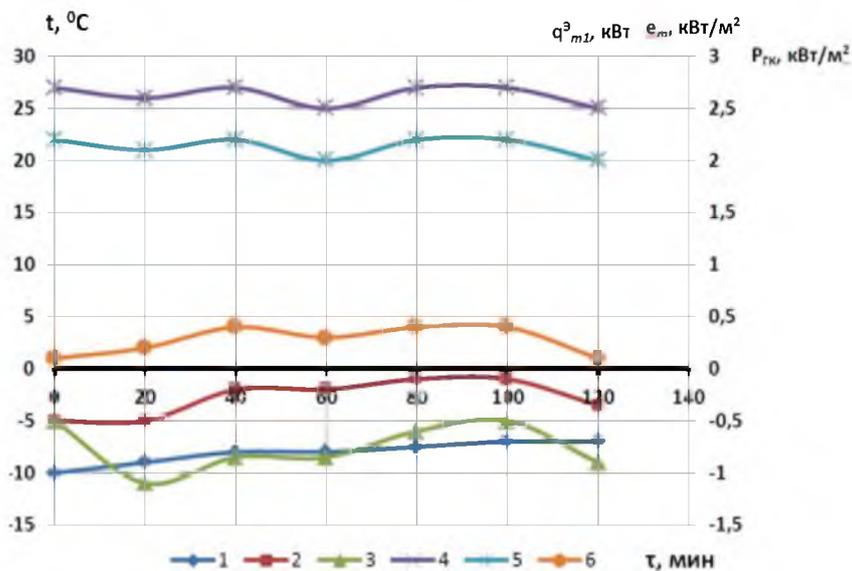
В солнечную погоду средняя интенсивность суммарной солнечной радиации составляла  $e_r=0,1...0,3$  кВт/м<sup>2</sup>(рисунок 5).

Из графиков видно, что при температуре окружающей среды минус 8...10°C температура антифриза, подаваемого из теплового в солнечный коллектор, составляла в пределах минус 5...10°C, расход теплоносителя 350...400 л/ч. Протекая через солнечный коллектор, он нагревался в среднем на 5...8°C.



1 –  $t_{г}$  – температура окружающей среды; 2, 3 –  $t_1$ ,  $t_2$  – температура теплоносителя на входе и выходе из гелиоколлектора; 4 –  $q_{эТ1}$  – теплопроизводительность ТН; 5 –  $P_{гк}$  – теплопроизводительность гелиоколлектора

Рисунок 4 – Температурные и энергетические характеристики подсистемы «ТН-гелиоколлектор» в зимних условиях, в пасмурную погоду



1 –  $t_{г}$  – температура окружающей среды; 2, 3 –  $t_1$ ,  $t_2$  – температура теплоносителя на входе и выходе из гелиоколлектора; 4 –  $q_{эТ1}$  – теплопроизводительность установки; 5 –  $P_{гк}$  – удельная мощность развиваемая гелиоколлектором; 6 –  $e_{т}$  – интенсивность солнечной радиации.

Рисунок 5 – Температурные и энергетические характеристики подсистемы «ТН-гелиоколлектор» в зимних условиях, в солнечную погоду

Расчетная теплопроизводительность солнечного коллектора составила  $P_{ГК}=2,0...2,2$  кВт\*ч, теплопроизводительность ТН:  $q_{ТН}^3=2,5...2,7$  кВт\*ч. Среднее расчетное значение коэффициента преобразования равнялось  $\phi=3,0...3,5$ .

Результаты расчетов среднесуточной теплопроизводительности подсистемы «ТН-гелиоколлектор» для условий Алматинской области приведены на рисунке 6.

В качестве расчетных взяты 6 отопительных месяцев (октябрь по март), при средней дневной работе 8 часов. Нижний график (зависимость 1) показывает расход энергии на привод компрессора ТН. Верхние теплопроизводительности при различных площадях ГК ( $S_{sc} = 1, 2, 4$  и  $10 \text{ m}^2$ ).

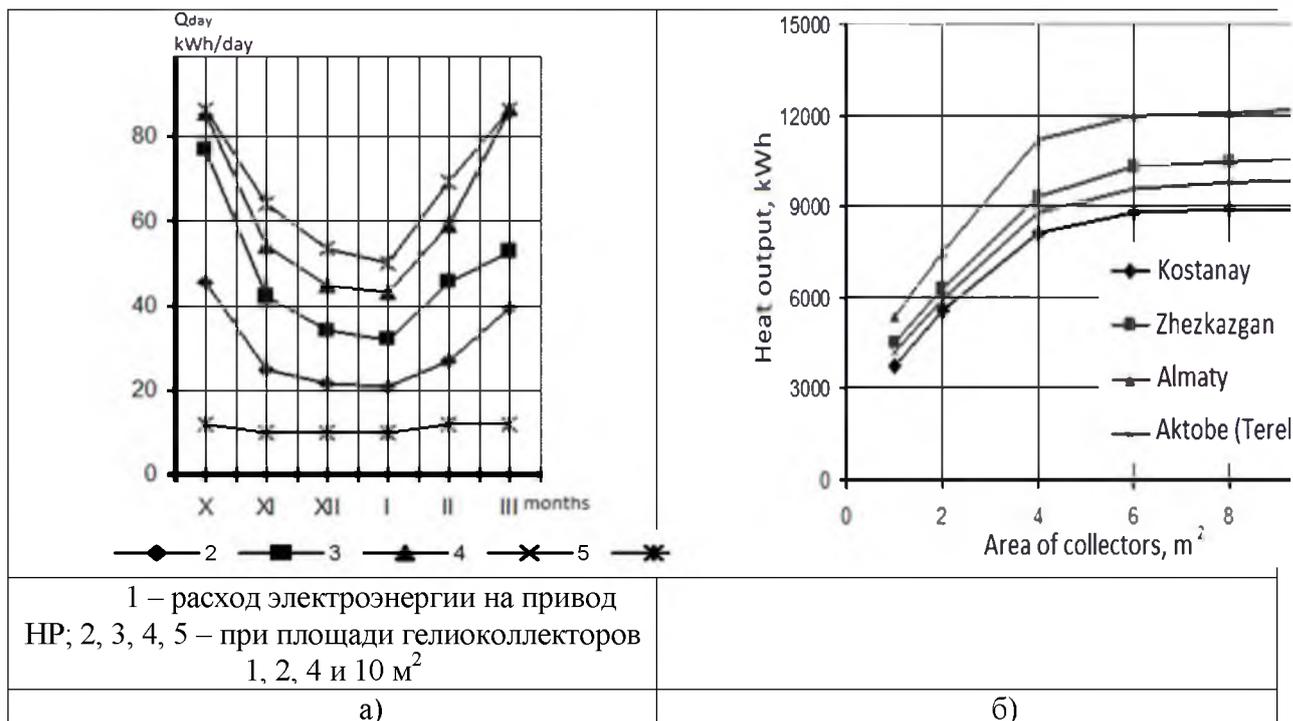


Рисунок 6 – Закономерности среднесуточной (а) и годовой теплопроизводительности (б) подсистемы «ТН-гелиоколлектор» в зависимости от площади ГК для климатических зон РК

### Анализ результатов исследований

В течение отопительного периода система эффективна, т. к. полезная вырабатываемая энергия больше энергии, затраченной на привод компрессора ТН. Закономерности имеют параболический характер, где минимум теплопроизводительности приходится на период декабрь-январь. В октябре и в марте теплопроизводительность наивысшая, т. к. повышается температура атмосферного воздуха и интенсивность солнечной радиации. Повышение температуры теплоносителя в ГК приводит к росту  $k_{tr}$  ТН.

В известной системе на цели тепло- и хладоснабжения расходуются традиционные энергоносители (электроэнергия, газ, жидкое топливо или уголь), солнечная энергия и электрическая энергия для привода компрессора холодильной машины. При применении МЗС структура энергоносителей меняется (таблица 1).

Источником эксергии в новой системе является тепло из окружающего атмосферного воздуха, которое поглощается дополнительно к солнечной энергии.

Подсистема «ТН-микrokлимат» не только регулирует тепловой режим, но также утилизирует тепло, накопившееся в помещении от животных из вентилируемого воздуха.

Подсистема «ТН-охладитель молока» – охлаждает молоко, с одновременной утилизацией тепла охлаждаемого молока.

Таблица 1 – Структура энергоносителей при традиционной и новой системе

Процессы	Источники энергии		Источники эксергии, образующиеся при использовании МЗС
	Известная базовая система	МЗС	
Горячее водоснабжение, отопление	Традиционные источники, солнечная энергия	Традиционные источники, солнечная энергия, тепло атмосферного воздуха	тепло атмосферного воздуха
Поддержание микроклимата	Традиционные источники, солнечная энергия	Традиционные источники, солнечная энергия, тепло животных	тепло животных, атмосферного воздуха
Охлаждение скоропортящейся продукции	Электрическая энергия (для привода компрессора холодильной машины)	Электрическая энергия (для привода компрессора теплового насоса)	Тепло молока

Данные виды энергии можно отнести к эксергии, так в известной системе они потенциально содержались, но не реализовывались. Новая система эффективно реализует их. Как было установлено, потенциал их существенный.

Подсистема ТН-гелиоколлектор обеспечивает теплопроизводительность при минусовых температурах воздуха. Структура теплопроизводительности состоит из 3-х составляющих: поглощённой прямой солнечной радиации, тепла атмосферного воздуха и тепла от работы компрессора. Соотношение долей энергии зависит от площади гелиоколлектора и изменения температуры атмосферного воздуха. На солнечную энергию и тепло атмосферного воздуха приходится основная доля. Их доля на протяжении всего отопительного периода выше 50%. При площади 4м<sup>2</sup> их доля наивысшая, чем при других площадях (1, 2, 10 м<sup>2</sup>). Доля тепла из окружающего атмосферного воздуха в отопительный период (октябрь-март) существенно превышает долю от солнечной энергии.

Подсистема ТН-микроклимат работает в определенных, известных температурных границах. Установлено, что ТН мощностью компрессора равном 1 кВт может поддерживать температуру помещения для животных в пределах +5...25°С для 6 коров. В расчетах было принято, что в среднем одна корова выделяет до 0,7 кВт\*ч тепла, тепловой насос нагревает воду от 14 до 40°С, коэффициент преобразования НР составляет 3...5, холодопроизводительность 2...4 кВт\*ч, теплопроизводительность, 3...5 кВт\*ч. Установлено, что годовое производство энергии, при среднесуточном содержании животных в помещении 15 часов составит 14000 кВт\*ч/ кВт. Экономический эффект \$630/кВт.

У подсистемы ТН-охладитель молока, при мощности компрессора ТН равном 1 кВт, при условии обеспечения технологических параметров охлаждения молока от +35 до +5°С, за период до 3 часов, средний коэффициент преобразования составит 3...4, объем охлаждаемого молока - 200 литров, объем нагретой воды - 250 литров с температурой от 14 до 40°С, годовая экономия электрической энергии составит до 10800 кВт\*ч.

### **Выводы**

На основе литературного анализа и патентных исследований осуществлен выбор конструктивно-технологического решения теплонасосной системы использования энергий возобновляемых источников энергии. Система включает подсистемы: «ТН-гелиоколлектор», «ТН-микроклимат», «ТН-охладитель молока», «ТН-грунтовый теплообменник». Осуществляется поглощение, суммирование энергий ВИЭ, вторичного технологического тепла, охлаждение продукции, кондиционирование воздуха и полезное использование их избыточной тепловой энергии. Как следствие, достигается существенный энергосберегающий и экологический эффект.

Система разработана применительно к животноводческим фермам. Поэтому, отличается от известных систем устройством, выполняемыми функциями и параметрами. Полученные результаты подтверждают общую энергетическую и эксергическую эффективность и работоспособность новой системы в условиях резко континентального климата, характерного для территории РК. Для автоматического управления работой устройства разработана система микропроцессорного управления.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- [1] WEC – WorldEnergyCouncil / Мировой энергетический совет (МИРЭС) //Деятельность МИРЭС. Мировая энергетическая трилемма (WET) (03 апр. 2016). Website: [www.worldenergy.org](http://www.worldenergy.org)
- [2] United Nations Framework Convention on Climate Change / The Paris Agreement // [http://unfccc.int/paris\\_agreement/items/9485.php](http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php)], [International-Energy-Agency // Key world Energy Statistics. –2006.
- [3] Киотский протокол к Рамочной конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата (Киото, 11 декабря 1997 года).
- [4] Омаров Р.А., Байболов А.Е., Райымбеков А.Е., Омар Д.Р. Мультизональная система тепло- и хладоснабжения животноводческой фермы на базе теплового насоса. Труды 9-й Международной научно-технической конференции «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве» (21-22 мая 2014 года, г. Москва, ГНУ ВИЭСХ), С.106-111.
- [5] Omarov, R., Abdygaliyeva, S., Omar, D., Kunelbayev, M. Integrated system for the use of energy in the animal farm. //ScientiaIranica D (2017) 24, 3213-3222.
- [6] Rashit, O., Stoyanov, I., Saule, D., Kunelbayev, M., Yerkin, Y. Experimental studies of a heat pump with microprocessor control on an animal farm. //International Journal of Applied Engineering Research. Volume 12, Number 24 (2017) pp. 14259-14267
- [7] Инновационный патент РК №28944, МПК F24D 3/08. Устройство для интегрированного использования энергии возобновляемых источников / Омаров Р.А., Райымбеков А.Е., Байболов А.Е., Омар Д.Р.; опубл. 15.09.2014, Бюл. №9. –3 с.
- [8]. Патент РК №31428, МПК A01K 1/00. Энергосберегающая животноводческая ферма с применением помещений круглой формы /Омаров Р.А., Райымбеков А.Е., Байболов А.Е., Омар Д.Р.; опубл. 15.08.2016, Бюл. №9. –5 с.
- [9] ОТЧЕТ ПО НИР ЗА 2015 ГОД по грантовому проекту: «Энерго- и ресурсосберегающая система теплоснабжения для сельского хозяйства на основе интегрированного использования энергий возобновляемых источников с микропроцессорным управлением» (заключительный). Депонированный отчет МРНТИ 44.37, № гос.рег. 0113 РК 00536, инв.№0213РК02137.

## REFERENCES

- [1]WEC - WorldEnergyCouncil / WorldEnergyCouncil (WEC) // WECActivities. World Energy Trilemma (WET) (Apr 03, 2016). Website: [www.worldenergy.org\(eng\)](http://www.worldenergy.org(eng)).
- [2]United Nations Framework Convention on Climate Change / The Paris Agreement // [http://unfccc.int/paris\\_agreement/items/9485.php](http://unfccc.int/paris_agreement/items/9485.php)], [International-Energy-Agency // Key world Energy Statistics. –2006.(eng)
- [3]Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change (Kyoto, 11 December 1997).(russian)
- [4] Omarov R.A., Baibolov A.E., Raiymbekov A.E., Omar D.R. Multi-zone heat and cold supply system for a livestock farm based on a heat pump. Proceedings of the 9th International Scientific and Technical Conference "Energy Supply and Energy Saving in Agriculture" (May 21-22, 2014, Moscow, GNU VIESH), p.106-111.(russian)
- [5] Omarov, R., Abdygaliyeva, S., Omar, D., Kunelbayev, M. Integrated system for the use of energy in the animal farm. //ScientiaIranica D (2017) 24(6), 3213-3222.(eng)
- [6] Rashit, O., Stoyanov, I., Saule, D., Kunelbayev, M., Yerkin, Y. Experimental studies of a heat pump with microprocessor control on an animal farm. //International Journal of Applied Engineering Research. Volume 12, Number 24 (2017) pp. 14259-14267/ (eng)
- [7] Innovative patent of the Republic of Kazakhstan No. 28944, IPC F24D 3/08. A device for integrated use of renewable energy / Omarov, RA, Raiymbekov, A.E., Baibolov, A.E., Omar, D.R.; publ. 09/15/2014, Byul. №9. -3 seconds(russian)
- [8]Patent RK № 31428, IPC A01K 1/00. Energy-saving cattle-breeding farm with the use of round-shaped premises / Omarov RA, Raiymbekov AE, Baibolov AE, Omar D.R. ; publ. 08/15/2016 Byul. №9. –5 sec.(russian)
- [9] REPORT ON R & D FOR THE YEAR 2015 on the grant project: “Energy and resource saving heating system for agriculture based on integrated use of renewable energy sources with microprocessor control” (final) Depot report of MRNTI 44.37, state reg. 0113 RC 00536, inv.№0213RK02137.(russian)

## ЖАҢАРТЫЛҒАН ЭНЕРГИЯЛЫҚ КӨЗДЕРІНДЕ ПАЙДАЛАНЫЛАТЫН ЖЫЛУ СОРҒЫ ТЕХНОЛОГИЯСЫ

**Демесова С.Т., Омаров Р.А., Омар Д.Р., Байболов А.Е., Султангазиев Т.К.**

Қазақ ұлттық аграрлық университеті, Алматы қ-сы

**Анатпа.** Ауыл шаруашылық кешенінде жанартылатын энергия көздерін пайдалану, дәстүрлі энергия көздерін тұтынуды азайту, энергияны үнемдеу технологиялық және экономикалық өзекті міндет болып табылады. Ұсынылған жылу сорғы технологиясы күн энергиясын, жануарлардың жылуын, сүтті, топырақты пайдалануға мүмкіндік береді. Жүйе микроклиматтың жылу процестерін, өнімдерді салқындату мен сақтауды реттейтін технологиялық үдерістермен тығыз байланысты және өзара әрекеттеседі, сонымен қатар процестердің артық қызуын пайдаланады.Мақалада: құрылғы, жұмыс принципі, жүйенің негізгі заңдары келтірілген.Сиыр қораның микроклимат бөлігі ретінде жұмыс істеген кезде функционалдық сипаттамаларға мынадайбаға берілді:өнімділік сипаттамасының сақталуы:белгілі бір кезеңдегі технологиялық процестің сапасы мен тұрақтылығы.

**Түйінді сөздер:** Мал шаруашылық фермасы, жылу және суықтықпен камтамасыз ету, микроклимат, жылу сорғысы, күн энергиясы, жануардың жылуы.

**HEAT PUMP SYSTEM APPLIED IN RENEWABLE ENERGY SOURCES  
Demesova S.T., Omarov R.A., Omar D.R., Baibolov A.E., Sultangaziyev T.K.**

Kazakh National Agricultural University, Almaty

**Annotation.** The use of renewable energy sources in the processes of agriculture, reducing the consumption of traditional energy sources, energy saving is an urgent technological and economic problem. The proposed heat pump system allows to use the solar energy. The system is connected and closely interacts with technological processes, regulating the thermal processes of the microclimate, cooling and storage of products, while simultaneously utilizing the resulting excess heat of the processes. The article describes: the device, the principle of operation, the basic laws of the system. An assessment was made on the functional characteristics when working as part of the barn microclimate; compliance with the performance specification; quality and stability of the technological process in a set period.

**Keywords:** Livestock farm, heat and cold supply, microclimate, heat pump, solar energy, animal heat

УДК 662.61 (075.8)

Ю.М.Голдобин, А.А.Ядрышникова

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина»

### ДИФФУЗИОННОЕ СЖИГАНИЕ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ КОКСОВОЙ ПЫЛИ В ПОТОКЕ

**Аннотация:** Данная статья посвящена сравнению расчетов степени выгорания частиц по относительной длине факела с экспериментальными данными по сжиганию полидисперсной антрацитовой пыли. Также рассматривается влияние начальной температуры среды и увеличение среднего размера частиц на скорость горения и степень выгорания.

**Ключевые слова:** полидисперсная пыль, горение, тепловой баланс, скорость.

В [1, 2] учет полидисперсности производится на основе решения кинетического уравнения для функции распределения частиц по радиусам по известной кинетике процесса для отдельной частицы. В [3] - этим методом решены задачи выгорания полидисперсной системы частиц антрацитовой пыли в замкнутом объеме с адиабатическими стенками. Этот подход можно распространить и на выгорание коксовой пыли в одномерном стационарном потоке с адиабатическими стенками.

Считается, что исходная коксовая пыль состоит из сферических частиц различных размеров, внутренние реакции отсутствуют, горение идет по первичной реакции с образованием двуокиси углерода, скорость реакции имеет первый порядок по кислороду, горение считается квазистационарным и автомодельным. Пыль вдувается воздухом в канал со средой, имеющей начальную температуру выше температуры воспламенения кокса, время индукции до воспламенения не учитывается.

Течение смеси в канале считается одномерным по направлению  $x$  и стационарным.

Кинетическое уравнение для функции распределения частиц по радиусам  $f(r, x)$  имеет вид

$$v(x) \frac{\partial f(x, r)}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial r} [W(r, t) \cdot f(x, r)] = 0, \quad (1)$$

где  $W(r, t)$  – скорость изменения радиуса одиночной частицы в результате реакции горения, которую можно записать как

$$W(r, t) = \frac{dr}{dt} = \frac{dr}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = v(x) \frac{dr}{dx} = W(x, r), \quad (2)$$

где  $W(x, r)$  - скорость изменения радиуса частицы по длине канала.

Для многих процессов функции  $f(r, x)$  и  $W(x, r)$  можно представить в виде произведения двух функций

$$f(x, r) = \Phi(x)R(r) \text{ и } W(x, r) = \Omega(r)\omega(x) \quad (3)$$

Тогда кинетическое уравнение (1) решается методом разделения переменных Фурье, которое для автомодельного режима горения приводится к виду

$$f(x, r) = \Phi(x)R(r) = A\Omega^{-1}(r) \exp \left[ -a \int \Omega_0^{-1}(r) dr \right] \exp \left[ a \int_0^x \frac{\omega(x)}{v(x)} dx \right], \quad (4)$$

где  $a$  – константа разделения,  $A$  – константа интегрирования.

При  $x=0$  имеем для автомодельных систем начальную функцию распределения

$$f(0, r) = f_0(r) = A\Omega^{-1}(r) \exp \left[ -a \int \Omega_0^{-1}(r) dr \right] \quad (5)$$

Из условия нормировки и начальной функции распределения (5) следует  $A=a$ . Тогда функция распределения представляется как

$$f(x, r) = f_0(r) \exp \left[ a \int_0^x \frac{\omega(x)}{v(x)} dx \right],$$

изменение числа частиц в системе

$$N(x) = N_0 \exp \left[ a \int_0^x \frac{\omega(x)}{v(x)} dx \right] \quad (7)$$

Моменты порядка n величины r:  $\langle r^n \rangle$  и  $\langle r^n \rangle_0$  будут

$$\langle r^n \rangle N(x) = N_0 \int_0^\infty r^n f(x, r) dr = \langle r^n \rangle_0 N(x) \quad (8)$$

Из последнего соотношения следует, что в автомодельном режиме средний размер частиц, поверхность и объем не будут изменяться по длине канала, а будет изменяться лишь число горящих частиц  $N(x)$ .

Массовая доля частиц  $y(x)$ , не прореагировавших по длине канала  $x$ , будет

$$y(x) = \frac{M_T(x)}{M_T(0)} = \frac{N(x) \langle r^3 \rangle}{N_0 \langle r^3 \rangle_0} = \frac{1}{\langle r^3 \rangle_0} \int_0^\infty r^3 f(x, r) dr, \quad (9)$$

где  $M_T(x)$  и  $M_{T0}$  – массовые расходы частиц: текущий и начальный.

Из (9) следует, что

$$y(x) = \exp \left[ a \int_0^x \frac{\omega(x)}{v(x)} dx \right] \quad (10)$$

Из (10) получаем дифференциальное уравнение, чтобы определить  $y(x)$  по известной  $\omega(x)$

$$\frac{dy(x)}{dx} = a \frac{\omega(x)}{v(x)} y(x) \quad (11)$$

Связь  $\omega(x)$  с  $y(x)$  может быть получена из уравнения теплового баланса системы.

Кинетическое уравнение (1) может быть решено в конечном виде только для диффузионного или кинетического режимов горения.

В диффузионном режиме горения скорость горения частиц  $W(x, r)$  при отсутствии скольжения фаз ( $Nu_d=2$ ) может быть представлена в виде

$$W(x, r) = - \frac{\beta C_{K0} Nu_d D}{2r \rho_{\text{ч}}} = \frac{1}{r} \left[ - \frac{\beta C_{K0} D_0}{\rho_{\text{ч}} 273} T_{\text{cp}}(x) \right] = \Omega(r) \cdot \omega(x), \quad (12)$$

где принято, что коэффициент диффузии кислорода зависит от температуры среды во второй степени;  $C_{K0}$  и  $D_0$  – начальные значения концентрации кислорода и коэффициента диффузии;  $\beta$  – отношение молекулярных масс кислорода и углерода;  $\rho_{\text{ч}}$  – плотность частиц;  $T_{\text{cp}}(x)$  – температура среды по длине камеры сгорания.

Подстановка (12) в (1) и дальнейшие вычисления приводят к следующим результатам:

Начальная функция распределения частиц по радиусам

$$f_0(r) = ar \cdot \exp \left[ -a \frac{r^2}{2} \right]; \quad (13)$$

Автомодельные параметры

$$a = \frac{2\Gamma^2(3/2)}{\langle r \rangle_0^2}; \quad \langle r^n \rangle = \langle r^n \rangle_0 = \frac{\langle r \rangle_0^n \Gamma\left(\frac{n+2}{2}\right)}{\Gamma^n(3/2)}, \quad (14)$$

Где  $\Gamma$  – гамма-функция.

Уравнение теплового баланса системы без учета тепла, затраченного на прогрев частиц, можно записать в виде

$$\left( \dot{M}_{\text{ин}} c_{\text{ин}} + \dot{M}_{\text{к}} c_{\text{к}} + \dot{M}_{\text{пт}} c_{\text{пт}} \right) \frac{dT_{\text{cp}}(x)}{dx} = -Q_R \frac{d\dot{M}_T}{dx}, \quad (15)$$

Где  $\dot{M}_{\text{ин}}$ ,  $\dot{M}_{\text{к}}$ ,  $\dot{M}_{\text{пт}}$ ,  $\dot{M}_T$  – массовые расходы инертного газа (азота воздуха),

кислорода, продуктов горения, топлива (углерода кокса);  $c_{ин}$ ,  $c_k$ ,  $c_{пг}$  - теплоемкости азота, кислорода, продуктов горения;  $Q_R$  - теплота сгорания топлива.

Уравнение (15) приводится к виду

$$\left[ 1 + \mu \frac{c_{пг}}{c_{ин}} (1 - y) \right] dT_{cp}(x) = -\mu \frac{Q_R}{c_{ин}} dy(x) , \quad (16)$$

где  $\mu = \frac{M_{то}}{M_{ин}}$ ;  $c_{пг} = \frac{m_T}{m_K} c_K + \frac{m_T}{m_{пг}} c_{пг}$  - приведенная теплоемкость;

$m_T$ ,  $m_K$ ,  $m_{пг}$  - молекулярные массы топлива, кислорода, продуктов горения соответственно.

Решение уравнения (16) связывает температуру среды с долей несгоревшего топлива, из которого при линеаризации логарифма, входящего в решение, получается

$$T_{cp}(x) = T_{cp(0)} + \mu \frac{Q_R}{c_{ин}} (1 - y) \quad (17)$$

Учитывая связь концентрации кислорода  $C_k$  с концентрацией топлива  $C_{т0}$  и долей несгоревшего топлива  $y(x)$ , можно записать

$$\omega(x) = -\frac{C_{т0} D_0}{\rho_q 273} y(x) T_{cp}(x)$$

Подстановка (17) и (18) в дифференциальное уравнение (11) приводит к уравнению (18)

$$\frac{dy(x)}{dx} = -\frac{k}{v(x)} [1 + k^*(1 - y)] y^2 , \quad (19)$$

где  $k = \frac{a C_{т0} D_0}{\rho_q 273} T_{cp(0)}$ ;  $k^* = \frac{\mu Q_R}{c_{ин} T_{cp(0)}}$

Решением (19) с учетом начальных условий  $x=0$ ;  $y(0)=1$  является интеграл (20)

$$\int_0^x \frac{dx}{v(x)} = -\frac{k^*}{k(1+k^*)} \left[ \frac{1-y}{y} + \frac{1}{(1+k^*)} \ln \left| \frac{1+k^*(1-y)}{y} \right| \right] \quad (20)$$

Для одномерного течения с постоянной скоростью смеси  $v_0$  уравнение (20) связывает координату потока  $x$  с долей несгоревшего топлива  $y(x)$ .

Подстановка  $\frac{dx}{v(x)} = dt$  в (19) и (20) позволяет определить скорость выгорания и долю несгоревшего топлива во времени.

На рисунке 1 приведено сравнение результатов расчетов степени выгорания по относительной длине факела  $\bar{x}$  по уравнению (20) с экспериментальными данными по сжиганию полидисперсной антрацитовой пыли в топке котла ТП-70 [4]. По данным [4] длина факела в топке - 26 м, температура газа в корне факела составляла 1200 °С, средний размер частиц - 44 мкм; средняя скорость газов -  $v_0=6,5$  м/с, коэффициент избытка воздуха в топке 1,2;  $Q_R = 23673,5$  кДж/кг;  $\rho_q = 1500$  кг/м<sup>3</sup>. Здесь же для сравнения приведены расчеты сжигания полидисперсной смеси с более крупными средними размерами частиц, которые не успевают сгорать в пределах топки.

На рисунке 2 представлены результаты расчетов скорости диффузионного горения частиц для режимов работы котла ТП-70, из которого видно, что начальная температура среды слабо влияет на скорость горения  $dy/dt$ , а, следовательно, и на степень выгорания топлива  $y$ , в то время как увеличение среднего размера частиц резко уменьшает скорость горения.

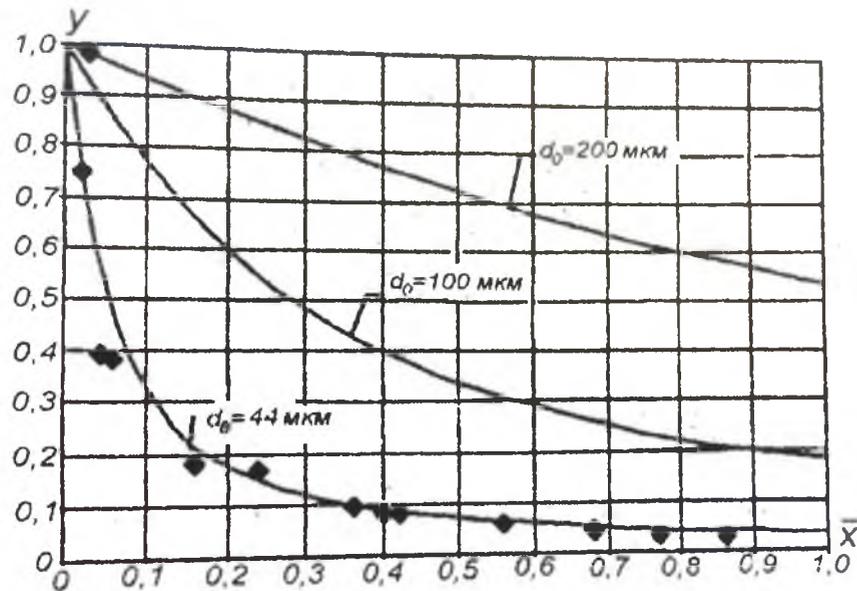


Рисунок 1. Выгорание пыли антрацита.

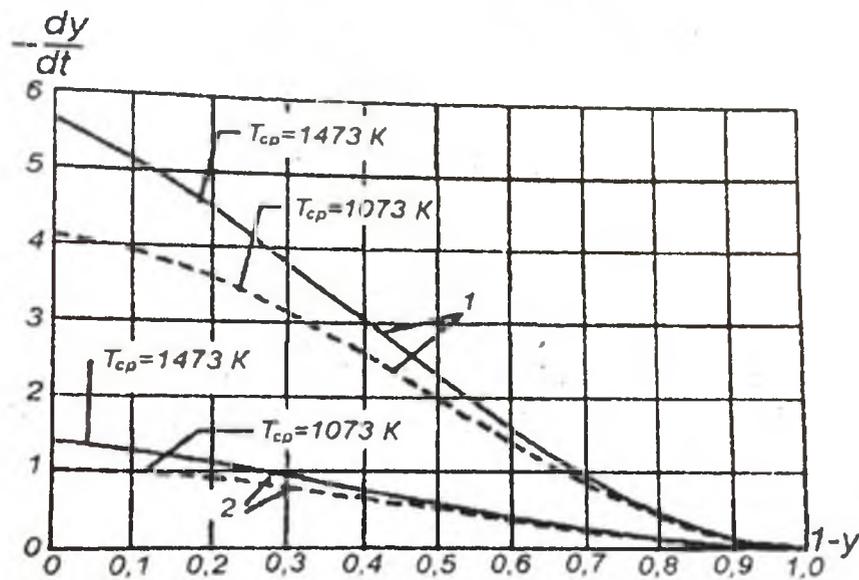


Рисунок 2. Влияние выгорания топлива на относительную скорость горения.

1-средний начальный размер частиц  $d_0=50$  мкм; 2-  $d_0=100$  мкм.

Выводы: мелкие частицы полидисперсной пыли быстро сгорают в начале факела (на расстоянии 0,25-0,3 его относительной длины), а горение крупных частиц затягивается ввиду малой скорости горения; основная масса топлива (до 90%) сгорает за небольшой промежуток времени 0,5-0,8 с (частицы со средним размером 50 мкм).

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Бувевич Ю. А. О кинетике массообмена полидисперсной системы частиц с окружающей средой / ПМТФ, 1996, №1. С.50-57.
2. Ясников Г. П. О кинетике автомодельного режима испарения полидисперсной системы капель / ИФЖ, 1982, т. 42, №2. С. 243-250.
3. Голдобин Ю. М. О кинетике горения полидисперсной коксовой пыли. / ИФЖ, 1986, т. 50, №1. С. 114-120.
4. Шагалова С. Л., Тимошинин Ю. А., Резник В. А., Шницер И. Н. Экспериментальное исследование процессов горения пыли АШ в топках мощных паровых котлов / Теплоэнергетика, 1963, №2. С. 2-9.

### **BIBLIOGRAPHY:**

1. Buevich Yu. A. «On the kinetics of mass transfer of a polydisperse system of particles with an environment» / PMTF, 1996, №1. P.50-57.
2. GP Yasnikov, «On the kinetics of the self-similar evaporation regime of a polydisperse system of droplets», 1982, V. 42, №2. P. 243-250.
3. Goldobin Yu. M. On the kinetics of combustion of polydisperse coke dust. / FFRI, 1986, V. 50, №1. P. 114-120.
4. Shagalova SL, Timoshinin Yu. A., Reznik VA, Schnitser IN Experimental study of the combustion processes of AS dust in furnaces of high-power steam boilers / Teploenergetika, 1963, №2. P. 2-9.

### **DIFFUSIVE COMBUSTION OF POLYDISPERSE COKE DUST IN A STREAM**

Goldobin Yu. M., Yadryshnikova A. A.

FGAOU VO "Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin"

**Abstract:** This article is devoted to comparing the calculation of the degree of burn-up of particles by the relative length of the torch with the experimental data on the burning of polydisperse anthracite dust. The influence of the initial temperature of the medium and the increase in the average particle size on the combustion rate and the degree of burn-up are also considered.

**Key words:** polydisperse dust, combustion, heat balance, speed.

МРНТИ 61.35.35

А.А.Торгаев, Ж.А.Дуйсенбек

НАО «Алматинский университет энергетики и связи», г. Алматы, Казахстан

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ

**Аннотация.** Исследованы воздействия теплового удара на структурные элементы огнеупорного материала. Образовавшиеся температурные поля изменяются в процессе взаимодействия структурных составляющих из-за разности температурных слоев.

Показано, что стойкость огнеупоров повышается с увеличением размера зерен шихты и уменьшением рабочей площади поверхности огнеупора. Для повышения термостойкости огнеупоров необходимо проводить расчет формы и размера изделия, а также экспериментальные исследования минерально-зернового состава шихты.

**Ключевые слова:** огнеупорные материалы, шихта, химическая стойкость, тепловые агрегаты, форсунки, отходящие газы, поверхность футеровок.

**Annotation.** There was done technology research of gas-permeable and dense oxide ceramic for corrosive environment conditions and sudden chilling-heat shock, which generated at different nodes of plasma system, metallurgical and chemical units.

Огнеупорные материалы, применяемые в металлургической, цементной и энергетической промышленности должны обладать наряду с высокой химической стойкостью, высокой термической стойкостью, т.е. противодействовать образованию трещин и выкрашиванию материала от резких перепадов температур. Последнее явление неизбежно, так как поверхность футеровок тепловых агрегатов периодически подвергается нагреву от форсунок сжигаемого топлива и продуктов переработки – (расплава металла, шлака, отходящих газов), а также охлаждению при выпуске расплава и загрузке шихты. В результате этого огнеупорные материалы разрушаются, что приводит к остановке теплового агрегата, а иногда и к прекращению производства продукции.

Имеется несколько теоретических аспектов явлений повышения термостойкости керамических изделий – это образование фрагментарной структуры /1/, образование микротрещин /2,3/, применение различных добавок, позволяющих формировать межзерновые прослойки, служащие релаксаторами напряжений в структуре изделий /4, 5/.

Напряжения в структуре огнеупорных изделий возникают при проникновении шлака и расплава металла в материал, а также от перепадов температурного режима в печи.

Достоверная оценка температурных напряжений в изделии остается одной из актуальных и нерешенных проблем /6/.

Структурной особенностью огнеупорных материалов является связь разнородных по химическому и гранулометрическому составу взаимосвязанных контактирующих частиц, мелких и крупных пор, пронизывающих изделие.

При возникновении теплового воздействия структурные элементы формируют тонкие слои, направленные перпендикулярно движению потока тепла. Образовавшееся температурное поле имеет тенденцию к изменению, ввиду взаимодействия структурных составляющих из-за разности температурных слоев.

Реальное твердое тело с дискретной структурой и хаотичной ориентацией зерен материала можно представить в виде модели, состоящей из гипотетических шаров с плотной упаковкой. С помощью модели неравномерно нагретого дискретного твердого тела можно его разделить на слои, ориентированные перпендикулярно движению теплового потока.

Теоретически, с изменением температуры, структура поверхностного слоя и размеры также изменяются. Однако от полного разрушения защищают прямые связи минеральных фаз между зернами материала.

Напряженное состояние контактов значительно выше среднего напряжения в изделии – противодействующие слои испытывают растягивающие усилия, а структурные элементы вследствие реактивного противодействия связей-контактов – сжимающие усилия.

Рассматривая тело, состоящее из бесконечно тонких пластин, взаимодействующих слоев материала, величина деформации согласно [6] будет представлять собой сумму их реактивных деформаций.

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{ген}} + \varepsilon_{\text{прот}}, \quad (1)$$

$\varepsilon_{\text{ген}}$  – генерирующий слой (передающий тепло)

$\varepsilon_{\text{прот}}$  – противодействующий слой (воспринимающий тепло)

Эти величины относительной деформации уравнивают друг друга и выражаются формулой для бесконечно тонкой пластины.

$$\varepsilon_{\text{ген}} = \varepsilon_{\text{прот}} = \frac{1}{2} \alpha \Delta T, \quad (2)$$

$\Delta T$  – разность температур на поверхности изделия и слоя, расположенного на расстоянии от этой поверхности.

Неравномерно нагретый огнеупорный материал воспринимает значительные термонапряженные нагрузки, которые характеризуются интенсивностью и длительностью теплового потока, а также скоростью изменения температуры поверхности изделия.

Исследование периклазо-хромитовых и периклазовых огнеупорных изделий проводим с определением температурно-напряженного состояния с использованием большого количества термопар в теле нагретого материала по следующей формуле:

$$\sigma_x = \frac{\alpha \cdot E_p}{1 + \frac{E_p}{E_{сж}}} \cdot K_1 \cdot K_2, \quad (3)$$

$$K_1 = m \tau \left[ 1 - \left( 1 - \frac{x}{s} \right)^2 \right], \quad (4)$$

$$K_2 = \left( \frac{b-1}{b} \right)^x, \quad (5)$$

$K_1$  - коэффициент условия температурного нагружения;

$K_2$  - коэффициент, учитывающий форму и размеры изделий;

$m$  – скорость нагрева (охлаждения) изделия;

$s$  - глубина прогретой зоны;

$E_p, E_{сж}$  – модуль упругости при растяжении (сжатии);

$x$  – расстояние от поверхности до исследуемого слоя.

Проведенные исследования показали, что торцевая часть периклазо-хромитового блока  $(15 \cdot 75) \cdot 10^{-3}$  м воспринимает температурные нагрузки при максимальном значении  $\sigma_x = 10,6$  н/мм<sup>2</sup> при скорости  $m = 10$  град/мин через 240 минут. Максимально опасные температурные напряжения формируются на расстоянии 0,17 м от рабочей поверхности огнеупора. При уменьшении площади рабочей поверхности вдвое (со стороны  $70 \times 10^{-3}$  м)

скорость нагрева, при которой сохраняется целостность структуры, увеличивается до  $m = 18$  град/мин.

При нагреве боковой поверхности огнеупорного блока  $(450 \times 75) \cdot 10^{-3}$  м, где площадь значительно больше торцевой, допускаемая скорость ее нагрева резко снизилась до 3,2 град/мин. При этом температурные напряжения резко возросли (более  $11 \text{ н/мм}^2$ ), а на глубине от поверхности наблюдалось нарушение первоначальной сплошности структуры. Эти исследования доказывают причину появления сколов в структуре тела огнеупоров.

Исследование крупнозернистых периклазовых огнеупоров показало повышение термостойкости изделий до 15 теплосмен ( $1300^\circ\text{C}$ ) в сравнении с мелкозернистой структурой. При увеличении размера зерна и содержания ее в шихте до 40% в материале формируется фрагментарная структура.

Испытание крупнозернистых огнеупоров на стойкость к термоудару коррозии и эрозионному поверхностному износу проводили в высокотемпературной плазменной установке. Опыты показали, что изделия обладают высоким сопротивлением против появления и распространения трещин под действием термического удара (быстрый нагрев до  $2100^\circ\text{C}$  и быстрое охлаждение канала холодным потоком воздуха до  $1000^\circ\text{C}$ ).

После 20 циклов испытания трещин на плитках с размером ребра  $70 \cdot 10^{-3}$  м не обнаружено, предел прочности при сжатии снизился по сравнению с исходным с 16 до  $14 \text{ н/мм}^2$ .

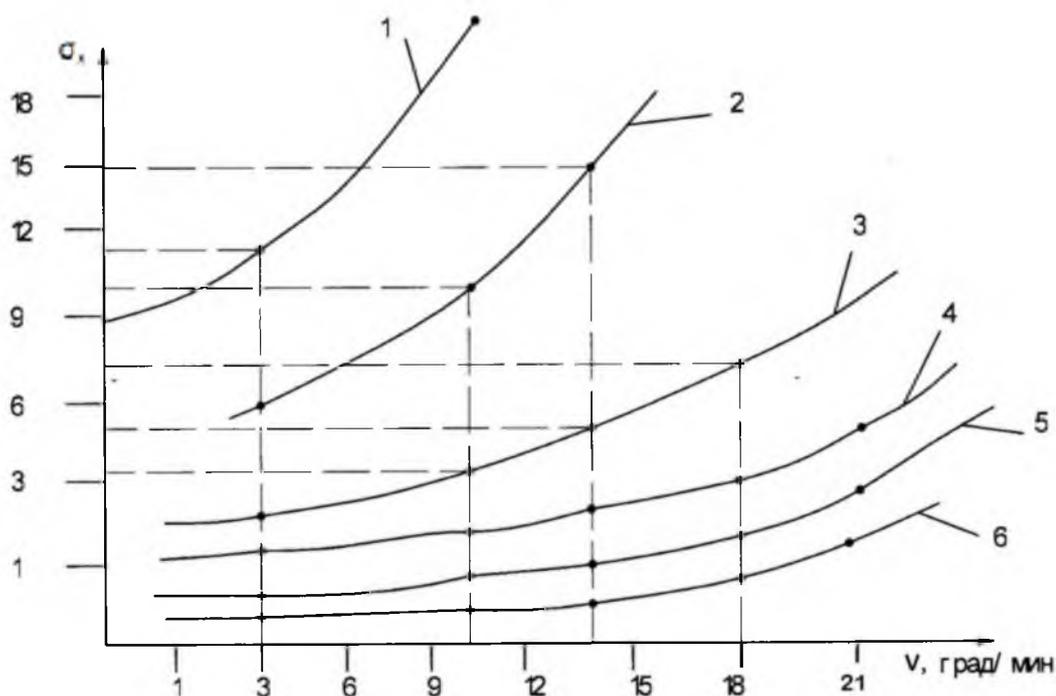


Рисунок 1 – Зависимость величины температурных напряжений от скорости нагрева огнеупорных изделий

1 - Периклазохромитовый блок (ПХБ), размером  $(450 \times 75) \cdot 10^{-3}$  м, время нагрева 240 мин.

2- ПХБ,  $(450 \times 75) \cdot 10^{-3}$  м, 240 мин.

3- ПХБ,  $(70 \times 70) \cdot 10^{-3}$  м, 60 мин.

4- ПХБ,  $(70 \times 70) \cdot 10^{-3}$  м, 240 мин.

5- ПХБ,  $(70 \times 70) \cdot 10^{-3}$  м, 60 мин.

6- Периклазовый,  $(70 \times 70) \cdot 10^{-3}$  м, 60 мин. в плазматроне

Скорость нагрева поверхности огнеупора составила более 50 град/мин, при этом формировались максимальные температурные напряжения на расстоянии 0,03 м от рабочей поверхности.

Максимальные растягивающие напряжения формировались на расстоянии 7-10 мм от поверхности в течение нескольких секунд, ввиду быстрого нагрева материала. При охлаждении возрастали структурные сжимающие напряжения. В таких жестких условиях происходит расшатывание структуры, что и приводит к снижению прочности изделий.

Расчетные и экспериментальные данные испытанных периклазохромитовых и периклазовых огнеупоров приведены на рис.1.

Таким образом, исследования подтверждают, что стойкость огнеупоров повышается с увеличением размера зерен шихты и уменьшением рабочей поверхности. Восприимчивость поверхностью тела высокого теплового потока улучшается при увеличении размера зерна, контактной межзерновой прочности и хорошей теплопроводности материала.

Для снижения температурных напряжений и повышения термостойкости огнеупоров необходимы: расчетная оптимальная форма и размеры изделий, а также экспериментально подобранный минерально-зерновой состав шихты.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Стрелов К.К. Теоретические основы технологии огнеупорных материалов. М.1996г.-280 с.
2. Акишев А.Х., Бабин П.Н. , Зубков С.М. Влияние зернового состава шихты на структуру и свойства периклазовых огнеупоров. Огнеупоры №2. 1979г. С. 52-57.
3. Кащеев И.Д., Химическая технология огнеупоров. М.: Интермет Инжиниринг, 2007.-752с.
4. Бабин П.Н., Акишев А.Х. и др. Спекание MgO с добавками ZrO<sub>2</sub> и Y<sub>2</sub>O<sub>2</sub> КИМС, №7, 1979г., С. 54-59.
5. Якушев В.К. Процессы разрушения футеровок тепловых агрегатов. –Алма-Ата: Наука, 1997 г.

#### **REFERENCES**

1. Strellov K.K. Teoreticheskie osnovy technologii ogneupornykh materialov. M.1996. – 280s.
2. Akishev A.H., Babin P.N., Zubkov S.M. Vliyeniye zernovogo sostava shihty na strukturu i svoystva periklazovykh ogneuporov. Ogneupory №2. 1979g. S. 52-57.
3. Kasheev I.D. Himicheskaya technologiya ogneuporov M.: Internet Inginiring, 2007. - 752s.
4. Babin P.N., Akishev A.H. I dr. Spekanie MgO s dobavkami ZrO<sub>2</sub> и Y<sub>2</sub>O<sub>2</sub> KIMS, №7, 1979 g., S. 54-59.
5. Yakushev V.K. Prozessy razrusheniya futerovok teplovykh agregatov. Prozessy razrusheniya futerovok teplovykh agregatov. –Alma-Ata: Nauka, 1997 .

## **ОТҚА ТӨЗІМДІ БҰЙЫМДАРДЫҢ ТЕРМОТҰРАҚТЫЛЫҒЫ МЕН ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ КЕРНЕУІ**

Торгаев А.А., Дуйсенбек Ж.А.

НАО «Алматы энергетика және байланыс университеті», г. Алматы, Казахстан

**Түйіндеме.** Мақалада периклаз-хромитті және периклазды отқа төзімді бұйымдардың зерттеу нәтижелері келтіріліп, жылытылған материал денесіндегі термопараның температуралы-кернеулік күйі анықталынды. Шихта дән өлшемдерінің өсуіне және жұмыс бетінің кішіреюіне қарай отқа төзімді бұйымдардың тұрақтылығы артады. Жоғары жылу ағынының беттік қабатты сезуі дән өлшемінің ұлғаюы кезінде және материалдың жылу өткізгіштігі мен дән аралық жанасу жақсы болғанда жақсарады.

**Негізгі сөздер:** отқатөзімді материалдар, шихта, химиялық тұрақтылық, жылулық агрегаттар, форсункалар, шығатын газдар, футеровка беті.

## **THERMAL STRESSES AND THERMAL STABILITY OF REFRACTORY PRODUCTS**

Torgayev A.A., Duissenbek Zh.S.

**Summary.** The results of the study of periclase and periclase-chromite refractories with the definition of temperature-stressed state with a large number of thermocouples in the body of the heated material are given. Resistance increases with refractory grain size of the charge and the reduction of the working surface. The susceptibility of the body surface high heat flow is improved by increasing the grain size, intergranular contact resistance and good thermal conductivity.

**Key words:** Refractory materials, charge, chemical resistance, thermal units, injectors, exhaust gases, the surface linings.

## **ТЕМПЕРАТУРНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ И ТЕРМОСТОЙКОСТЬ ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ**

**Аннотация.** В статье приведены результаты исследования периклазо-хромитовых и периклазовых огнеупорных изделий с определением температурно-напряженного состояния с использованием большого количества термопар в теле нагретого материала. Стойкость огнеупоров повышается с увеличением размера зерен шихты и уменьшением рабочей поверхности. Восприимчивость поверхностью тела высокого теплового потока улучшается при увеличении размера зерна, контактной межзерновой прочности и хорошей теплопроводности материала.

**Ключевые слова:** Огнеупорные материалы, шихта, химическая стойкость, тепловые агрегаты, форсунки, отходящие.

УДК 536.248.2

А.А. Генбач, Н.О. Джаманкулова

Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, Республика Казахстан

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОФОРСИРОВАННОГО ПОРИСТОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

**Аннотация.** Пористый теплообменник относится к промышленным высокофорсированным огнетехническим установкам. Предложенная капиллярно-пористая система охлаждения кессонов повышает надежность работы агрегатов, интенсифицирует теплопередачу в пористой системе, обеспечивает взрывобезопасность работы высокофорсированных огнетехнических установок. Экспериментально установлен вид пористой структуры  $2 \times 0,55$ , что увеличило в шесть раз теплопередающую способность системы охлаждения. Механизм теплообмена изучался с привлечением голографической интерференции и скоростной киносъемки. Дано сравнение исследованной системы с тепловыми трубами и тонкопленочными испарителями. Применение сеток с крупными ячейками упрощает требования к охлаждающей жидкости.

**Ключевые слова:** капиллярно-пористая структура, пористый теплообменник, испарительная системы охлаждения.

Пористый теплообменник относится к промышленным высокофорсированным огнетехническим установкам, в частности, для охлаждения элементов металлургических печей.

На современных промышленных огнетехнических установках для увеличения удельной технологической производительности агрегата, снижения капитальных и эксплуатационных расходов имеют место высокие плотности тепловыделений, однако при этом сокращается длительность их эксплуатации. Устранить указанное противоречие позволяет правильно организованный способ охлаждения теплонапряженных элементов.

Из известных способов охлаждения наиболее перспективным является испарительное охлаждение [1], заключающееся в том, что холодная охлаждающая вода заменена кипящей, с получением пара утилизированного на различные нужды.

Испарительная система охлаждения обладает высокими технико-экономическими показателями: сокращается расход охлаждающей воды увеличивает срок службы охлаждаемых деталей, исключает охладительные устройства, водоводы больших диаметров, мощные насыпные станции, уменьшает капиталовложения.

Недостатками указанного способа являются: опасность разрушения печи от взрыва в случае попадания кипящей жидкости в расплав; возможность наступления кризисных явлений (переход от пузырькового кипения к пленочному) при переменных нагрузках, сопровождающихся тяжелыми условиями работы охлаждаемого элемента, вплоть до его прогара.

Теплообменник предназначен для обеспечения взрывобезопасности, надежности и самоприспособляемости охлаждаемой системы к переменным тепловым нагрузкам.

В способе охлаждения элементов высокофорсированных огнетехнических установок, со стороны отвода тепловых потоков, включающий отвод пара в сепарационный узел, охлаждение элементов установок (кессонов) производят капиллярно-пористой системой, питающейся от внешней системы охлаждения жидкостью.

Капиллярно-пористая система охлаждения обладает способностью к самонастройке за счет капиллярных сил и содержит весьма малое количество жидкости, что исключает

опасность взрыва при прогаре охлаждаемого элемента, повышая надежность его работы, а, следовательно, и всего агрегата.

Например, если подведенный удельный тепловой поток  $q_n$  окажется выше теплового потока  $q_o$ , отводимого от системы, то это приведет к заглублению жидкости в капиллярно-пористой структуре, уменьшению радиуса мениска жидкости и возрастанию капиллярного давления. В этом случае возрастает расход подпитывающей жидкости до установления динамического равновесия. При снижении тепловой нагрузки  $q_n$  толщина жидкости в капиллярах  $a$ , следовательно, и радиус мениска жидкости увеличится. Капиллярные силы начнут уменьшаться, сокращая подачу жидкости до равновесного состояния.

Пористый теплообменник содержит охлаждаемый элемент (кессон), на внутренней поверхности которого со стороны отвода тепловых потоков устанавливается тело с капиллярно-пористой структурой, плотный контакт которого со стенкой охлаждаемого элемента обеспечивают, например, вставкой с пружинящим элементом, соединяют с внешними узлами питания охлаждающей жидкости и отвода пара (рис. 1).

Устройство выполнено в виде кессона 1, к внутренней поверхности которого со стороны отвода тепла прилегает тело, имеющее капиллярно-пористую структуру 2, соединенное с внешними узлами питания 3, прижимаемое вставкой 4 с пружинящим элементом 5, парового канала 6 и тепловой изоляции 7. К наружной стенке кессона 1 в процессе работы установки прилегает пленка гарниссажа 8, омываемая расплавом 9.

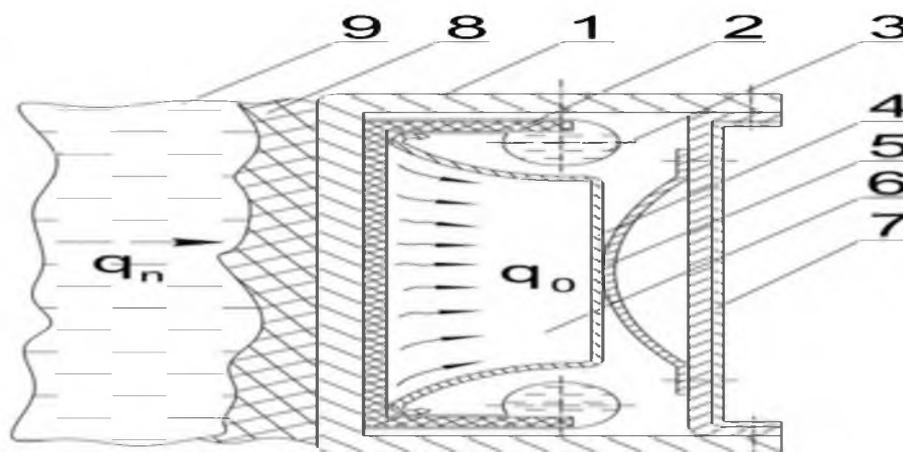


Рисунок 1- Высокофорсированный пористый теплообменник

Тепловой поток плотностью  $q_n$ , подводимый от расплава 9, проходя через гарниссаж 8 и стенку кессона 1 воспринимается жидкостью, насыщающей капиллярно-пористое тело 2, плотный контакт которого с внутренней стенкой кессона 1 со стороны отвода тепла, обеспечивают вставкой 4 с пружинящим элементом 5. Кроме того, капиллярно-пористое тело может быть спеченным (скленным или приваренным) со стенкой кессона 1. Если в данный момент времени удельный тепловой поток  $q_n$  окажется выше теплового потока, отводимого от системы  $q_o$ , то жидкость будет испаряться больше, чем подводится от внешнего узла питания 3. Это приведет к заглублению жидкости в капиллярно-пористой структуре 2, уменьшению радиуса мениска жидкости и возрастанию капиллярного давления. Следовательно, расход жидкости через поперечное сечение структуры 2 увеличится до установления равновесия. Такое положение остается справедливым до достижения значений максимально возможного удельного теплового потока.

Если же отводимый тепловой поток  $q_o$  будет превышать величину подведенного теплового потока  $q_n$ , толщина жидкости в капиллярах,  $a$ , следовательно, и радиус мениска

жидкости увеличатся. Капиллярные силы начнут уменьшаться, сокращая подачу жидкости до установления динамического равновесия.

Внешний узел питания 3 представляет собой две самостоятельные подводящие линии. Устройство работоспособно и при работе одной из них. Дублирование повышает устойчивость и производительность капиллярно-пористой системы и надежность установки. Образующийся пар по каналу 6 отводится в сепарационный узел.

В капиллярно-пористой системе 2 содержится весьма малое количество жидкости, что исключает опасность взрыва в случае прогорания элемента охлаждения и тем самым повышает надежность работы установки, увеличивая длительность кампании, а способность самонастраиваться за счет капиллярных сил делает систему мобильной к переменным тепловым нагрузкам. Тепло получаемого пара, как в обычных схемах, может утилизироваться. Для снижения тепловых потерь в окружающую среду наружные стенки кессона 1 покрываются тепловой изоляцией 7.

Таким образом, теплообменник обеспечивает взрывобезопасность за счет весьма малого количества жидкости в капиллярно-пористой системе охлаждения, повышает надежность установок, увеличивает длительность их рабочей кампании, а способность самонастраиваться за счет капиллярных сил делает систему охлаждения мобильной к переменным тепловым нагрузкам в широких пределах, а также надежной в работе.

Предлагаемая высокофорсированная система охлаждения по технико-экономическим показателям не уступает испарительной системе охлаждения, однако превосходит ее по условиям безопасности.

Для исследования теплопередающих возможностей капиллярно-пористых структур проводились опыты для структур, которые собирались из металлических сеток из нержавеющей стали марки 12X18H10T (ГОСТ 12184-66) с различными размерами ячеек (Табл.1). Минимальный размер ячейки составлял  $0,08 \times 10^{-3}$  м, поскольку сетки с меньшими размерами не позволяют организовать развитого пузырькового кипения, закупориваются паровыми пузырями. Наибольший размер ячейки выбирался  $1 \times 10^{-3}$  м, т.к. при больших размерах ячеек величина капиллярного потенциала близка к нулю, что приводит к неравномерному распределению жидкости по порам структуры. Кризис кипения определялся по пережогу стенки. Явление кризиса изучалось оптическими методами с привлечением голографической интерферометрии и скоростной киносъемки камерой СКС -1М. Сетчатые структуры формировались из нескольких слоев сеток [2].

Наилучшие результаты достигнуты для капиллярно-пористой структуры вида  $2 \times 0,55$ , которая позволяет отводить наибольшие тепловые потоки при комбинированном действии массовых и капиллярных сил. Структура, составленная из одного слоя сетки  $0,55 \times 10^{-3}$  м, образует менее устойчивую пленку жидкости на поверхности, а в случае, когда число сеток равно более двух, существенно возрастает перегрев стенки относительно температуры пара, что приводит к более раннему наступлению кризисных явлений. Кроме того, повышенный размер ячеек не требует высокой степени очистки, как это имеет место в тепловых трубах и тонкопленочных испарителях [3].

Пережог стенки в тепловых трубах происходит в связи с закупоркой паровыми пузырями ячеек сеток, что прекращает приток свежих порций жидкости к обогреваемой поверхности трубы. Если стенка трубы не содержит капиллярно-пористых покрытий, а охлаждение производится пароводяной смесью, когда на стенке образуется тонкая пленка жидкости, то при тепловых потоках около  $1 \times 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> наблюдается распад пленки жидкости на отдельные струи и капли, что приводит к пережогу стенки. Жидкость из ядра движущегося пароводяного потока не подтекает к обогреваемой поверхности трубы, на внутренней поверхности которой образуется сплошная паровая пленка, резко ухудшается интенсивность теплопередачи, в стенке трубы возникают циклические резкопеременные

температурные напряжения, перекосы температур, что существенно ухудшает условия работы поверхностей нагрева вплоть до их разрушения [4].

Таблица 1 - Теплопередающие возможности исследованных капиллярно-пористых структур, тепловых труб и тонкопленочных испарителей.

Вид капиллярно-пористой сетчатой структуры	Тепловая нагрузка, $\times 10^4$ Вт/м <sup>2</sup>					
	2	4	10	20	40	60
Предлагаемые структуры						
0,08×0,14×0,14	5,2	13,4	20,5	37,1	50	Пережог стенки
0,55	6,5	16,4	22,7	53,3	61	Пережог стенки
2×0,55	7,4	18,2	23,4	50,3	57	Пережог стенки
2×1	8,1	19,3	24,7	55,6	62,4	Пережог стенки
Тепловые трубы						
0,08×0,14×0,14	2,5	10	40	Пережог стенки		
2×0,55	Не работоспособны					
Тонкопленочные испарители (без капиллярно-пористой структуры)						
-	3,7	5,7	8	Пережог стенки		

Исследованная капиллярно-пористая сетчатая структура вида 2×0,55 отводит наибольшие тепловые потоки за счет совместного действия капиллярных и массовых сил в объеме структуры, что облегчает разрушение паровых конгломератов в порах. Визуализация процесса показала на существование в структуре ячеек питания холодными порциями жидкости, устремляющимися к зонам отрывающихся и разрушающихся паровых пузырей. Происходит турбулизация двухфазного кипящего устойчивого пульсирующего пограничного слоя. Наличие во внутренней полости канала, направляющих перегородок способствует дополнительному притоку жидкости к поверхности структуры за счет действия на ядро потока центробежных сил при огибании им поперечных пористых перегородок [5].

### Заключение

Предлагаемый теплообменник с капиллярно-пористой структурой позволяет в шесть раз расширить пределы отвода тепловых потоков по сравнению с такими эффективными теплообменниками как тепловые трубы и тонкопленочные испарители, т.е. в шесть раз уменьшить теплообменную поверхность, а при заданной поверхности увеличить надежность и срок службы, стабилизировать температурное поле в стенке трубы, тем самым облегчить условия работы поверхности нагрева в ядре пламени горящих пылеугольных частиц. Применение сеток с крупными ячейками упрощает требования к охлаждающей жидкости, в качестве которой может применяться питательная вода котельных агрегатов. В случае необходимости такие сетки легко промываются от возможных солевых отложений и загрязнений, даже в процессе эксплуатации котла.

### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Андоньев С.М., Крушель Г.Е. А. с. № 70344. Бюлл. изобр., 1958, № 11, с. 31.  
 [2] Поляев В.М., Генбач А.А. Теплообмен в пористой системе, работающей при совместном действии капиллярных и гравитационных сил // Теплоэнергетика. – 1993.–№7. – С. 55-58.  
 [3] Polyayev V., Genbach A. Control of Heat Transfer in a Porous Cooling System // Second world conference on experimental heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics. – 1991. – Dubrovnik, Yugoslavia, 23-28 June. – P. 639-644.

[4] Поляев В.М., Генбач А.А. Управление теплообменом в пористых структурах // Известия Российской академии наук. Энергетика и транспорт. – 1992. Т.38, №6. – С. 105-110.

[5] Генбач А.А., Джаманкулова Н.О. Модель и механизм развития паровой фазы в пористых структурах теплообменников // «Вестник НАН РК» - 2017. - №6 (370).- С. 85-92.

#### REFERENCES

[1] Andon'ev S.M., Krushel G.E. А. с. № 70344. Bull. Izobr., 1958, № 11, P. 31.(Rus)

[2] Polyayev V.M., Genbach A.A. Heat transfer in a porous system operating under the joint action of capillary and gravitational forces, Thermal Engineering, 7 (1993), pp. 55-58. (Rus)

[3] Polyayev V.M., Genbach A.A. Control of Heat Transfer in a Porous Cooling System, Second world conference on experimental heat transfer, fluid mechanics and thermodynamics. 1991, Dubrovnik, Yugoslavia, 23-28 June, pp. 639-644. (Eng)

[4] Polyayev V.M., Genbach A.A. Upravlenie teploobmenom v poristyh strukturah, Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Energy and transport. 1992, V. 38, №6, pp. 105-110. (Rus)

[5] Genbach A.A., Jamankulova N.O. Model i mechanism razvitiya parovoy phazy v poristyh strukturah teploobmennikov.Vestnik KazNTU, Almaty, 2017, № 6 (370), pp. 85-92. (Rus)

### **Жоғары жеделдетілген кеуектік жылу алмастырғышты зерттеу**

**А.А.Генбач, Н.О.Джаманкулова**

Алматы энергетика және байланыс университеты, Қазақстан Республикасы, Алматы

**Андатпа.** Ұсынып отырылған кессондарды салқындатудың капиллярлық-кеуектік жүйесі агрегаттардың жұмыс істеу сенімділігін арттырады, кеуектік жүйеде жылу өткізуді тездетеді, жоғары жеделдетілгеноттық технологиялық қондырғыларда қопарылыс қауіпсіздігін қамтамасыз етеді. Жылулық құбырлар, жұқа қабатты буландырғыштар сияқты тиімді жылу алмастырғыштармен салыстырғанда, жылу ағындарын алып кету шектерін кеңейтуге мүмкіндік беретін капиллярлық-кеуектік құрылымды жылу алмастырғыш қарастырылады. Эксперимент жүзінде кеуектік құрылымның  $2 \times 0,55$  түрі тағайындалды. Бұл салқындату жүйесінің жылу өткізу қабілетін алты есе арттырды. Жылу алмасу механизмі голографиялық интерференция және жылдамдықтық кинотүсірілім әдістерін қолдану арқылы зерттелді. Зерттелген жүйені жылулық құбырлар мен жұқа қабатты буландырғыштармен салыстыру мәліметтері келтірілген. Ірі ячейкалы торларды қолдану салқындатушы сұйыққа қойылатын талаптарды қапайымдатады.

**Тірек сөздер:** капиллярлық-кеуектік құрылым; кеуектік жылу алмастырғыш; салқындату жүйесі

#### **STUDY OF HEAT EXCHANGER WITH A POROUS STRUCTURE**

**A.A. Genbach, N.O. Jamankulova**

Almaty University of Power Engineering & Telecommunications,  
Almaty, Republic of Kazakhstan

**Abstract.** Porous heat exchanger refers to highly forced, technical industrial installations. Proposed capillary-porous system for cooling of caissons improves the reliability of the devices, intensifies the heat transfer in a porous system and provides explosion safety of highly forced technical installations operation. The type of porous structure ( $2 \times 0,55$ ) is experimentally defined and has increased to six times the heat transfer capacity of the cooling system. Heat transfer mechanism has been studied with the assistance of holographic interference and high-speed filming. A comparison of the studied system with heat pipes and thin-film evaporators is given. The use of nets with large cells simplifies the requirements for cooling liquid.

**Key words:** capillary-porous structure; porous heat exchanger; evaporative cooling system

МРНТИ 621.575

**С.К.Абильдинова<sup>1</sup>, Р.А.Мусабеков<sup>1</sup>, А.С.Расмухаметова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Алматинский университет энергетики и связи, Алматы, Казахстан

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ПАРОКОМПРЕССИОННЫХ ТЕПЛОВЫХ НАСОСОВ СО СТУПЕНЧАТЫМ СЖАТИЕМ**

**Аннотация.** Современные разработки по внедрению теплонасосной техники направлены на увеличение выпуска и модернизацию тепловых насосов, использующих экологически безопасные рабочие агенты (хладагенты). Перспективными являются теплонасосные установки со ступенчатым сжатием, реализующие термодинамический цикл с переохлаждением жидкого хладагента и регенерацией ее пара на входе в компрессор теплового насоса. На основе опытных данных и сравнительных расчетов термодинамического цикла теплового насоса, протекающего по различным принципиальным схемам, доказана эффективность работы, характеризующаяся высоким коэффициентом преобразования теплоты и эксергетическим КПД. Переохлаждение горячего хладагента частично решает проблему полезного теплоиспользования в тепловом насосе и уменьшает потери теплоты при горячем дросселировании жидкого хладагента.

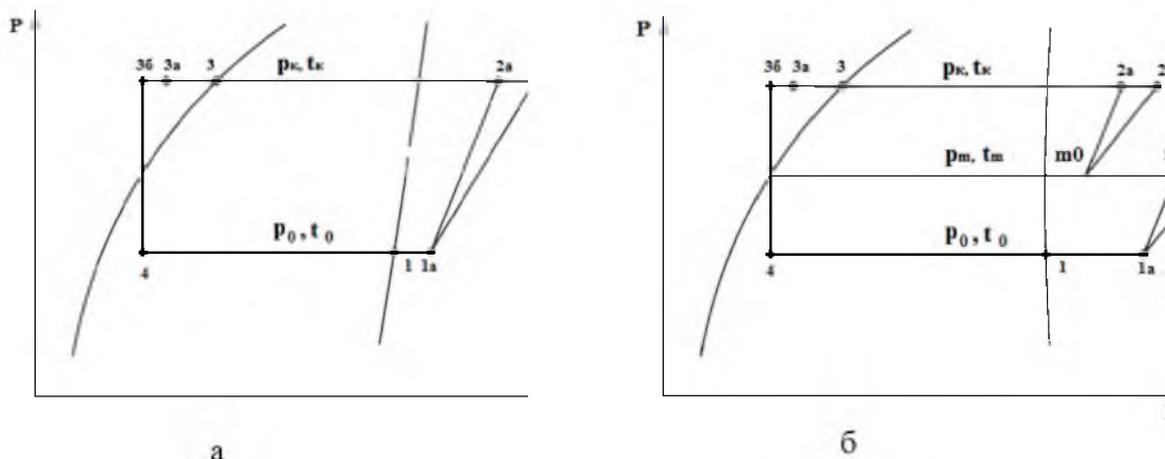
**Ключевые слова:** пароконденсационный тепловой насос, коэффициент преобразования тепла, потенциал глобального потепления; ступенчатое сжатие, хладагент, регенерация, термодинамический цикл, теплообменник, конденсатор, испаритель.

Использование теплового насоса ТН в целях отопления, горячего водоснабжения и кондиционирования является альтернативой другим традиционным способам таким, как центральное водяное отопление, электрообогрев, вентиляция и др. Несмотря на то, что возможность использования обратного термодинамического цикла Карно в отопительных и охлаждающих устройствах была выявлена достаточно давно, тепловые насосы получили широкое распространение только в последнее время [1].

Мировые тенденции в области разработки и внедрения теплонасосной техники направлены на увеличение выпуска и модернизацию существующих тепловых насосов. В настоящее время экологически обосновано применение хладагентов только с нулевым значением потенциала истощения озонового слоя относительно фтортрихлорметана ( $ODP = 0$ ), а также с минимальными значениями потенциалов глобального потепления относительно диоксида углерода ( $GWP$ ) и фтортрихлорметана ( $HGWP$ ).

Перспективными являются теплонасосные установки со ступенчатым сжатием, а также последовательной и каскадной схемами включения ТНУ. Последовательная и каскадная схемы включения ТНУ на озонобезопасных хладагентах рассмотрены в работе [2]. В работе [3] указывается на перспективность создания теплонасосных установок с двухступенчатым сжатием.

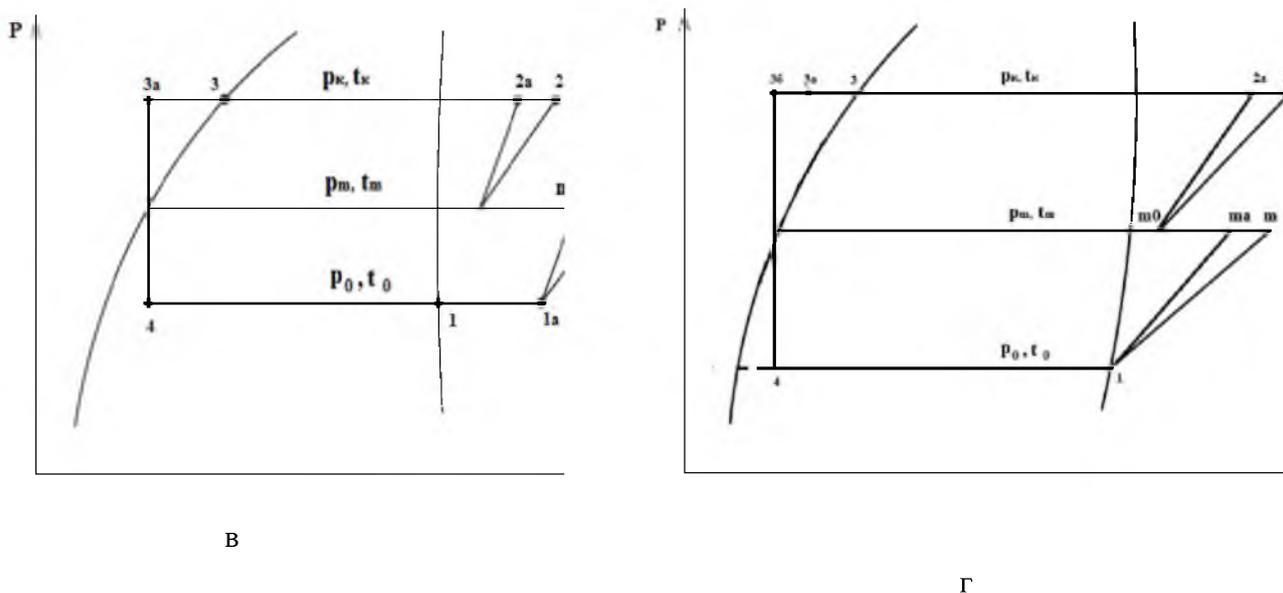
Для исследования эффективности циклов пароконденсационных тепловых насосов ПКТН со ступенчатым сжатием проведен сравнительный анализ для следующих схем термодинамического цикла (рисунки 1, 2):



а- схема №1; б - схема №2

Рисунок 1 – Термодинамические циклы ПКТН в p-I диаграмме

- одноступенчатое сжатие рабочего агента с однократным дросселированием и полным промежуточным охлаждением (схема №1);
- двухступенчатое сжатие рабочего агента с однократным дросселированием, регенерацией пара и с переохлаждением (схема №2);



в- схема №3; г- схема №4

Рисунок 2 – Термодинамические циклы ПКТН в p-I диаграмме

- двухступенчатое сжатие рабочего агента с однократным дросселированием, регенерацией пара и без переохлаждением (схема №3);
- двухступенчатое сжатие рабочего агента с однократным дросселированием, без регенерации и полным промежуточным охлаждения (схема №4);

В качестве рабочего агента теплового насоса рассмотрены озонобезопасные неазеотропные хладагенты (фреоны) R134a и R600a [4,5].

Термодинамический цикл ТН со ступенчатым сжатием показан на рисунке 3, который осуществляется по принципиальным схемам ПКТН (схемы №1-№4).

Схема расчета представлена на примере парокомпрессионного теплового насоса Altal 26 UA производства ООО «ТеплоСпектр-М», установленного в учебно-исследовательской лаборатории МЭИ, конструкция которого содержит все элементы принципиальной схемы, представленной на рисунке 2. Он предназначен для обеспечения широкого круга потребителей экологически чистым теплом для нужд отопления и ГВС с использованием низкопотенциального тепла грунта с температурой  $+5\pm 10^\circ\text{C}$ . Расчет термодинамического цикла ТН по схеме №1 основан на реальном эксперименте с тепловым насосом Altal 26 UA, а расчеты по схемам №2-4 перенесены на модель такого же теплового насоса, осуществляющего двухступенчатое сжатие паров рабочего агента.

Парокомпрессионный тепловой насос (ПКТН) грунтовой ALTAL GWHP26H используется в качестве источника тепла автономных систем отопления, кондиционирования, горячего водоснабжения.

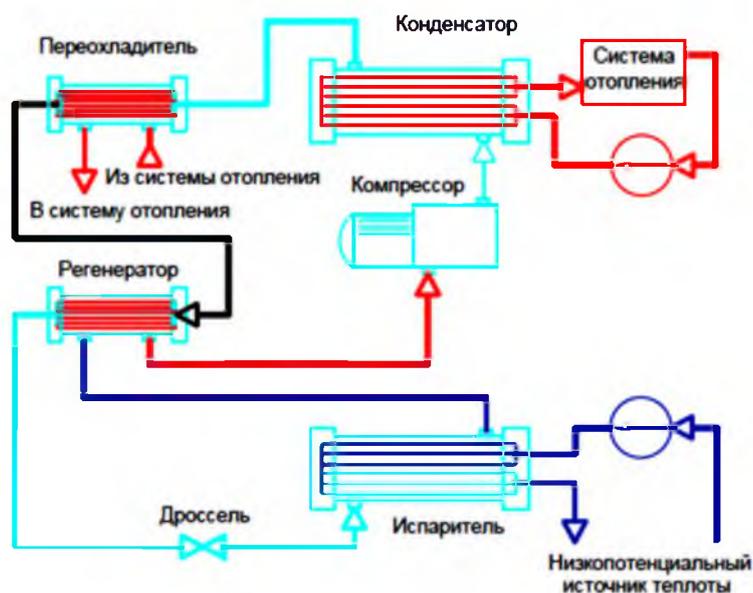


Рисунок 3.- Принципиальная схема ПКТН Altal 26 UA

- тепловая нагрузка теплового насоса  $Q_{\text{тн}} = 24,2 \text{ кВт}$ ,
- температура низкопотенциального теплоносителя (грунт) на входе в тепловой насос  $t_{\text{н1}} = 8^\circ\text{C}$ ;
- температура низкопотенциального теплоносителя (грунт) после теплового насоса  $t_{\text{н2}} = -2^\circ\text{C}$ ;
- температура высокопотенциального теплоносителя (горячей воды) на входе в тепловой насос  $t_{\text{в1}} = 40^\circ\text{C}$ ;
- температура горячей воды после теплового насоса  $t_{\text{в2}} = 60^\circ\text{C}$ ;
- температура окружающей среды  $t_0 = -19^\circ\text{C}$ ;
- перепады температуры на выходе из теплообменников: испарителя  $\Delta t_{\text{исп}} = 5^\circ\text{C}$ , конденсатора  $\Delta t_{\text{к}} = 10^\circ\text{C}$ ; переохладителя  $\Delta t_{\text{по}} = 5^\circ\text{C}$ .
- температура перегрева пара в промежуточном теплообменнике  $\Delta t_{\text{п}} = 20^\circ\text{C}$ .

Измеренные энергетические характеристики кругового процесса в тепловом насосе позволили определить энергетические параметры его работы, представленные в таблице 1.

Удельная внутренняя работа компрессора  $l_{\text{км}}$  по сжатию паров хладагента при одноступенчатом и двухступенчатом сжатии рабочего агента [6]:

$$l_{\text{км}}^{\text{см}} = h_2 - h_{1a}, \text{ кДж/кг} \quad (1)$$

$$l^{2cm}_a = (h_m - h_{1a}) + (h_2 - h_{m0}), \text{ кДж/кг} \quad (2)$$

Удельный расход теплоты на единицу расхода рабочего тела:

$$\text{в испарителе} \quad q_{II} = h_1 - h_4, \text{ кДж/кг}, \quad (3)$$

$$\text{в конденсаторе} \quad q_{II} = h_2 - h_3, \text{ кДж/кг}. \quad (4)$$

Удельная тепловая нагрузка переохладителя горячего:

$$q_{IIO} = h_3 - h_{3a}, \text{ кДж/кг}. \quad (5)$$

Удельная тепловая нагрузка промежуточного теплообменника ТО :

$$q_{IIIO} = h_1 - h_{1a}, \text{ кДж/кг}. \quad (6)$$

Удельный расход электроэнергии на единицу выработанного тепла

$$\varepsilon_{TH} = \frac{l_{км}}{q_k}.$$

Коэффициент преобразования теплоты тепловым насосом ТН, где  $q_{TH} = q_k + q_{IIO}$  :

$$\mu = \frac{q_{TH}}{l_{км}} \quad (7)$$

Промежуточное давление сжатия определяется по формуле

$$P_m = \sqrt{P_k \cdot P_0}, \quad (8)$$

где  $P_0 = 0,20060$  МПа - начальное давление рабочего вещества (фреона R-134a) перед компрессором;

$P_k = 2,1168$  Мпа - конечное давление рабочего вещества после компрессора.

Расчетное значение  $P_m = 0,6516$  МПа, температура паров фреона соответствующая этому давлению  $t_m = 25^{\circ}\text{C}$ .

Показатели энергетической эффективности рассчитанных вариантов приведены в таблице 1.

Таблица 1.- Результаты расчета термодинамических циклов

Показатель	ПКТН (схема №1)	ПКТН (схема №2)	ПКТН (схема №3)	ПКТН (схема №4)	ПКТН (схема №1)	ПКТН (схема №2)	ПКТН (схема №3)	ПКТН (схема №4)
Хладагент	R134a	R134a	R134a	R134a	R600a	R600a	R600a	R600a
Удельная тепловая нагрузка ТН $q_{TH}$	235,28	195,73	153,85	185,74	335,28	395,73	353,85	285,74
Степень сжатия, z	10,55	3,25	3,25	3,25	10,56	4,03	4,03	4,03
Коэфф. преобразо- вания теплоты $\mu$	2,85	3,4	2,68	3,15	3,56	3,68	3,15	3,32
Коэфф. преобразо- вания электроэнер- гии $\mu_e$	1,96	2,33	1,83	2,16	2,78	2,75	2,43	2,28
Удельный расход	1,2	1,01	1,28	1,09	1,3	1,08	1,35	1,16

первичной энергии ПЭ								
Эксергетический КПД $\eta_e$	0,45	0,52	0,36	0,49	0,46	0,54	0,38	0,49

Наилучшим вариантом из рассмотренных схем термодинамического цикла считается тот, который имеет наибольший коэффициент преобразования теплоты  $\mu$ , который обеспечивает наименьшую степень сжатия и наибольшие эксергетический КПД  $\eta_e$ , и удельную тепловую нагрузку  $q_{тн}$ . В данном случае эффективные энергетические параметры имеет схема №2, реализующая двухступенчатый термодинамический цикл с регенерацией теплоты парарабочего агента, с однократным дросселированием и переохлаждением. Удельная теплопроизводительность при двухступенчатом тепловом насосе уменьшилась до  $q_{тн}=195,7$  кДж/кг, но увеличился коэффициент преобразования теплоты от  $\mu=2,92$  до  $\mu=3,4$  по сравнению с одноступенчатым циклом за счет уменьшения суммарной работы сжатия в ступенях компрессора  $l_{км} = l_{см}^1 + l_{см}^2$ . Аналогичные качественные и количественные изменения энергетических показателей теплового насоса наблюдаются и в расчетах с рабочим агентом R-600a (табл. 1).

Повышение термодинамической эффективности теплового насоса при рассмотрении двухступенчатого термодинамического цикла обусловлено минимальными потерями при так называемом «горячем дросселировании». Горячее дросселирование определяется невозможностью полного полезного использования тепла охлаждения конденсата хладагента перед процессом его дросселирования. В двухступенчатом тепловом насосе с переохлаждением горячего хладагента частично решается проблема полезного теплоиспользования величиной  $q_{по}$ . Полезно использованное тепло  $q_{по}$  частично покрывает потери тепла, которые имели при полном однократном дросселировании.

Регенерация пара рабочего агента на выходе из испарителя за счет использования регенеративного теплообменника дает также дополнительный эффект по минимизации термодинамических потерь и повышению эффективности циклов ПКТН в условиях больших перепадов температур в испарителе и конденсаторе. В данном случае эта разность температур составляет  $-(T_k - T_0) = 80^\circ\text{C}$ .

На рынке Казахстана предлагаются разнообразные схемы теплонасоных установок для различных областей применения, ориентированные чаще всего на мягкие природно-климатические условия и работающие при малых перепадах температур в испарителе и конденсаторе. Как полноценные теплоисточники эти тепловые насосы применяться не могут, поскольку обеспечивают потребности низкотемпературных систем отопления и кондиционирования (до  $45^\circ\text{C}$ ).

При использовании низкопотенциального тепла грунта тепловой насос также покрывает теплотраты низкотемпературной системы отопления [7]. При этом типовое решение остается стандартным «ТН + электронагреватель доводчик + тепловой аккумулятор» [8]. Фактически реализуется холодильный цикл в узком диапазоне температур испарения и конденсации рабочего хладагента. Для казахстанского резко континентального климата это невыгодно, так как разумный верхний уровень температур для локальных систем теплоснабжения в Казахстане составляет  $85^\circ\text{C}$  по оценке авторов работы [9], и  $65^\circ\text{C}$  согласно справочным данным [10]. Хотя существует и другое ограничение - до  $70^\circ\text{C}$  по причине термического разложения органической пыли на отопительных приборах [8]. При сопряжении ТН с системами теплоснабжения в мире и в России практически реализуются только два режима эксплуатации - отопление или горячее водоснабжение. Причем второй режим является более эффективным, т.к. при

этом минимальны дроссельные потери. Однако, его применение крайне ограничено. Другой проблемой является сезонная изменчивость температуры основных источников возобновляемого природного тепла: воздуха, грунта, воды поверхностных источников.

Работа теплонасосного оборудования должна производиться при большой разнице температур в испарителе и конденсаторе. В теплонасосной технике пока не решена до конца классическая проблема холодильных и теплонасосных циклов - проблема «горячего дросселирования», определяемая как невозможность полного полезного использования тепла охлаждения конденсата хладагента перед процессом его дросселирования. Для ее решения необходимо выйти за рамки известного опыта повышения эффективности ТНУ при работе в системах отопления.

Применение двухступенчатого сжатия заметно удорожает и усложняет конструкцию ТН. Кроме того, возникают потери давления РА при течении его по каналам промежуточного охладителя. Расчеты показывают, что высокотемпературные тепловые насосы на фреоне (R600a) могут обеспечить нагрев горячей воды до 95 °С, что полностью обеспечит нужды в отоплении и иметь коэффициент трансформации тепла до  $\mu = 3,5$  при большой разности температур в испарителе и конденсаторе.

### **Выводы**

1. Двухступенчатые тепловые насосы, осуществляющие термодинамический цикл с переохлаждением конденсата и регенерацией теплоты пара рабочего агента имеют самые эффективные энергетические параметры, что доказано на основе сравнения всевозможных схем реализаций кругового процесса преобразования тепла.

2. В двухступенчатом тепловом насосе с переохлаждением горячего хладагента частично решается проблема полезного теплоиспользования в переохладителе, который уменьшает потери тепла при полном однократном дросселировании.

3. Регенерация пара рабочего агента на выходе из испарителя за счет использования регенеративного теплообменника дает также дополнительный эффект по минимизации термодинамических потерь и повышению эффективности циклов ПКТН в условиях больших перепадов температур в испарителе и конденсаторе.

### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

[1] Елистратов С.Л. Накоряков В. Е. Энергетическая эффективность комбинированных отопительных установок на базе тепловых насосов с электроприводом. Промышленная энергетика, 2008.- №3, - С.28-33

[2] Редько А.А. Харлампиди Д.Х. Возможности использования двухступенчатых теплонасосных установок в системах геотермального теплоснабжения. Науковий вісник НГУ Украина, 2010. - № 4. - с. 101-106.

[3] Султангузин И.А., Албул А.В., Потапова А.А., Говорин А.В. Тепловые насосы для Российских городов. - Энергосбережение. 2011. №1. С.66-70.

[4] Calm J.M. The next generation of refrigerants – Historical review, consideration, and outlook // International Journal of Refrigeration. – 2008. - Vol. 31. - P. 1123-1133.

[5] Directive 2006/40/EC of The European Parliament and of the Council of 17 May 2006 relating to emissions from air-conditioning systems in motor vehicles and amending Council Directive 70/156/EC, 2006. Official Journal of the European Union. <http://tinyurl.com/lxw8nm>.

[6] Мезенцева Н.Н. Эффективность работы парокомпрессионных тепловых насосов на неазеотропных смесевых хладагентах. Теплофизика и аэромеханика, 2011, т. 18, № 2, с. 335–342.

[7] Семенов Б.А., Соловьев В.А. Эффективные схемы использования теплонасосных установок для автономного теплоснабжения // Проблемы энерго- и ресурсосбережения: сб. науч. тр. - Саратов: СГТУ, 2009. - С. 38-42

[8] Накопление тепловой энергии / MacCracken M. // АВОК. - 2004. - N 3. -С.78-82, 84.

[9] Калнинь И.М., Пустовалов С.Б., Савицкий И.К. и др. Первый в России тепловой насос на диоксиде углерода// Холодильная техника, №6, 2006. - с. 12-14

[10] Методика определения фактических потерь тепловой энергии через тепловую изоляцию трубопроводов водяных тепловых сетей систем централизованного теплоснабжения. - М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004.- 54 с.

#### REFERENCES

[1] Elistratov S.L. Nakoryakov V. Ye. Energy efficiency of combined heating installations based on heat pumps with electric drive. // Industrial Energy. 2008. № 3. P.28-33.

[2] Redko A.A. Harlampidi D.H. Possibilities of using two-stage heat pump plants in geothermal heat supply systems.//Scientific bulletin NMU of Ukraine. 2010. № 4. P.101-106.

[3] Sultanguzin I. A., Albul A.V., Potapova A.A., Govorin A.V. Heat pumps for Russian cities. // Energy saving. 2011. №1. P.66-70.

[4] Calm J.M. The next generation of refrigerants – Historical review, consideration, and outlook. // International Journal of Refrigeration. 2008. Vol. 31. P. 1123-1133.

[5] Directive 2006/40/EC of The European Parliament and of the Council of 17 May 2006 relating to emissions from air-conditioning systems in motor vehicles and amending Council Directive 70/156/EC, 2006. Official Journal of the European Union. <http://tinyurl.com/lxw8nm>.

[6] Mezentseva N.I. Efficiency of steam compression heat pumps on non-azeotropic mixture refrigerants. //Thermophysics and Aeromechanics. 2011. Vol.18. № 2.P. 335-342.

[7] Semenov V.A., Soloviev V.A. Effective schemes for the use of pump plants for autonomous heat supply. // Problems of Energy and Resource Saving. Sat. sci. tr. - Saratov: SSTU, 2009. P.38-42

[8] Accumulation of thermal energy // MacCracken M. // AVOC. 2004. № 3. P.78-84.

[9] Kalnin I.M., Pustovalov S.B, Savitsky I.K. The first heat pump in Russia on carbon dioxide. // Refrigeration technology. №6. 2006. P. 12-14.

[10] Method for determination of actual losses of thermal energy through thermal insulation of pipelines of water heating systems of district heating systems. - Moscow: Publ. NTS ENAS. 2004. 54 p.

**САТЫЛЫ СЫҒУДЫ ҚОЛДАНАТЫН БУ КОМПРЕССИЯЛЫҚ ЖЫЛУ  
СОҒЫЛАРЫНЫҢ ТЕРМОДИНАМИКАЛЫҚ ЖҰМЫС ТИІМДІЛІГІН ЗЕРТТЕУ**  
**С.К.Абильдинова<sup>1</sup>, Р.А.Мусабеков<sup>1</sup>, А.С.Расмухамедова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан

**Андатпа.** Жылусорғылар техникасын енгізуге бағытталған замануи жобалары, экологиялық тұрғыдан қауіпсіз жұмыстық агенттерді (хладагенттерді) қолданатын, жылу сорғыларын шығаруды арттыруға және жаңғыртуға бағытталған. Сатылы сығуды іске асырушы жылу сорғылары келешегі зор болып саналады. Мұндай жылу сорғылары сұйық хладагентті қайтадан салқындатып және оның буын компрессорға беруден бұрын қайтадан жаңғыртудан өткізеді. Тәжірибе нәтижелері және салыстырмалы есептеулерге негізделген жылу сорғысының термодинамикалық жұмыс айналымдарын әртүрлі сұлбалар бойынша қарастыру кезінде оның ең үлкен жылуды түрлендіру еселеуіші мен эксергетикалық ПӘГінің мәндеріне сәйкес жұмыс тиімділігі анықталды. Ыстық хладагентті қайтадан салқындату процесі жылу сорғысында жылуды пайдалы қолдану мәселесін ішінара шешеді және сұйық хладагенттің ыстық дросселденуі кезінде орын алатын жылудың ысырапталуын азайтады.

**Түйінді сөздер:**бу компрессиялық жылу сорғысы, жылуды түрлендіру еселеуіші, жаһанды жылулану, сатылы сығу, хладагент, жаңғырту, термодинамикалық айналым, жылуалмастырғыш, конденсатор, буландырғыш.

**THERMODYNAMIC EFFICIENCY OF HEAT PUMPS VAPOR COMPRESSION  
WITHIN STAGE COMPRESSION**

**S.K.Abildinova<sup>1</sup>, R.A.Musabekov<sup>1</sup>, A.S.Rasmukhametova<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan

**Abstract.** Modern developments in the introduction of heat pump technology are directed at increasing the production and modernization of heat pumps by using the ecological refrigerants. The main prospect is innovation in heat pumps with step compression that realize a thermodynamic cycle with supercooling of liquid refrigerant and regeneration of its vapor at the inlet to the compressor of the heat pump. The efficiency of operation is demonstrated, characterized by a high coefficient of heat conversion and exergy efficiency. This conclusion is based on the experimental data and comparative calculations of the thermodynamic cycle of the heat pump which proceeds various principle schemes. The supercooling of the hot coolant partially solves the problem of the beneficial use of heat in the heat pump and reduces heat losses during hot choking of the liquid refrigerant.

**Keywords:** steam compression heat pump, heat conversion coefficient, global warming potential; step compression, refrigerant, regeneration, thermodynamic cycle, heat exchanger, condenser, evaporator.

## **АВТОМАТИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

**МҒТАР 30.15.35; 55.03.41**

**Ж.Искаков**

Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан

### **КУБТЫҚ БЕЙСЫЗЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ БАР ТІК ҚАТАҢ ГИРОСКОПТЫҚ ТЕҢГЕРІЛМЕГЕН РОТОРДЫҢ РЕЗОНАНСТЫҚ ТЕРБЕЛІСТЕРІ**

**Андатпа.** Тірегiнiң кубтық бейсызық серпiмдiлiгi және кубтық бейсызық демпфирлеуi, табақшасының массасының теңгерiмсiздiгi бар тiк қатаң гироскоптық ротор қарастырылады. Ротордың қозғалысын сипаттау үшiн машинаның динамикалық моделi және Лагранждың екiншi тектi теңдеулерi түрiндегi қозғалыс теңдеулерi құрылды. Гармоникалық баланс әдiсiмен тербелiстiң бас гармоникасының амплитудасы мен фазасын және табысталатындық күшiнiң моментiнiң амплитудасын анықтайтын өрнектерi табылды. Сызықты және кубтық бейсызық демпфирлеу коэффициенттерiнiң әртүлi мәндерiнде амплитудалық жиiлiктiк сипаттаманы (АЖС-ны) және табысталатындық күшiнiң моментiнiң амплитудасының тербелiс жиiлiгiне тәуелдiлiгiн зерттеу нәтижелерiн талдау резонанстық жиiлiктен кем жиiлiктер облысында сызықты демпфирлеудiң де, кубтық бейсызық демпфирлеудiң де АЖС-ға еш әсерi болмайтындығын, резонанс облысында сызықты және кубтық бейсызық демпфирлеу бас гармониканың резонанстық шыңын едәуiр баса алатындығын, резонанстық жиiлiктен жоғары жиiлiктер облысында кубтық бейсызық демпфирлеудiң сызықты демпфирлеуден өзгешелiгi ротордың дiрiлiн сәл баса алатындығын көрсеттi. Зерттеулер нәтижелерi роторлық машиналардың дiрiлiн басу кезiнде қолданылатын пассивтi дiрiл оқшаулағыш жасауда табысты қолданылуы мүмкiн.

**Кiлттiк сөздер:** гироскоптық ротор, резонанстық амплитуда, сызықты демпфирлеу, бейсызық демпфирлеу.

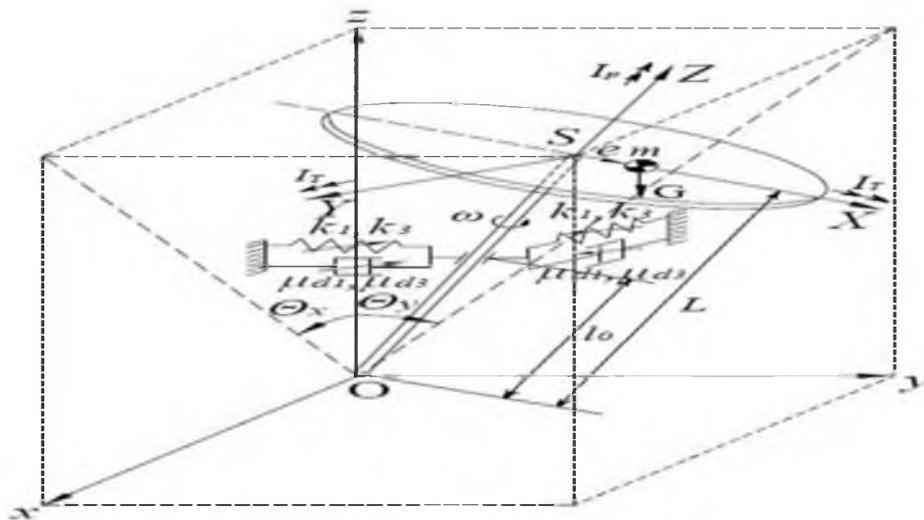
Роторлық машиналардың өнеркәсiптiң көптеген салаларында (электрэнергетика, тамақ, жеңiл, химия, мұнай, медицина, металлургия, ғарыш, ядролық және т.б.) кенiнен қолданылатындығы белгiлi және бұрыннан зерттелiп келедi. Бұған қарамастан шешiлмеген, атап айтсақ масса теңгерiлмегендiгiнiң роторық машиналардың тербелiсiне және орнықтылығына әсерiмен және ақырында қозғалысты тұрақтандырумен байланысты өзектi мәселелер аз емес.

Роторлық жүйенiң жинақталған параметрлерi бар оңайланған моделi салмақ түсетiн тiректердегi бiр ротордың бiлiгiнiң динамикасын зерттеу үшiн қолданылады. Тiректердiң материалының қасиеттерi мен сипаттамаларын теңгерiлмеген ротордың және дiрiлдегiш жүйелердiң қозғалысын орнықтыру мақсатында дiрiлдi өшiру және бәсеңдету үшiн қолдану өте маңызды. Тiректер ротор мен тiректiк құрылымның арасындағы жайластырғышты (құрылғыны) қосатын құрал болып табылады, олардың нақты болжамдардан тәуелдi әртүрлi пiшiндерi және құрылымдары болады. Мойынтiректердi сүйеу үшiн тұтқыр серпiмдi эластомерлiк тiректер өшудi енгiзудiң ыңғайлы тәсiлi. Пән және т.б.-дың мақаласында [1] сызықты және бейсызық дiрiлден қорғағыш жүйелердi зерттеулерге өте жақсы шолу келтiрiлген және тербелiстiң резонанстық және резонанстық емес аймақтарында сызықты және кубтық бейсызық бәсеңдетуi бар дiрiлден пассив қорғағыштың тиiмдiлiгi зерттеледi. Но және т.б.-дың жұмысында [2], зерттеулерде оқшаулағыштың өнiмдiлiгiне материалдың кубтық бейсызық қатаңдығының әсерi қосымша ескерiледi. Ж. Искаковтың жұмыстарында [3, 4, 5] квадраттық және кубтық бейсызық қатаңдықтары бар серпiмдi тiректегi тiк гироскоптық теңгерiлмеген ротордың резонанстық тербелiстерiне және орнықтылығына квадраттық бейсызық демпфирлеудiң әсерi зерттеледi. Фужиуара және т.б.-дың мақаласында [6] екi ұшынан шарлы

мойынтірекпен сүйелетін бір табакшалы ротордың тәжірибелік жүйесі даярланды және модельдеу мен тәжірибе жолымен серінпеден немесе жұқа резеңкелерден тұратын иілгіш тіректер мен қатан тірек базасы жағдайларындағы дірілдер салыстырылады.

Берілген жұмыста тік қатан гироскоптық тенгерілмеген ротордың бас резонанстық тербелістеріне мойынтіректің серпімді тірегінің сызықты және бейсызық бәсеңдетуінің әсері зерттеледі.

Ротордың 1 - суретте ұсынылған құрылымдық сұлбасы қарастырылады. Ұзындығы  $L$  білік төменгі топсалы (шарнирлі) және онан  $l_0$  қашықтықтағы жоғарғы серпімді тірек көмегімен тік орналастырылған. Біліктің бос ұшына массасы  $m$ , үйектік инерция моменті  $I_p$  және барлық бағыттар үшін бірдей көлденен инерция моменті  $I_T$  табакша бекітілген. Біліктің бұрыштық  $\omega$  жылдамдығы соншалықты үлкен, роторды білігінің төменгі тірегі жылжымайтын гироскоп деп қарастыруға болады. Табакшаның геометриялық  $S$  центрінің орны қозғалмайтын  $Oxyz$  координаталар жүйесінде  $x$ ,  $y$  координаталарымен, біліктің және ротордың толығымен кеңістіктегі орнын  $\theta_x$ ,  $\theta_y$  бұрыштарымен және бұрылу  $\varphi = \omega t$  бұрышымен анықталады. Мұнан әрі табакшаның  $m$  массалар центрінің координаталарын  $x_m$  және  $y_m$  арқылы белгілейміз. Сондай-ақ сызықты эксцентриситет  $e$  ротормен бірге айналатын  $SXYZ$  координаталар жүйесінің  $X$  өсі бойында жатады деп ұйғарайық. Ротордың өсінің аз ауытқуларымен шектелеміз, сондықтан есептеулерде  $e, \theta_x, \theta_y, x_m, y_m$  аз шамаларына қатысты тек сызықты мүшелерді ескереміз.



Сурет 1 –Ротордың геометриясы

Жоғарыда баяндалғанды ескеріп бұрыштық жылдамдықтың қозғалыстағы жүйенің координаталар өстеріндегі проекцияларын келесі түрде жазамыз

$$\omega_x = -\dot{\theta}_y + \omega\theta_x, \omega_y = \dot{\theta}_x - \omega\theta_y, \omega_z = \omega + \dot{\theta}_x\theta_y, \quad (1)$$

ал жүйенің кинетикалық энергиясын

$$T = \frac{1}{2}m(\dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2) + \frac{1}{2}(I_x\omega_x^2 + I_y\omega_y^2 + I_z\omega_z^2),$$

$I_x = I_y = I_T, I_z = I_p$  екендігін және (1) ескеріп

$$T = \frac{1}{2}m(\dot{x}_m^2 + \dot{y}_m^2) + \frac{1}{2}\{I_T[(\dot{\theta}_x^2 + \dot{\theta}_y^2) - 2\omega(\theta_x\dot{\theta}_y + \theta_y\dot{\theta}_x)] + I_p(\omega^2 + 2\omega\dot{\theta}_x\theta_y)\}, \quad (2)$$

түрінде аламыз, мұндағы

$$\begin{aligned}x_m &= x + e \cos \varphi = L \theta_x + e \cos \omega t, \\y_m &= y + e \sin \varphi = L \theta_y + e \sin \omega t.\end{aligned}\quad (3)$$

Жүйенің потенциалдық энергиясы

$$V = \frac{1}{2} k_1 l_0^2 (\theta_x^2 + \theta_y^2) + \frac{1}{4} k_3 l_0^3 (\theta_x^4 + \theta_y^4), \quad (4)$$

мұндағы  $k_1$  - тіректің материалының қатандық коэффициенті,  $k_3$  - тірек материалындағы серпімділік күшінің бейсызық мүшесіндегі коэффициент.

Сыртқы күштердің моменті

$$M_x = (L \theta_x + e \cos \omega t) G, M_y = (L \theta_y + e \sin \omega t) G, \quad (5)$$

мұндағы  $G = mg$  - табакшаның салмағы.

Мына түрде берілген диссипаттық күштерді ескереміз

$$\Phi = \frac{1}{2} \mu_{d1} (\dot{\theta}_x^2 + \dot{\theta}_y^2) + \frac{1}{4} \mu_{d3} (\dot{\theta}_x^4 + \dot{\theta}_y^4), \quad (6)$$

мұндағы  $\mu_{d1}$  - сызықты тұтқыр демпфирлеу коэффициенті;  $\mu_{d3}$  - кубтық бейсызық тұтқыр демпфирлеу коэффициенті.

Роторлық жүйе үшін Лагранждың екінші текті теңдеулерін ұсынамыз

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = - \frac{\partial \Phi}{\partial \dot{q}_i} + Q_i. \quad (7)$$

Бұл жерде  $q_i : \theta_x, \theta_y$  - жалпыланған координаталар;  $Q_i : M_x, M_y$  - жалпыланған күштер.

Ротордың қозғалыс теңдеулерін (2) – (6) өрнектерін (7)-ге қойып аламыз

$$\begin{aligned}(I_T + mL^2) \ddot{\theta}_x + I_P \omega \dot{\theta}_y + \mu_{d1} \dot{\theta}_x + \mu_{d3} \dot{\theta}_x^3 + (k_1 l_0^2 - GL) \theta_x + k_3 l_0^4 \theta_x^3 &= (m e \omega^2 L + Ge) \cos \omega t, \\(I_T + mL^2) \ddot{\theta}_y - I_P \omega \dot{\theta}_x + \mu_{d1} \dot{\theta}_y + \mu_{d3} \dot{\theta}_y^3 + (k_1 l_0^2 - GL) \theta_y + k_3 l_0^4 \theta_y^3 &= (m e \omega^2 L + Ge) \sin \omega t,\end{aligned}\quad (8)$$

мұндағы

$$m e \omega^2 L + Ge = M_f \quad (9)$$

- сыртқы күштердің қорытқы моментінің амплитудасы.

Келесі өлшемсіз параметрлерді

$$\begin{aligned}\varepsilon &= e / L; l = l_0 / L; \bar{l} = t \omega_0; \Omega = \omega / \omega_0; \bar{I}_p = I_p / (m L^2); \bar{I}_T = I_T / (m L^2); \bar{K}_1 = k_1 / (m \omega_0^2); \\ \bar{K}_3 &= k_3 L^2 / (m \omega_0^2); P = G / (m L \omega_0^2); \bar{\mu}_1 = \mu_{d1} / (m L^2 \omega_0); \bar{\mu}_3 = \mu_{d3} \omega_0 / (m L^2),\end{aligned}\quad (10)$$

енгізін, мұндағы

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k_1 l_0^2 - GL}{m L^2 - (I_p - I_T)}} \quad (11)$$

- демпфирсіз сызықты жүйенің сындық жылдамдығы, сыртқы күштердің қорытқы моментінің өлшемсіз амплитудасы өрнегін

$$\bar{M} = \varepsilon \Omega^2 + \varepsilon P \quad (12)$$

пайдаланып (8) қозғалыс теңдеулеріне ықшам өлшемсіз түр беруге болады

$$(1 + \bar{I}_T) \theta_x'' + \bar{I}_p \Omega \theta_y' + \bar{\mu}_1 \theta_x' + \bar{\mu}_3 \theta_x'^3 + (\bar{K}_1 l^2 - P) \theta_x + \bar{K}_3 l^4 \theta_x^3 = \bar{M} \cos \Omega \bar{t}, \quad (13)$$

$$(1 + \bar{I}_T) \theta_y'' - \bar{I}_p \Omega \theta_x' + \bar{\mu}_1 \theta_y' + \bar{\mu}_3 \theta_y'^3 + (\bar{K}_1 l^2 - P) \theta_y + \bar{K}_3 l^4 \theta_y^3 = \bar{M} \sin \Omega \bar{t}. \quad (14)$$

Бұл жерде штрихтар өлшемсіз уақыт  $\bar{t}$  бойынша туындыларды белгілейді.

Сонымен қарастырып отырған ротордың стационар қозғалысының күйін Дуффинг тұрпатындағы дифференциалдық (13) және (14) теңдеулерінің жүйесі сипаттайды екен. Периоды сыртқы әрекеттің периодына тең периодты шешімдерін анықтау үшін (13)

және (14) теңдеулердің шешімдеріне әдетте коэффициенттері анықталмаған Фурье қатарларына жіктеу әдісі қолданылады. Мүшелерінің саны әдетте аз және шектелген жағдайда коэффициенттер гармоникалық теңгерім әдісімен [7, 8] табылады.

Қатан бейсызық серпімді сипаттамасы және кубтық демпфирлеуі бар гироскоптық ротор негізгі жиілік бойынша резонансқа зерттеледі.

Тербеліс жиілігі сыртқы кобалжудың моментінің жиілігіне тең қарапайым гармоникалық негізгі резонанс жағдайында (13) және (14) теңдеулердің шешімдерін жуықтау

$$\theta_x = A \cos(\Omega \bar{T} - \alpha), \quad (15)$$

$$\theta_y = A \sin(\Omega \bar{T} - \alpha) \quad (16)$$

қанағаттандырады.

Гармоникалық теңгерім әдісін [8, 9] пайдаланғаннан кейін негізгі гармониканың амплитудалық және фазалық жиіліктік тәелділіктерін аламыз

$$\left\{ \left[ (1-H)\Omega^2 - (\bar{K}_1 I^2 - P) - 0,75\bar{K}_3 I^4 A^2 \right]^2 + \left[ \bar{\mu}_1 + 0,75\bar{\mu}_3 A^2 \Omega^2 \right]^2 \Omega^2 \right\} A^2 = \bar{M}^2, \quad (17)$$

$$\tan \alpha = \frac{(\bar{\mu}_1 + 0,75\bar{\mu}_3 A^2 \Omega^2) \Omega}{-(1-H)\Omega^2 + (\bar{K}_1 I^2 - P) + 0,75\bar{K}_3 I^4 A^2}, \quad (18)$$

мұндағы  $H = \bar{I}_p - \bar{I}_T$  - табакшаның шартты қалыңдығы.

Ротордың сызықты моделі үшін нәтижелер [9] (13) және (14) теңдеулеріндегі бейсызық мүшелер болмаған жағдайда (17) және (18) өрнектерден алынады.

Шамалардың қосымша белгілеулерін

$$1 = (\bar{K}_1 I^2 - P)/(1-H); K_3 = \bar{K}_3/(1-H); \mu_1 = \bar{\mu}_1/(1-H), \mu_3 = \bar{\mu}_3/(1-H); M = \bar{M}/(1-H)$$

(19)

ендірін тербелістің амплитудалық және фазалық жиіліктік сипаттамалары үшін өрнектерді аламыз

$$(\omega_*^2 - \Omega^2)^2 + (\mu_1 \Omega + 0,75\mu_3 \Omega^3 A^2)^2 = M^2 / A^2, \quad (20)$$

$$\tan \alpha = \frac{(\mu_1 + 0,75\mu_3 A^2 \Omega^2) \Omega}{1 - \Omega^2 + 0,75K_3 I^4 A^2}, \quad (21)$$

мұндағы белгілеу

$$\omega_*^2 = 1 + 0,75K_3 I^4 A^2 \quad (22)$$

Амплитудалық жиіліктік тірек қисықтары әдетте демпфирсіз жүйенің еркін тербелісінің амплитудасы мен жиілігінің арақатысын сипаттайды. АЖС-ның (20) теңдеуінде сыртқы моменттің М амплитудасының өрнегін,  $\mu_1$  және  $\mu_3$  демпфирлеу коэффициенттерін нөлге тең деп санап негізгі резонанс жиілігіндегі тербеліс үшін тірек қисығының теңдеуін аламыз

$$A = \frac{1}{\sqrt{0,75K_3 I^4}} \sqrt{\Omega^2 - 1}. \quad (23)$$

Бұл жерде

$$\Omega \geq 1.$$

Тірек қисығының  $\Omega$  өсіне қатысты симметриялы парабола болып табылатындығы,  $K_3$  шамасы қанша үлкен болса, сонша тірек қисығы оңға еңкейетіндігі (23) формуласынан байқалады.

Шартты қалыңдықтың  $H=0,99$  және ауырлық күшінің Р моментін ескермеген жағдайда центрден тепкіш күштің моментінің амплитудасы  $M = \Omega^2$ . АЖС-ның (20) теңдеуін  $K_3=0$ ,  $\mu_3$  тұрақты мәнінде  $\Omega$  және  $\mu_1$  тәуелді және  $\mu_1$  тұрақты мәнінде  $\Omega$  және  $\mu_3$

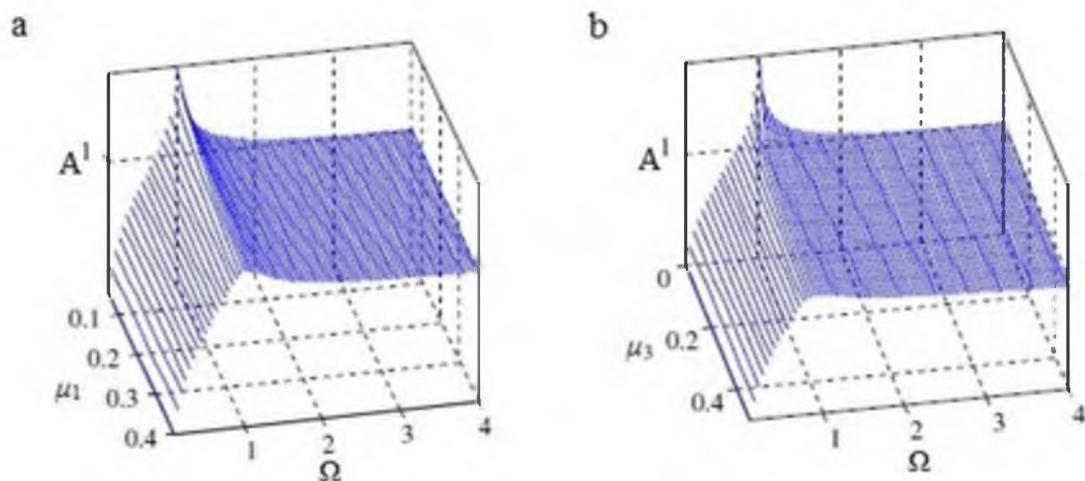
тәуелді  $A$  катысты шешіп 2-суреттегі графиктерді аламыз. Графиктерден сызықты демпфирлеудің  $\mu_1$  коэффициентінің артуы  $\Omega \approx 1$  резонанс облысында негізгі гармониканың  $A$  амплитудасын едәуір басатындығы, дегенмен  $\Omega > 1$  немесе  $\Omega < 1$  резонанстық емес облыстарда  $\mu_1$  дің  $A$  амплитудаға әсері өте әлсіз және болмашы екендігі байқалады (Сурет 2а). Кубтық бейсызық демпфирлеу  $\mu_3$  коэффициентін арттыра отырып  $\Omega \approx 1$  резонанс облысында  $A$  амплитудасын едәуір басатындығын,  $\Omega < 1$  резонанстық емес облыста  $\mu_3$  тің  $A$  ға іс жүзінде әсер етпейтіндігін көруге болады. Десек те  $\Omega > 1$  резонанстық емес облыста  $\mu_3$ -тің артуы тербелістің  $A$  амплитудасын сәл баса алатындығын байқауға болады (Сурет 2б).

Табысталатындық күшінің моментінің проекцияларындағы тендеулерін гармоникалық тенгерім әдісімен шешіп,  $\mu_3$  тұрақты мәнінде  $\Omega$  және  $\mu_1$  тәуелді және  $\mu_1$  тұрақты мәнінде  $\Omega$  және  $\mu_3$  тәуелді оның амплитудасын анықтау үшін өрнекті аламыз

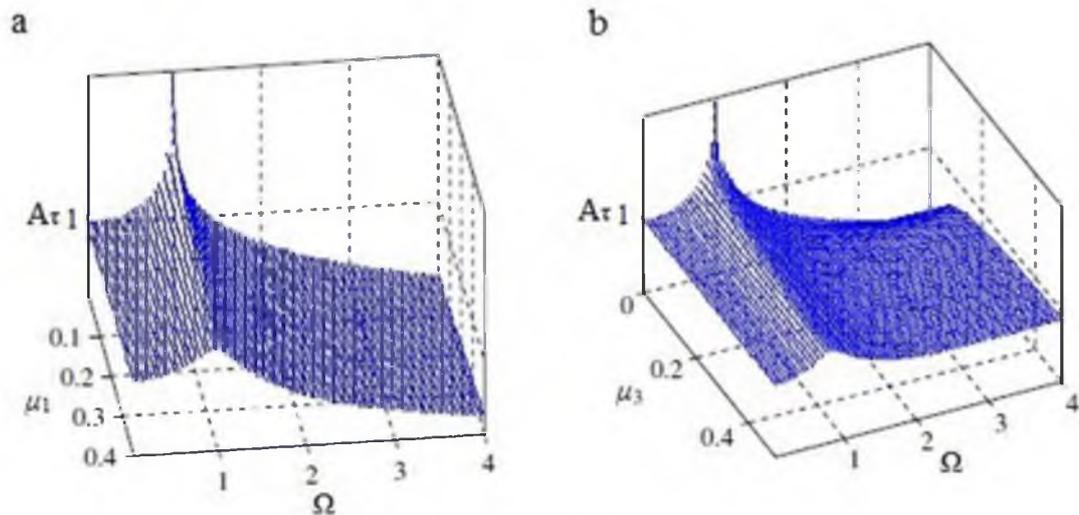
$$A_r^2 = (\mu_1 A \Omega + 0,75 \mu_3 A^3 \Omega^3)^2 + (A + 0,75 K_3 A^3)^2 \quad (24)$$

Бұл тәуелділіктердің графиктері 3-суретте көрсетілген. Бұл графиктерден  $\Omega < 1$  резонанстық емес облысында сызықты  $\mu_1$  демпфирлеудің және кубтық сызықты емес  $\mu_3$  демпфирлеудің оқшаулағыштың абсолютті орын ауыстыру қабілетіне іс жүзінде әсер етпейтіндігін көруге болады. Резонанс  $\Omega \approx 1$  облысында не сызықты  $\mu_1$  демпфирлеудің, не кубтық сызықты емес  $\mu_3$  демпфирлеудің артуы абсолютті орын ауыстыруға қабілетін едәуір басады. Резонанстық емес  $\Omega > \sqrt{2}$  облысында  $\mu_3$  артуы  $A_r$  азғана арттырады, сызықты  $\mu_1$  демпфирлеу  $A_r$  амплитудасына іс жүзінде әсер етпейді.

Сөйтіп  $k$  қатандық коэффициентінің, сызықты  $\mu_{d1}$  демпфирлеу коэффициентінің және кубтық бейсызық  $\mu_{d3}$  демпфирлеу коэффициентінің мәндерін таңдап резонанстық амплитудаға бірауақытта өшіргіш және бәсеңдеткіш әсерін жасайтын және сындық жылдамдық арқылы жеңіл өтуге мүмкіндік беретін серпімді тіректі жасауға болады. Тіректің өшіргіш және бәсеңдеткіш қасиеттері гироскоптық ротор негізінде жұмыс жасайтын центрифуганың әрекет принципі болып табылады, бұған ҚР өнертабысқа патенті алынды [10].



Сурет 2 - Тербелістің Амплитудасының  $\mu_3=0,005$  (а) болғанда  $\mu_1$  параметрінен және  $\mu_1=0,02$  (б) болғанда  $\mu_3$  параметрінен тәуелділіктері



Сурет 3 - Табысталатындық күшінің моментінің  $A_r$  амплитудасының  $\mu_3=0,005$  (a) болғанда  $\mu_1$  параметрінен және  $\mu_1=0,02$  (b) болғанда  $\mu_3$  параметрінен тәуелділіктері

Жүргізілген жұмыстар негізінде келесі қорытындыны жасауға болады. Жұмыста тік қатаң гироскоптық ротордың резонанстық тербелістеріне мойынтіректің серпімді тірегінің материалының сызықты тұтқыр демпфирлеуінің және кубтық бейсызық тұтқыр демпфирлеуінің әсері қарастырылады. Бұл үшін Лагранждың екінші текті теңдеулері негізінде ротордың қозғалыс теңдеулері құрылады, олар өлшемсіз түрге келтіріледі. Ротордың қозғалыс теңдеулері гармоникалық теңгерім әдісімен шешіледі және бас гармониканың амплитудалық жиіліктік және фазалық жиіліктік сипаттамаларының өрнектері алынады. Амплитудалық жиіліктік сипаттаманы серпімді тіректің сызықты тұтқыр демпфирлеуіне және кубтық бейсызық тұтқыр демпфирлеуіне тәуелді зерттеу бас гармониканың резонанстық амплитудасын едәуір басатындығын көрсетеді. Резонанстық емес облыстарда сызықты емес демпфирлеудің дірілдің амплитудасына әсері өте аз және елеусіз, ал кубтық бейсызық демпфирлеу жылдамдықтары сындық жылдамдықтан жоғары облыста ротордың тербеліс амплитудасын сәл ғана баса алады. Зерттеу нәтижелері центрифуганың гироскоптық роторының серпімді тірегінің жұмыс принципін модельдеу үшін қолданылған және оған өнертабысқа патент алынған.

#### ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- [1] Peng Z. K., Mengand Lang Z. Q., Zhang W. M., Chu F. L. Study of the effects of cubic nonlinear damping on vibration isolations using Harmonic Balance Method// International Journal of Non-Linear Mechanics. - 2012. – Vol. 47, № 10. – P. 1065-1166.
- [2] Ho C., Lang Z., Billings S. A. The benefits of nonlinear cubic viscous damping on the force transmissibility of a Duffing-type vibration isolator // Proceedings of UKACC International Conference on Control. - Cardiff UK, 2012. – P. 479-484.
- [3] Isakov Zh. Resonant Oscillations of a Vertical Unbalanced Gyroscopic Rotor with Nonlinear Characteristics // Proceedings of the 14th IFToMM World Congress. - Taiwan, Taipei, 2015. – P. 177 – 185. DOI Number: 10.6567/IFToMM.14TH.WC.OS14.001.
- [4] Isakov Zh. Dynamics of a Vertical Unbalanced Gyroscopic Rotor with Nonlinear Characteristics // New advances in Mechanisms, Mechanical Transmissions and Robotics, Mechanisms and Machine Science. – Springer International Publishing AG, 2017. – Vol. 46. – P. 107–114. DOI 10.1007/978-319-45450-4\_11.

[5] Iskakov Zh. Резонансные колебания неуравновешенного вертикального гироскопического ротора с нелинейными характеристиками // Proceedings of the International Symposium of Mechanism and Machine. – Baku: Science, 2017. – P. 240-246.

[6] Fujiwara H., Nakaura H., Watanabei K. The vibration behavior of flexibly fixed rotating machines // Proceedings of the 14th IFToMM World Congress. – Taiwan, Taipei, 2015.

[7] Hayashi C. Nonlinear Oscillations in Physical Systems (Chapters 1, 3 – 6). - McGraw – Hill, 1964.

[8] Szemplinska-Stupnicka W. Higher harmonic oscillations in heteronymous nonlinear systems with one degree of freedom // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 1968. – Vol. 3, № 1. – P. 17-30.

[9] Искаков Ж., Калыбаева А. Колебания и устойчивость вертикального гироскопического ротора с перекосом диска и дисбалансом массы // Фундаментальные и прикладные проблемы науки. Труды I Международного симпозиума. - М.: РАН, 2010. – Том 2. – С. 50 – 57.

[10] Патент (19) KZ B (11) 32666. Центрифуга на базе гироскопического ротора / Искаков Ж., Кунелбаев М.; опубл. 19.02.2018, бюл. № 7. - 3 с.: ил.

#### REFERENCES

[1] Peng Z. K. and others. Study of the effects of cubic nonlinear damping on vibration isolations using Harmonic Balance Method. International Journal of Non-Linear Mechanics, 2012, – Vol. 47, № 10. – P. 1065-1166. (In Eng.).

[2] Ho C., Lang Z., Billings S. A. The benefits of nonlinear cubic viscous damping on the force transmissibility of a Duffing-type vibration isolator. Proceedings of UKACC International Conference on Control. Cardiff UK, 2012, – P. 479-484. (In Eng.).

[3] Iskakov Zh. Resonant Oscillations of a Vertical Unbalanced Gyroscopic Rotor with Nonlinear Characteristics. Proceedings of the 14th IFToMM World Congress. Taiwan, Taipei, 2015, – P. 177 – 185. DOI Number: 10.6567/IFToMM.14TH.WC.OS14.001. (In Eng.).

[4] Iskakov Zh. Dynamics of a Vertical Unbalanced Gyroscopic Rotor with Nonlinear Characteristics. New advances in Mechanisms, Mechanical Transmissions and Robotics, Mechanisms and Machine Science. Springer International Publishing AG, 2017, – Vol. 46. – P. 107–114. DOI 10.1007/978-319-45450-4\_11. (In Eng.).

[5] Iskakov Zh. Resonant oscillations of an unbalanced vertical gyroscopic rotor with nonlinear characteristics. Proceedings of the International Symposium of Mechanism and Machine. Baku: Science, 2017, – P. 240-246. (In russ.).

[6] Fujiwara H., Nakaura H., Watanabei K. The vibration behavior of flexibly fixed rotating machines. Proceedings of the 14th IFToMM World Congress. Taiwan, Taipei, 2015. (In Eng.).

[7] Hayashi C. Nonlinear Oscillations in Physical Systems (Chapters 1, 3 – 6). McGraw – Hill, 1964. (In Eng.).

[8] Szemplinska-Stupnicka W. Higher harmonic oscillations in heteronymous nonlinear systems with one degree of freedom. International Journal of Non-Linear Mechanics. – 1968, – Vol. 3, № 1. – P. 17-30. (In Eng.).

[9] Iskakov Zh., Kalybaeva A. Oscillations and stability of a vertical gyroscopic rotor with a skew of the disk and mass imbalance. Fundamental and applied problems of science. Proceedings of the First International Symposium. M.: RAN, 2010, – Vol 2. – P. 50 – 57. (In russ.).

[10] Patent (19) KZ B (11) 32666. Centrifuge based on a gyroscopic rotor. Iskakov Zh., Kunelbaev M.; publ. 19.02.2018, Bul. № 7. - 3 p.: ill. (In russ.).

## **РЕЗОНАНСНЫЕ КОЛЕБАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЖЕСТКОГО ГИРОСКОПИЧЕСКОГО НЕУРАВНОВЕШЕННОГО РОТОРА С КУБИЧЕСКИМИ НЕЛИНЕЙНЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ**

**Ж. Искаков**

Алматинский университет энергетики и связи, г. Алматы, Казахстан

**Аннотация.** Рассматривается вертикальный жесткий гироскопический ротор с кубической нелинейной упругостью и кубическим нелинейным демпфированием опоры, у которого диск имеет дисбаланс массы. Для описания движения ротора построены динамическая модель машины и уравнения движения в форме уравнений Лагранжа второго рода. Методом гармонического баланса найдены выражения для определения амплитуды и фазы главной гармоники колебаний и амплитуды момента трансмиссивной силы. Анализ результатов исследований АЧХ и зависимости амплитуды момента трансмиссивной силы от частоты колебаний при различных значениях коэффициентов линейного и нелинейного демпфирования показывают, что в области частот меньших резонансной частоты, как линейное демпфирование, так и кубическое нелинейное демпфирование не имеют почти никакого влияния на АЧХ. В резонансной области линейное и кубическое нелинейное демпфирования значительно могут подавлять резонансный пик главной гармоники. В области, где скорость выше критической скорости, кубическое нелинейное демпфирование в отличие от линейного демпфирования может слегка подавить амплитуду вибрации ротора. Результаты исследований успешно могут быть использованы для создания пассивных виброизоляторов, применяемых при демпфировании вибраций роторных машин.

**Ключевые слова:** гироскопический ротор, резонансная амплитуда, линейное демпфирование, нелинейное демпфирование.

## **RESONANCE OSCILLATIONS OF A VERTICAL RIGID GYROSCOPIC UNBALANCED ROTOR WITH CUBIC NONLINEAR CHARACTERISTICS**

**Zh. Iskakov**

Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan

**Abstract:** A vertical rigid gyroscopic rotor with cubic nonlinear elasticity and cubic nonlinear damping of the support, in which the disk has a mass imbalance is considered. To describe the motion of the rotor, a dynamic model of the machine and the equations of motion in the form of Lagrange equations of the second kind were constructed. By the method of harmonic balance, expressions are found for determining the amplitude and phase of the fundamental harmonic of oscillations and the amplitude of the moment of transmitting force. Analysis of the results of AFC studies and of the dependence of the amplitude of the moment of the transmitting force on the frequency of oscillations for different values of the coefficients of linear and nonlinear damping show that in the frequencies range of lower resonant frequency, both linear damping and cubic nonlinear damping have almost no effect on the amplitude-frequency characteristic, in the resonance region linear and cubic nonlinear damping can significantly suppress the resonance peak of the main harmonic, in a region where the velocity is above the critical velocity, nonlinear damping, in contrast to linear damping, can slightly suppress the vibration amplitude of the rotor. The results of the researches can be successfully used to create passive vibration isolators used for damping of rotary machines vibrations.

**Keyword:** gyroscopic rotor, resonant amplitude, linear damping, nonlinear damping.

**МРНТИ 90.01.85**

**С.Г.Хан<sup>1</sup>, Ә.Ә.Әлібек<sup>1</sup>, Ә.Қ.Батыр<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>НАО «Алматинский университет энергетики и связи», г. Алматы, Казахстан

## **РАЗРАБОТКА МОБИЛЬНОГО ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ИНФОРМАЦИОННО-МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА (ГИМК) ПОВЕРКИ РАСХОДОМЕРОВ**

При подземном выщелачивании урана используется большое число расходомеров выщелачивающих растворов, подаваемых на закачные скважины геотехнологического поля. Существующая методика метрологической поверки расходомеров связана с необходимостью снятия приборов с производства, доставкой в метрологическую службу, их поверкой, доставкой обратно и установкой на место. Такая методика поверки приборов приводит к большим издержкам при их эксплуатации. Это обуславливает актуальность разработки новых методов метрологической поверки расходомеров по месту.

В работе разработан мобильный геотехнологический информационно-метрологический комплекс (ГИМК), предназначенный для проведения поверки и калибровки промышленных расходомеров в условиях, наиболее приближенных к реальной эксплуатации без необходимости их демонтажа с рабочих позиций, что позволит повысить экономическую эффективность процессов добычи урана методом подземного скважного выщелачивания.

В состав ГИМК входит АРМ «Метролог», который включает программы расчета погрешностей и неопределенности измерений технических расходомеров на основе международного Руководства GUM: 1993.

**Ключевые слова:** мобильный геотехнологический информационно-метрологический комплекс (ГИМК), поверка расходомеров, добыча урана, подземное скважное выщелачивание.

Добыча урана методом подземного выщелачивания - один из самых рентабельных и экологически чистых способов добычи - применяется в Республике Казахстан. Недра практически не разрушаются и даже полностью восстанавливаются в течение нескольких лет.

Кислые выщелачивающие растворы ( $H_2SO_4$ ) под давлением 5-6 атмосфер распределяются по закачным скважинам. В закачных скважинах через фильтр выщелачивающий раствор поступает на продуктивный горизонт, где происходит выщелачивание урана кислыми растворами. Именно на данном этапе под землей формируется продуктивный раствор, содержащий уран. Через откачные скважины при помощи глубинных насосов продуктивный раствор, содержащий растворенный уран, поступает в узел приема продуктивных растворов. Далее продуктивный раствор поступает в сборные емкости. В сборных емкостях происходит процесс осветления продуктивного раствора и подача на сорбционное извлечение урана [1].

Для учета поступления рабочих растворов в подающие скважины и откачки их из откачных используется большое количество различных расходомеров, расположенных в измерительном узле приема и распределения выщелачивающего раствора (УПРВР), который вместе с узлом приема продуктивных растворов (УППР) расположены в одном 40-ка футовом утепленном контейнере с окнами.

На предприятиях добычи урана применяются электромагнитные и механические расходомеры различных типов. Применение прецизионных расходомеров экономически нецелесообразно ввиду их большой стоимости и большого необходимого количества. Для получения точности учета расходов, гарантируемых производителями расходомеров, необходимо соблюсти ряд условий при монтаже и эксплуатации [2]. К этим условиям относятся наличие только ламинарных потоков рабочей жидкости, отсутствие газовой

составляющей и т.д. Кроме того, для контроля технического состояния расходомеров необходимо проводить их периодическую поверку в условиях, близких к идеальным. Данная процедура требует демонтажа расходомеров с рабочих позиций. Все это существенным образом влияет на рабочий процесс и приводит к увеличению себестоимости добычи. К тому же это не позволяет оценить точность измерения расходомеров в реальных условиях, которые могут существенно отличаться от идеальных.

Все приведенные выше факторы делают целесообразным создание специальной установки, позволяющей поверять расходомеры в реальных условиях и использовать результаты поверки для целей внутреннего учета рабочих жидкостей. Принцип работы установки может заключаться в последовательном включении поверяемого расходомера и высокоточного расходомера, нечувствительного к неламинарности потока, наличия газов, плотности рабочей жидкости и т.д. Образцовый и поверяемый расходомеры измеряют один и тот же поток. Образцовый расходомер должен обеспечивать следующие характеристики: удельный вес рабочей жидкости 1000-1500 кг/м<sup>3</sup>; максимальный поток 20000 м<sup>3</sup>/час; минимальный поток 500 м<sup>3</sup>/час; точность измерения массового расхода 0,1%; точность измерения плотности 0,5%; точность определения объемного расхода жидкости 0,7% [3].

Анализ характеристик точности, имеющихся на рынках расходомеров, позволяет определить, что для данного применения наиболее подходящим типом расходомера является расходомер, базирующийся на эффекте Кориолиса и нечувствительный к неламинарности потока. Хотя данный тип расходомера измеряет массовый расход жидкости, высокая точность измерения плотности позволяет использовать его для поверки расходомеров, измеряющих объемный расход [4].

Разработанная структурная схема ГИМК представлена на рисунке 1. Комплекс состоит из:

- основного измерительного блока, включающего высокоточный расходомер, регулировочный клапан, фильтры защиты расходомера от абразивного повреждения, измерительный контроллер, разъемные соединения для монтажа гибких трубопроводов, систему подключения электропитания;
- автоматизированного рабочего места «Метролог» для расчета погрешностей и неопределенности измерения расходомеров, а также заключения о результатах их поверки.

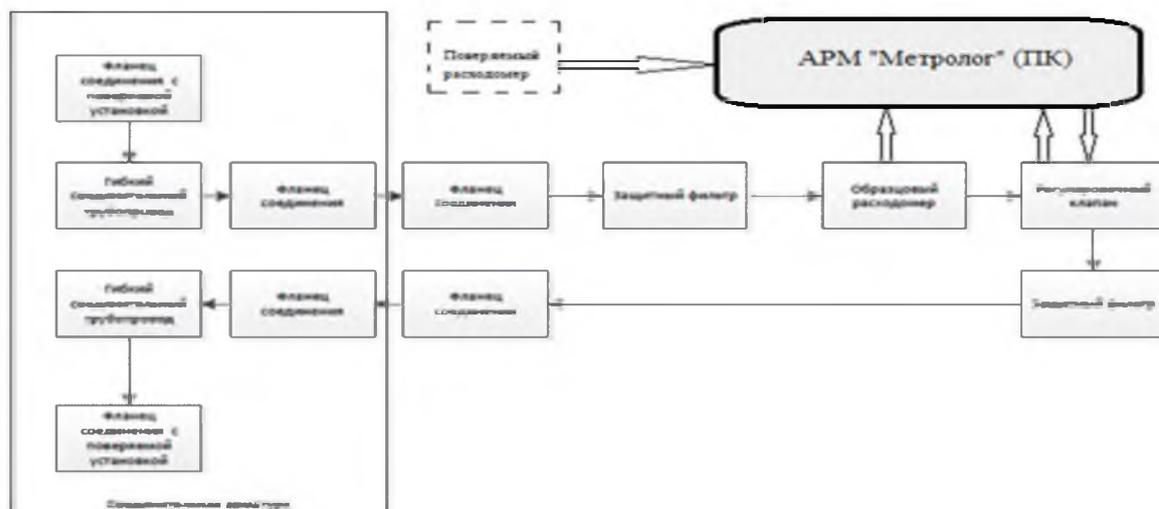


Рисунок 1 – Структурная схема ГИМК

Комплекс должен позволять производить полную промывку оборудования от остатка рабочих жидкостей. Комплекс должен быть устойчив к воздействию водных растворов серной кислоты. Детали комплекса, непосредственно контактирующие с

рабочей жидкостью, должны быть изготовлены из нержавеющей стали или материалов стойких к кислотам. Электронные блоки должны иметь защиту от попадания на их поверхность растворов серной кислоты.

Согласно закону (Закон Республики Казахстан от 7 июня 2000 года № 53-ІІ «Об обеспечении единства измерений») каждое средство измерения, используемое на территории Республики Казахстан, должно быть сертифицировано в уполномоченном органе и включено в состав государственного реестра средств измерения. Поверка средств измерения должна проводиться аккредитованными по данным приборам организациями. Однако, если использовать расходомеры для целей внутреннего технологического контроля, можно использовать разрабатываемый ГИМК на базе внутреннего регламента поверки технологических операций и учета. Для этого установка должна иметь в своем составе высокоточный расходомер с большим межповерочным интервалом. Методика поверки для внутреннего применения должна быть технологически прозрачна и проста в применяемых физических принципах.

Методика поверки, как правило, включает в себя расчет метрологических характеристик поверяемых расходомеров таких, как погрешности измерения, и оценивание годности средства измерения к эксплуатации. Понятие погрешности измерений как разности между результатом измерений и истинным (действительным) значением измеряемой величины используется для описания точности измерений в нормативных документах Государственной системы обеспечения единства измерений (НД ГСИ).

В Международном руководстве по выражению неопределенности измерения (Guideto the Expression of Uncertainty in Measurement, ISO (GUM: 1993)), разработанном экспертами международных организаций МБМВ, МЭК, ИСО, МФКХ, ИЮПАК, ИЮПАП и МОЗМ, установлены общие правила оценивания и представления неопределенности измерения применительно к широкому спектру измерений[5]. Неопределенность измерений понимают как неполное знание значения измеряемой величины и для количественного выражения этой неполноты вводят распределение вероятностей возможных (обоснованно приписанных) значений измеряемой величины. Отсюда, параметр этого распределения (также называемый - неопределенность) количественно характеризует точность результата измерений.

Таким образом, с 1995 года Комитет технического регулирования и метрологии РК ввел в метрологическую практику Международные рекомендации по оцениванию неопределенности измерения как при калибровке, так и при поверке средств измерения. Следует отметить, что в Казахстане при поверке электромагнитных расходомеров практически отсутствует методика оценки неопределенности их измерения.

Из анализа существующих нормативных документов можно предложить общее правило: результаты измерений в большинстве метрологических ситуаций характеризуются неопределенностью, а нормативы точности средств измерений, измерительных и контрольных процедур характеризуются погрешностью. Понятия «неопределенность» и «погрешность» рекомендуется гармонично использовать без взаимного противопоставления и исключения одного из них [6].

АРМ «Метролог» включает программы расчета погрешностей и неопределенности измерений технических расходомеров, основанные на руководстве GUM: 1993 [7].

Схема подключения ГИМК для поверки рабочих электромагнитных расходомеров на измерительном узле УПРВР представлена на рисунке 2. Более жирными линиями на схеме показаны трубопроводы для поверки расходомеров выщелачивающих растворов по месту (на УПРВР). Все остальные конструкции на схеме – оборудование УПРВР. Сама поверочная установка ГИМК выделена на схеме пунктирной линией.

Разработанная схема ГИМК имеет возможность изменения величины расхода, необходимого для проведения поверки датчиков:  $0,25V_{max}$ ;  $0,5V_{max}$ ;  $0,7V_{max}$ ;  $V_{max}$  ( $V_{max}$  - максимальный расход поверяемого электромагнитного расходомера). Для этого в структуру мобильного ГИМК включены: регулируемый клапан (PB) и программируемый контроллер (PLC ОВЕН).

Поверка электромагнитных расходомеров осуществляется в поверочной установке с помощью эталонного кориолисового расходомера (FY 156F1a), установленного на участке трубопровода между кранами K2 и K3. Методика поверки основывается на методе сличения показаний эталонного и поверяемого расходомера. Регулируемый клапан и PLC, входящие в состав ГИМК, позволят автоматизировать процесс поверки прибора во всем диапазоне измерения прибора.

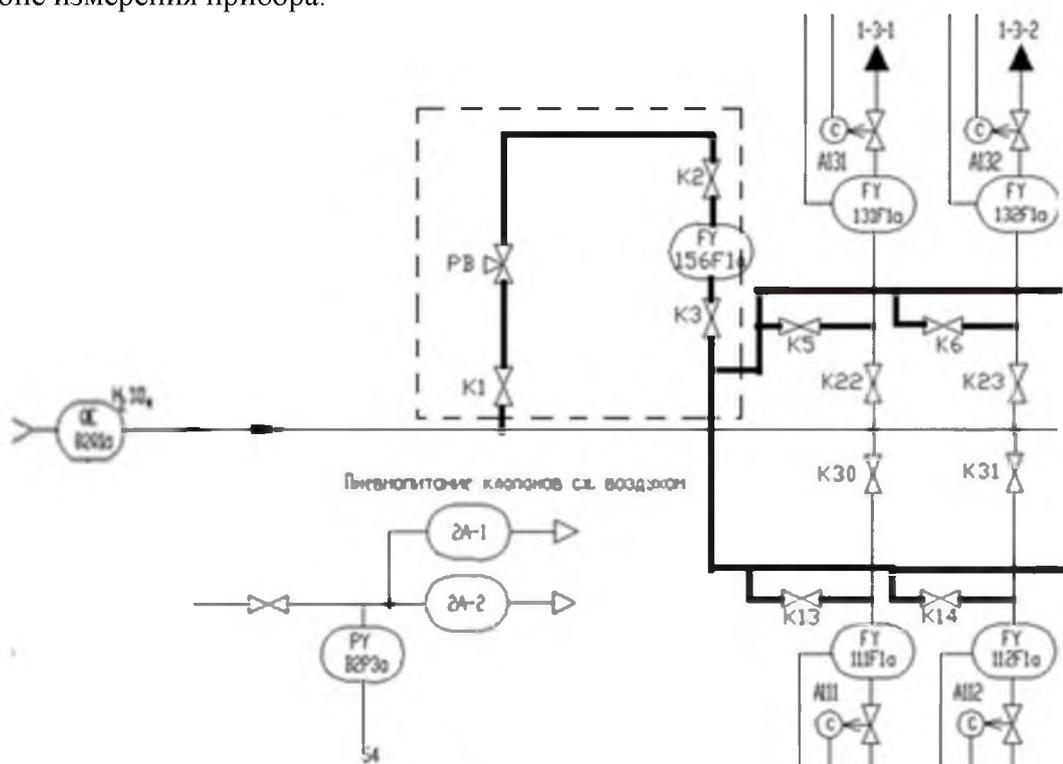


Рисунок 2 - Схема подключения ГИМК

С помощью запорных клапанов перекрываются все скважины кроме одной. Поток раствора проходит через поверяемый и образцовый расходомеры. С помощью регулировочного клапана на установке устанавливается требуемый расход для данной скважины. Данная мера позволяет проводить поверку в условиях абсолютно аналогичных рабочим.

Производится сравнение показаний образцового расходомера с расходомером на скважине. Затем открывается поток на следующую скважину и перекрывается на уже измеренную и т.д. В результате получаем таблицу соответствия между показаниями установленных на скважинах расходомеров и показаниями высокоточного образцового расходомера.

Подробнее рассмотрим процедуру поверки электромагнитного расходомера на примере расходомера с позицией FY 111 F1a на рисунке 2. Поверочной жидкостью является сам выщелачивающий раствор.

Поверочная установка путем открытия крана K1 подключается к закачной системе узла распределения выщелачивающего раствора. Затем с помощью регулирующего клапана (PB) задаются 4 поверяемые точки по расходу из диапазона измерений

поверяемого электромагнитного расходомера:  $0,25V_{\max}$ ;  $0,5V_{\max}$ ;  $0,7V_{\max}$ ;  $V_{\max}$ . Производится открытие кранов К2 и К3 для прохождения потока жидкости через кориолисовый образцовый расходомер. Кран К30, который в штатном режиме работы расходомера открыт, во время поверки закрывается, открывается кран К13. Таким образом, поверочная жидкость с расходом, заданным регулирующим вентилем РВ, проходит сначала по линии установки кориолисового расходомера, затем поверочная жидкость проходит через кран К13 и электромагнитный расходомер, и далее поступает в скважину. Производится сравнение показаний поверенного высокоточного расходомера на эффекте Кориолиса с рабочим расходомером на скважине. Переключается скважина с уже поверенным расходомером в штатный режим и затем повторяется процедура поверки расходомера с позицией FУ 112 F1a на следующей скважине.

Вывод. Разработанный ГИМК поверки расходомеров на узлах добычи урана методом подземного скважного выщелачивания позволит проводить процедуру поверки таким образом, что все расходомеры поверяются с помощью поверочной установки не одновременно, а по очереди. При этом, при поверке выбранного расходомера, все остальные электромагнитные расходомеры на узле распределения выщелачивающего раствора работают в штатном режиме.

Новизна работы заключается в разработке методики поверки электромагнитных расходомеров с оценкой неопределенности их измерения и создания мобильного геотехнологического информационно-метрологического комплекса для проведения поверки расходомеров без их демонтажа с места эксплуатации, позволяющего повысить экономическую эффективность процессов добычи урана методом подземного скважного выщелачивания. А также в разрабатываются программы расчета неопределенности измерений технических расходомеров, основанные на международном «Руководстве оценки неопределенности измерения», и ее применение в метрологической практике.

Предложенная методика поверки электромагнитных расходомеров может быть опробована на модернизированных узлах подготовки и распределения выщелачивающих растворов, в которых параллельно основному трубопроводу подачи выщелачивающего раствора устанавливается дополнительный трубопровод для поверки электромагнитных расходомеров.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- [1] Носков М.Д. Добыча урана методом скважинного подземного выщелачивания: учебное пособие/ М.Д.Носков.- Северск: Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2010.-83 с.
- [2] ГОСТ 8.675-2009 «Расходомеры электромагнитные. Методика поверки».
- [3] Интыкбаев А.М., Алыбаев Ж.А. Основы подземного выщелачивания урана и примеры решения задач: Учеб. пособие для вузов.– Алматы: КазНТУ, 2011. – 193 с.
- [4] ГСИ «Расходомеры кориолисовые Optimass». Методика поверки. - ФГУП «ВНИМС», 2009.
- [5] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. ISO, Geneva, 1993.
- [6] РМГ 91-2009. ГСИ. Совместное использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения». Общие принципы.
- [7] С.Г. Хан, А.Е. Ташибаева. Оценка неопределенности измерений кориолисовых расходомеров выщелачивающих растворов. Сб.тр. XIV Международной научно-практ. конф. «Инженерные и научн. приложения на базе технологий NationalInstruments. NIDays-2015». - Москва, 2015. – С. 136-137.

## REFERENCES

- [1] Noskov M.D. Uranium mining by the method of borehole underground leaching: textbook / MD Noskov .- Seversk: Publishing house of STI NNIU MEFhI, 2010.- p. 83(in Russian).
- [2] GOST 8.675-2009 «Electromagnetic Flowmeters. Method of Verification» (in Russian).
- [3] Intykbaev AM, Alybaev Zh.A. Fundamentals of underground uranium leaching and examples of solving problems: Proc. manual for universities. - Almaty: KazNTU, 2011. – p. 193 (in Russian).
- [4] SSM «Coriolis Flowmeters - Optimass». Method of Verification. – FGUP «VNIMS», 2009 (in Russian).
- [5] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. ISO, Geneva, 1993 (in English).
- [6] RMG 91-2009. SSM. Joint use of the concepts "measurement error" and "measurement uncertainty". General principles (in Russian).
- [7] S.G. Khan, A.E. Tashibaeva. Estimation of uncertainty of Coriolis flowmeters measurements of leach solutions. XIV International scientific and practical conf. "Engineering and scientific applications based on National Instruments technologies. NIDays-2015 ". - Moscow,2015. – P. 136-137 (in Russian).

## DEVELOPMENT OF MOBILE GEOTECHNOLOGICAL INFORMATION AND METROLOGY COMPLEX (GIMC) OF FLOWMETER'S VERIFICATION

S.G. Khan<sup>1</sup>, A. Alibek<sup>1</sup>, A. Batyr<sup>1</sup>

<sup>1</sup>NJSC Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan

A large number of flow meters (on average, in one mine, the number of flow meters ranges from several hundreds to a thousand) of leaching solutions fed to the pumping wells of the geotechnological field are used at underground leaching of uranium. The existing method of metrological verification of flowmeters is associated with the need to remove instruments from production, delivery to metrological service, their verification, delivery back and installation in place. This method of verification of devices leads to large costs at their operation. This causes the urgency of developing new methods for metrological verification of flow meters in place.

In this work we developed a mobile geotechnological information and metrology complex (GIMK) intended for checking and calibrating industrial flowmeters in conditions that are closest to real operation without the need to dismantle them from working positions, which will increase the economic efficiency of uranium mining by the method of borehole underground leaching.

The GIMC includes an automation workstation "Metrolog", which includes programs for calculating errors and uncertainties of measuring technical flowmeters based on the international Guideline "GUM: 1993".

Key words: mobile geotechnological information and metrology complex (GIMC), verification of flowmeters, uranium mining, borehole underground leaching

**ШЫҒЫН ӨЛШЕГІШТЕРДІ ТЕКСЕРУ ЖЫЛЖЫМАЛЫ  
ГЕОТЕХНОЛОГИЯЛЫҚ АҚПАРАТТЫҚ - МЕТРОЛОГИЯЛЫҚ КЕШЕНІН  
ӘЗІРЛЕУ**

**С.Г. Хан<sup>1</sup>, Ә.Ә.Әлібек<sup>1</sup>, Ә.Қ.Батыр<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>«Алматы энергетика және байланыс университеті» КеАҚ, Алматы қ., Қазақстан

Жерасты уран шаймалауы кезінде геотехнологиялық өрістің толтырмалы ұңғымаларына жіберілетін шаймалау ерітінділерінің көптеген шығын өлшегіштері пайдаланылады (орта есеппен, бір кенорнында шығын өлшегіштердің саны бірнеше жүзден мыңға дейін жетеді) . Қазіргі кезде қолданылатын шығын өлшегіштерді метрологиялық тексеру әдістемесі құрылғыларды өндіріс орнынан алып тастау қажеттілігімен, метрология қызметіне жеткізілу, оларды тексеру, қайта өз орнына жеткізу және орнатумен байланысты. Бұндай құрылғыны тексеру әдістемесі оларды қолдану барысында үлкен шығындарға әкеледі. Бұл шығын өлшегіштерді метрологиялық тексерудің жана әдістемелерін әзірлеудің өзектілігін тудырады.

Бұл жұмыста өнеркәсіптік шығын өлшегіштерді өндіріс орнынан шешпей-ақ нақты қолдану барысына ең жақын жағдайларда тексеруге және калибрлеуге арналған жылжымалы геотехнологиялық ақпараттық - метрологиялық кешені(ЖАМК) әзірленді, және бұл өз кезегінде уранды жерасты ұңғымалы шаймалау әдісімен жасалатын уран өндіру процестердің экономикалық тиімділігін арттыруға мүмкіндік береді.

Жылжымалы геотехнологиялық ақпараттық - метрологиялық кешені (ЖАМК) құрамына GUM:1993 халықаралық басшылығы негізінде техникалық шығын өлшегіштердің ауытқуралы мен анықталмағандықтарын есептеу бағдарламасы бар, "Метролог" АЖО кіреді.

**Түйінді сөздер:** жылжымалы геотехнологиялық ақпараттық - метрологиялық кешені (ЖАМК), шығын өлшегіштерді тексеру, уран өндіру, жерасты ұңғымалы шаймалау.

IRSTI 90.27.29

S.G.Khan<sup>1</sup>, L.K.Ibrayeva<sup>1</sup>, G.N.Bukayeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Non-commercial JSC «Almaty University of Power Engineering and Telecommunications», Almaty, Kazakhstan

## COMPARATIVE ANALYSIS OF EVALUATION METHODS OF MEASUREMENT UNCERTAINTY

**Abstract.** The paper dwells on the problems of evaluation of measurement uncertainty of a Coriolis flowmeter by two methods: the widely used method of uncertainty calculation proposed in the International Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM: 1993) and based on the Bayesian approach, and the distributions transformation method based on the modeling of random samples from these distributions- the Monte-Carlo method.

A software shell was developed in the NI LabView graphical programming environment of National Instruments for performing these uncertainty calculations for the Coriolis flowmeter. For evaluation of the measurements uncertainty of the Coriolis flowmeter, the mathematical model was designed, which represents linear dependence of component errors.

Comparative analysis of the results of calculations performed by these methods has shown that the Monte-Carlo method is a practical alternative one to the method of evaluation of the measurement uncertainty by GUM. It is in many cases more simple to use and provides the necessary reliability of evaluation of the measurement uncertainty.

**Key words:** Coriolis flowmeter, measurement uncertainty, methods of evaluation of measurement uncertainty: by GUM and Monte-Carlo method.

When processing the measurement results obtained during international comparisons of standards, tests, calibration or verification of measuring instruments for foreign countries, in the study of primary national standards, uncertainty of measurements is used as a measure of the quality of measurements. Uncertainty of measurements is a parameter associated with the measurement result and described the scattering of values that can be attributed to the measured quantity. The main documents for uncertainty estimating are the "International Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements" (GUM: 1993) [1] and recommendations [2].

From the analysis of existing normative documents it is possible to propose a general rule: the results of measurements in most metrological situations are characterized by uncertainty, and the accuracy standards of measuring instruments, measuring and control procedures are characterized by an error. The concepts of "uncertainty" and "error" are recommended to be used harmoniously without mutual opposition and exclusion of one of them [3].

At present, two reliable approaches are mainly used to quantify the measurement uncertainty: the modeling method outlined in the GUM and the Monte-Carlo simulation method. Formulation of the problem. A quantitative comparison of the results of evaluation of measurements uncertainty of a Coriolis flowmeter using the calculation method set forth in ISO / IEC "Guide to the expression of measurement uncertainty (GUM)" and the Monte-Carlo method.

For the evaluation of the measurements uncertainty of a Coriolis flowmeter, the following relationship is used:

$$M = M_{\text{avg}} + \delta_{\text{disc.t}} + \delta_{\text{disc.p}} + \delta_{\text{zerostab}} + \delta_{\text{accur.}}, \quad (1)$$

where  $M_{\text{avg}}$  – the average mass flow rate is measured by a Coriolis flowmeter;

$\delta_{\text{disc.t}}$ - the effect of operating temperature fluctuations on the zero point of the primary converter;

$\delta_{\text{disc.p}}$ - the effect of operating pressure fluctuations on the zero point of the primary converter;

$\delta_{\text{zerostab}}$ - zero point stability;

$\delta_{\text{accur.}}$ - accuracy of readings.

Standard values of input parameters: conditional pass diameter = 100 mm,  $\delta_{disc,p} = 0,0002\%$  of the maximum flow per 1 bar (0.0084 t/h);  $\delta_{disc,t} = 0,0004\%$  from the maximum flow rate at 1 °C (0.0336 t/h),  $\delta_{zerostab} = 0,007$  t/h,  $\delta_{accur..} = \pm 0,1\%$  from the measured flow rate (0.4 t/h).

Calculation of evaluation of the measurement uncertainty of the Coriolis flowmeter OPTIMASS 2000 by the GUM method was performed as follows (all calculations were performed in the software shell developed in the NI LabView graphical programming environment):

- there is a functional dependence (1);
- on the basis of statistical analysis of a number of observations, an estimate  $x_i$  of the input quantity  $X_i$ ;
- determine the measurement result by (1);
- evaluate the standard uncertainty  $u(x_i)$  of each input evaluation  $x_i$  (type A or type B);
  - if there are correlated among of the input quantities, then their covariance is evaluated;
  - the measurement result is calculated, thus, find an evaluation of the measured value of  $f$  from the functional dependence of  $f$ , using as arguments  $X_i$  the evaluations of  $x_i$ , obtained in the second stage;
  - determine the total standard uncertainty  $u_c(y)$  of the measurement result  $y$  by the standard uncertainties of the input evaluations;
  - if it is required to know the expanded uncertainty of  $U$  to determine the interval from  $y-U$  to  $y+U$ , within which, presumably, there is a large part of the distribution of values that can be reasonably attributed to the measured value of  $Y$ , then the total standard uncertainty  $u_c(y)$  is multiplied by the coverage factor  $k$ , usually taking values in the range of 2 to 3;
  - represent the result of measurement  $y$  together with its total standard uncertainty  $u_c(y)$  or the expanded uncertainty  $U$ .

In order to perform uncertainty calculations for the Coriolis flowmeter based on this algorithm, a software shell was developed in the NI LabView graphical programming environment).

The following results were obtained:  $M = (400,00 \pm 0,23)$  t/h,  $p = 0,95$ .

The Monte-Carlo method can be applied to any models having a single output value, in which the input quantities are characterized by any given probability distribution functions [4].

To apply the Monte-Carlo method, you must choose the number  $m$  of the model estimation that you want to perform, and the confidence level  $p$ . It is best to choose a value of  $m$  that is sufficiently large in comparison with  $1 / (1-p)$  (for example, exceeding it by  $10^4$  times).

The essence of the Monte-Carlo method with respect to the uncertainty of flow measurement is the following: each time the measurement function is calculated, the generated random values of the input quantities are substituted into equation (1), varying around the nominal value  $M_{avg} = 400$  t/h within the uncertainty interval in accordance with its law of distribution of probability density.

Obtained in the process of multiple "observations" an array of the output quantity values that carries full information about the measured quantity - mass flow rate  $M$ , is processed statistically. At each measurement, no less than  $m = 1000000$  "observations" were conducted. The best evaluation of the measured value was determined as the arithmetic mean. The evaluation of the total standard uncertainty was calculated as the experimental standard deviation.

The extended uncertainty  $\hat{U}_p$  for a given confidence probability is found from the integral probability distribution of the output quantity by the formula:

$$\hat{U}(p) = \frac{1}{2} \left[ y_{\frac{(m+1)p}{2}} - y_{\frac{(m-1)p}{2}} \right],$$

without resorting to a preliminary calculation of the effective number of degrees of freedom and the establishment of a coverage factor. Conversely, the coverage factor for the confidence probability of 0.95 is calculated on extended uncertainty. There is no need to evaluate the contribution of the uncertainty of each input quantity to the total standard uncertainty of the output quantity, and also to calculate the share of their contributions.

Modeling of the process of the measurement uncertainty estimating of the Coriolis flowmeter OPTIMASS 2000 was performed as follows (all calculations were performed in the software shell developed in the NI LabView graphical programming environment):

a) four random number arrays for input values are generated  $\delta_{disc,t}$ ,  $\delta_{disc,p}$ ,  $\delta_{zerostab}$ ,  $\delta_{accur}$  by volume  $m=10^6$ , subject to uniform distribution laws;

b) array of the output quantity values is calculated – mass flow;

Selecting the level of significance  $\alpha = (1 - p)/2$  allows us to determine the probability-symmetric 100% coverage interval, whose boundaries are quantiles of levels  $(1-p)/2$  and  $(1+p)/2$ :

$$\hat{U}(p) = \frac{1}{2} [y_{975000} - y_{25000}] = 0,23;$$

c) the result of the measurement:

$$M = 400,00 \pm 0.23 \text{ t/h, } p = 0,95.$$

Conclusion. The Monte-Carlo method is a practical alternative oneto the GUM uncertainty estimation method. It is in many cases more simple to use and provides the necessary reliability of evaluation of measurement uncertainty. The calculation with application of the Monte-Carlo method requires more time (mainly due to the long sorting time of the array of measurement results), but it can be performed by less qualified personnel, since there is no need to know or make assumptions about the form of the distribution law of the output value of the mathematical model of the measurement result, and on top of that it is not necessary to estimate the sensitivity coefficients (to find the partial derivatives) of the model of the measurement result.

## REFERENCES

[1] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement [GUM: 1993]: Translated from English. under the scientific. Ed. Prof. Slayeva V.A. - D.I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM), S.-P., - 1999.(in Russ.).

[2] MP 2552-99. Recommendation. SSM. Application of the "Guide to the expression of measurement uncertainty". - D.I. Mendeleyev Institute for Metrology (VNIIM), St. Petersburg, 1999 - 26 p. (in Russ.).

[3] RIS 91-2009.SSM. Joint use of the concepts "measurement error" and "measurement uncertainty". General principles. (in Russ.).

[4] P.R. Guimaraes Couto, J.C. Damasceno, S. Pinheiro de Oliveira. Monte-Carlo Simulations Applied to Uncertainty in Measurement. <http://dx.doi.org/10.5772/53014>.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

[1] Руководство по выражению неопределенности измерения [GUM:1993]: Перевод с англ. под науч. ред. Проф. Слаева В.А. – ГП ВНИИМ им Д.И. Менделеева, СПб., - 1999.

[2] МИ 2552-99. Рекомендация. ГСИ. Применение «Руководства по выражению неопределенности измерений». – ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, СПб., 1999 – 26 с.

[3] РМГ 91-2009. ГСИ. Совместное использование понятий «погрешность измерения» и «неопределенность измерения». Общие принципы.

[4] P.R. Guimaraes Couto, J.C. Damasceno, S. Pinheiro de Oliveira. Monte-Carlo Simulations Applied to Uncertainty in Measurement. <http://dx.doi.org/10.5772/53014>.

## **ӨЛШЕУЛЕРІНІҢ АНЫҚТАЛМАҒАНДЫҒЫН БАҒАЛАУДЫҢ ӘДІСТЕРІН САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУ**

**С.Г.Хан<sup>1</sup>, Л.К.Ибраева<sup>1</sup>, Г.Н.Букаева<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>КЕАҚ «Алматы энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан

**Аңдатпа.** Мақалада кориолис шығын өлшеуішпен орындалатын өлшеулердің анықтамалдығын бағалаудың екі әдісі қарастырылады: байес амалында негізделген өлшеу анықтамалдығын бағалаудың Халықаралық Нұсқаулық ұсынатын кең қолданылатын есептеу әдісі (GUM:1993) және кездейсоқ шамалардың таралу заңының кездейсоқ сұрыптауларын модельдеу негізінде осы таралуларды түрлендірудің Монте-Карло әдісі.

Осы әдістер бойынша кориолис шығын өлшеуіш өлшеулерінің анықтамалдығын есептеу үшін National Instruments компаниясының NI LabView графикалық программалау ортасында программалық интерфейс құрылған. Кориолис шығын өлшеуіш өлшеулерінің анықтамалдығын бағалау үшін құрастырушы қателіктеріне сызықты тәуелді болатын математикалық модель құрастырылған.

Осы әдістермен орындалған есептеулерді салыстырмалы талдауы келесіні көрсетті: өлшеулер анықталмағандығын бағалаудың Монте-Карло әдісі GUM бойынша әдісінің альтернативасы болып табылады, көп деген жағдайларда қолдануға қарапайым және өлшеу анықталмағандық бағасының қажетті нақтылығын қамтамасыздандырады.

**Кілттік сөздер:** кориолис шығын өлшеуіш, өлшеулердің анықталмағандығы, өлшеу анықталмағандығын бағалау әдістері: GUM бойынша және Монте-Карло әдісі.

## **СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ**

**С.Г. Хан<sup>1</sup>, Л.К.Ибраева<sup>1</sup>, Г.Н.Букаева<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>НАО «Алматинский университет энергетики и связи», г. Алматы, Казахстан

**Аннотация.** В работе рассмотрены проблемы оценивания неопределенности измерения кориолисового расходомера двумя методами: широко используемым методом вычисления неопределенности, предлагаемым в Международном Руководстве по оценке неопределенности измерения (GUM:1993), основанного на байесовском подходе, и методом трансформирования распределений на основе моделирования случайных выборок из этих распределений - методом Монте-Карло.

Для выполнения по этим методам расчетов неопределенности измерения кориолисового расходомера разработана программная оболочка в среде графического программирования NI LabView компании National Instruments. Для оценивания неопределенности измерения кориолисового расходомера составлена математическая модель, представляющая линейную зависимость составляющих погрешностей.

Выполненный сравнительный анализ результатов расчетов по этим методам показал, что метод Монте-Карло является практической альтернативой методу оценивания неопределенности измерения по GUM, во многих случаях более простой в применении и обеспечивает необходимую достоверность оценивания неопределенности измерения.

**Ключевые слова:** кориолисовый расходомер, неопределенность измерения, методы оценки неопределенности измерения: по GUM и метод Монте-Карло.

МРНТИ 50.47, 29.31.01

<sup>1</sup>Б.Х.Айтчанов, <sup>2</sup>А.С.Тергеусизова

<sup>1</sup>Университет имени Сулеймана Демиреля, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Казахский Национальный Университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

## ПРИМЕНЕНИЕ СИГМА ЧАСТОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ВЫТЯЖКИ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

**Аннотация.** В статье рассматривается процесс вытяжки оптического волокна как объект автоматического управления. Объект управления – зона перетяжки оптического волокна, на выходе объекта получают волокно заданного диаметра. Управление диаметром волокна осуществляется путем изменения скорости вытяжки и температуры печи расплава заготовки. Система управления зоной перетяжки построена с учетом тренда диаметра заготовки. Дана структура автоматизированной башни и структурная схема управления вытяжки оптического волокна. Также важной задачей является – увеличение динамической точности регулирования. Низкая динамическая точность регулирования обусловлена инерционностью объекта регулирования и так называемым «транспортным запаздыванием». Последнее определяется временем прохождения вытягиваемого стеклоизделия от зоны формирования до датчика, определяющего размеры поперечного сечения. В итоге возможно появление автоколебаний. Для решения задачи регулирования температуры, наиболее перспективным является применение динамических частотно-импульсных систем автоматического управления объектами с запаздыванием. Системы управления данного класса характеризуются наличием нелинейных преобразований сигналов, а также параметрическими обратными связями. В статье представлено математическое описание частотно-импульсных систем управления объектами с запаздыванием.

**Ключевые слова:** сигма, частотно-импульсный модулятор, транспортное запаздывание, стохастическая частотно-импульсная система с запаздыванием, вытяжка оптического волокна, зона перетяжки, скорость вытяжки, натяжение вытяжки, диаметр оптического волокна.

**Введение.** Как известно, оптическое волокно (ОВ) как физическая среда для передачи информации имеет ряд существенных преимуществ по сравнению с прочими, а именно: широкая полоса частот и низкое затухание сигнала обеспечивает передачу больших объемов информации на большие расстояния без необходимости регенерации сигнала. Оптическое волокно нечувствительно к электромагнитным полям, что предотвращает возникновение наведенных помех при передаче информации, волоконно-оптические линии связи имеют значительно меньшие объем и массу в расчете на единицу передаваемой информации, чем любые другие.

Технологический процесс изготовления градиентных оптических волокон состоит из двух технологических этапов – изготовления заготовки (преформы) с параболическим профилем показателя преломления сердцевины и последующей вытяжки волокна из преформы.

**Проектируемая система автоматизации.** Главным узлом, в котором формируются оптические свойства волокна, является высокотемпературная печь, в которую вводится заготовка, на нижнем конце которой образуется капля расплава – зона перетяжки (луковица). Заданные оптические свойства волокна, в том числе коэффициент затухания, достигаются конкретным режимом вытяжки. По результатам измерения параметров конкретной преформы для нее задаются индивидуальные значения главных режимных параметров вытяжки – скорости вытяжки -  $v_T$  и натяжения вытяжки -  $F_0$ , сочетание которых обеспечивает оптимальную форму зоны перетяжки на конце преформы, определяющую заданные оптические характеристики готового волокна. Натяжение вытяжки – это сила натяжения вытяжки волокна  $F_0$ , между зоной перетяжки и фильерой первичного лакового покрытия. В производстве оптических волокон и в соответствующей

производственной документации, натяжение вытяжки принято измерять и нормировать в граммах (г), а не в единицах системы СИ.

Цель управления проектируемой системы автоматизации – управление температурой высокотемпературной печи (ВТП)  $T_{ВТП}$ , определяющей натяжение вытяжки при известной скорости, и управление приводами устройства подачи преформы и тягового колеса, определяющим скорость подачи преформы -  $v_n$  и скорость вытяжки -  $v_T$ . При этом алгоритм управления процессом вытяжки должен обеспечивать заданное сочетание натяжения и скорости вытяжки при существующих возмущающих воздействиях.

Типовая башня вытяжки оптического волокна представлена на рисунке 1 [1]. Она оснащена локальными системами автоматического управления скорости подачи преформы, скорости вытяжки, температуры высокотемпературной печи, которые минимизируют влияние возмущающих воздействий, имеющих характер случайных процессов.

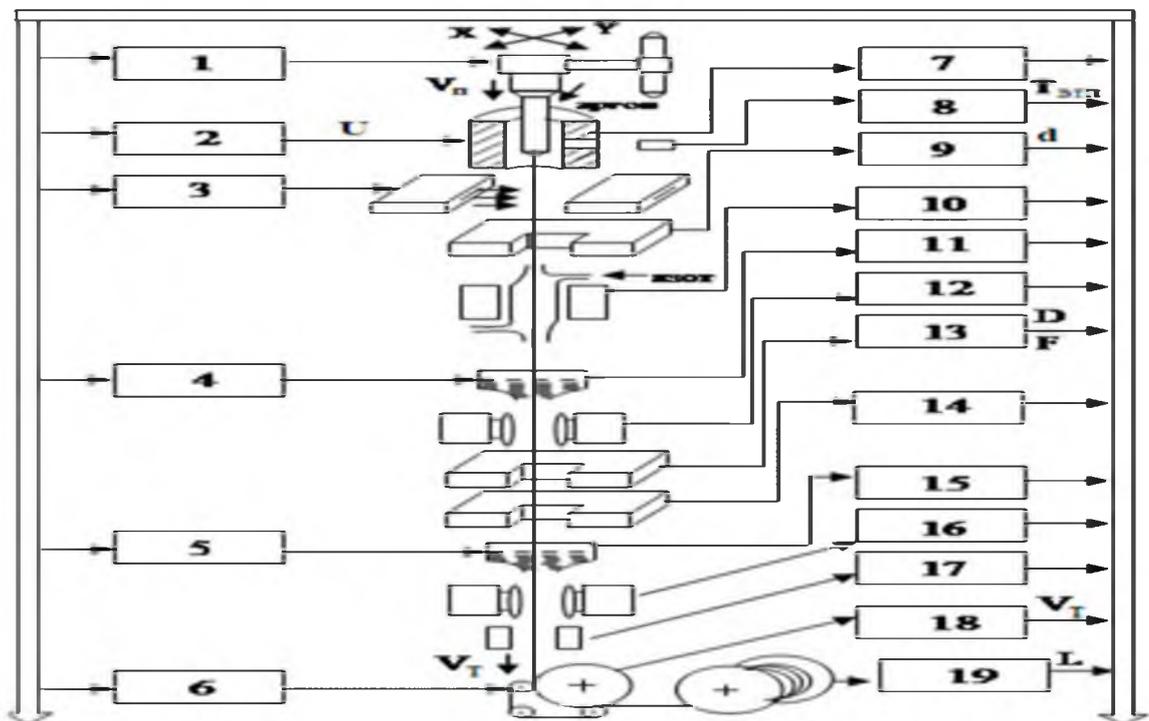


Рисунок 1 – Автоматизированная башня вытяжки оптического волокна

В рисунке 1: 1 - узел подачи и позиционирования заготовки по осям X и Y; 2 - генератор напряжения U нагревательного элемента; 3 - узел питания газовых инжекторов датчика натяжения; 4 - узел питания и позиционирования фильеры первичного покрытия; 5 - узел питания и позиционирования фильеры вторичного покрытия; 6 - электропривод тягового устройства; 7 - высокотемпературная печь; 8 - оптический пирометр, измеряющий  $T_{ВТП}$ ; 9 - лазерный измеритель диаметра  $d$  и осевого положения волокна X и Y; 10 - охлаждающая камера; 11 - лаковая фильера первичного покрытия; 12 - ультрафиолетовая печь первичного покрытия; 13 - лазерный измеритель диаметра волокна  $D$  по лаковому покрытию; 14 - измеритель эксцентricности покрытия; 15 - лаковая фильера вторичного покрытия; 16 - ультрафиолетовая печь вторичного покрытия; 17 - измеритель натяжения волокна с лаковым покрытием; 18 - тяговое устройство; 19 - приёмное устройство с датчиком длины L.

Построение системы автоматического управления натяжением вытяжки и диаметром волокна, в свою очередь, требует построения адекватных моделей управляемого объекта. В качестве объекта управления в работе рассматривается зона перетяжки, в которой

формируются натяжение и диаметр волокна. А именно, управляющее воздействие (температура ВТП) поступает на вход нелинейной статической безынерционной подструктуры, выходное воздействие которой преобразуется линейной инерционной подструктурой. Физически нелинейная характеристика может быть объяснена нелинейной зависимостью поверхностного натяжения зоны перетяжки от её температуры. А линейная инерционность может быть объяснена тем, что при переходе к другой температуре печи плавно меняется объем зоны перетяжки.

На рисунке 2 показана структурная схема управления системой вытяжки волокна, содержащая контур автоматического управления диаметром волокна и натяжением вытяжки [2].

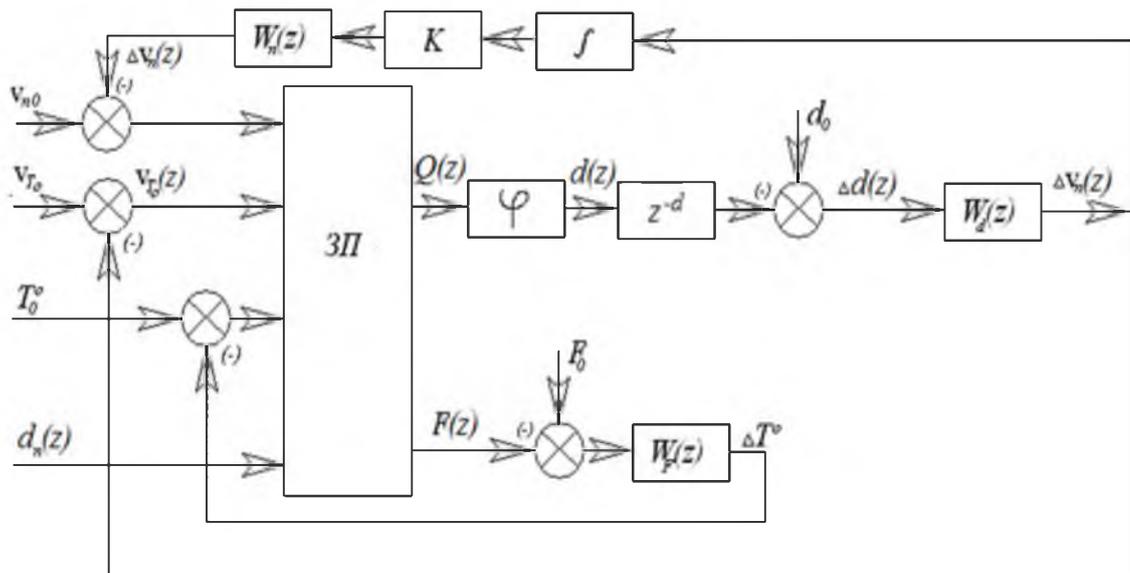


Рисунок 2 - Структурная схема системы управления технологическим процессом вытяжки волокна

На рисунке 2: ЗП - зона перетяжки;  $d$  - запаздывание, равное времени движения вытягиваемого волокна от луковницы до датчика диаметра;  $W_n(z)$ - цифровой регулятор скорости подачи преформы;  $W_f(z)$ - цифровой регулятор натяжения вытяжки;  $W_d(z)$ - цифровой регулятор диаметра волокна;  $K$  - коэффициент пропорциональности между сечениями волокна и преформы;  $\varphi$  - статический коэффициент, отражающий взаимосвязь диаметра волокна и потока расплава, поступающего из луковницы

Также важной задачей является – увеличение динамической точности регулирования. Низкая динамическая точность регулирования обусловлена инерционностью объекта регулирования и так называемым «транспортным запаздыванием». Последнее определяется временем прохождения вытягиваемого стеклоизделия от зоны формирования до датчика, определяющего размеры поперечного сечения. В итоге возможно появление автоколебаний.

Для решения задачи регулирования температуры, наиболее перспективным является применение динамических частотно-импульсных систем автоматического управления объектами с запаздыванием. Системы управления данного класса характеризуются наличием нелинейных преобразований сигналов, а также параметрическими обратными связями [3].

**Частотно-импульсная система стабилизации.** В настоящей работе рассматривается частотно-импульсная система стабилизации (ЧИСС) температуры высокотемпературной печи вытяжки оптического волокна.

ЧИСС температуры высокотемпературной печи вытяжки оптического волокна - замкнутая система, состоящая из  $\Sigma$ -ЧИМ и приведенной непрерывной части (ПНЧ), структурная схема приведена на рисунке 3 [4].

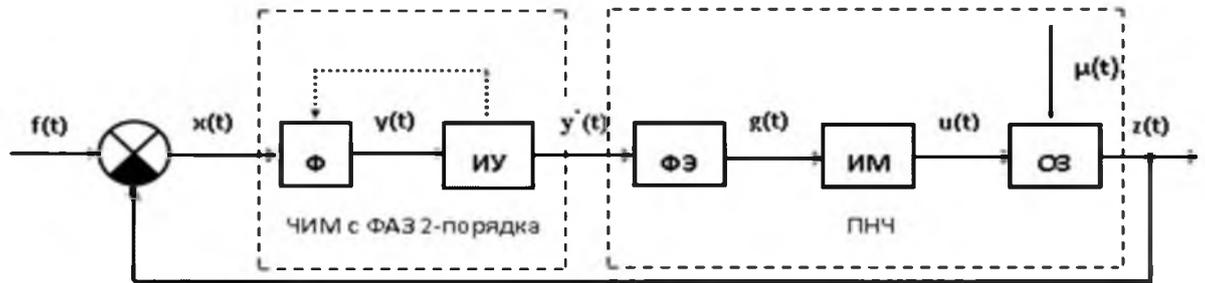


Рисунок 3- Структурная схема  $\Sigma$ -ЧИСС

На входе системы действует стационарный случайный процесс  $f(t)$ . Приведенная непрерывная часть ПНЧ состоит из последовательного соединения управляемого объекта с запаздыванием, исполнительного механизма (ИМ) и формирующего элемента (ФЭ), задающего требуемую форму управляющих импульсов.

В общем случае НЧ характеризуется как нелинейная динамическая система со случайными параметрами и представляется некоторым функциональным уравнением следующего вида [4]:

$$z(t) = H[\lambda, \tau_0, z(\tau), g(\tau)/t_0 \leq \tau \leq t] \quad (1)$$

Где  $H$  - непрерывный нелинейный функционал; параметр  $\lambda$  характеризует случайность параметров функционала  $H$ ;  $g(t)$  - последовательность управляющих случайных импульсов заданной формы;  $\tau_0$  - время запаздывания управляемого объекта управления.

Уравнение движения  $\Sigma$  - частотно-импульсного модулятора состоит из уравнения движения фильтра  $\Phi$  и уравнений, определяющих моменты появления и знак импульсов, и операции сброса.

$\Sigma$ -ЧИМ второго порядка представляет собой последовательное соединение фильтра, реализованного в виде апериодического звена 2-порядка и импульсного устройства ИУ.

Фильтр, реализованный в виде апериодического звена первого порядка описывается следующей передаточной функцией:

$$D(p) = \frac{k_\phi}{p + \alpha_\phi} \quad (2)$$

где  $k_\phi$  - коэффициент усиления апериодического звена 1-порядка, а  $\alpha_\phi$  - время инерционности.

В работе в качестве объекта управления рассматривается зона перетяжки, в которой формируется и натяжение, и диаметр волокна. Непрерывная передаточная функция зоны перетяжки зависит от ее длины, скорости вытяжки и может быть описана в виде:

$$W_L(p) = \frac{T_L(p)}{T_{ВТП}(p)} = \frac{e^{-p\tau_L}}{(1 + T_1p)(1 + T_2p)} \quad (3)$$

Где,  $T_1$  – постоянная времени, определяемая гидродинамическими свойствами зоны перетяжки;  $T_2$  - постоянная времени, определяющая время нагрева зоны перетяжки;  $\tau_L$  - время запаздывания, определяемое длиной зоны перетяжки,  $T_L$  - температура зоны перетяжки.

После очевидных преобразований уравнения системы приведем к виду:

$$x(t) = f(t) - H[\lambda, \tau_0, z(\tau), \int_0^t g_\Phi(t - \theta) \dot{y}(\theta) d\theta / t_0 \leq \tau \leq t] \quad (4)$$

$$\dot{y}(t) = \sum_n \lambda_{n+1} \delta(t - t_{n+1}) \quad (5)$$

$$\lambda_{n+1} = \text{sign } y(t_{n+1} - 0) \quad (6)$$

$$y(t_{n+1} - 0) = \lambda_{n+1} \Delta \quad (7)$$

$$y(t_n + 0) = 0 \quad (8)$$

$$y(t) = \Phi \left[ \frac{y(\tau)x(\tau)}{t_n + \tau_m \leq \tau \leq t_{n+1} - 0} \right] \quad (9)$$

Содержательное описание и математическая формулировка задачи стохастической устойчивости динамических частотно-импульсных систем управления объектами с запаздыванием даны соответственно в [5] и [6].

Процедура анализа стохастической устойчивости ЧИСС температуры высокотемпературной печи вытяжки оптического волокна состоит из трех этапов:

1. Структурное преобразование  $\Sigma$ -ЧИМ, т.е. получение структурной модели - нелинейной эквивалентной исходному модулятору системы;
2. На основе структурной модели разработка нелинейных моделей в классе стохастических дифференциальных уравнений Ланжевена и Ито.
3. Разработка методов анализа стохастической устойчивости ЧИСС температуры высокотемпературной печи вытяжки оптического волокна.

Процедура построения нелинейной системы, эквивалентной динамической ЧИМ, не содержащий параметрических обратных связей, подробно описана в работе [7].

В общем случае, структурную схему системы, эквивалентной по отношению к исходной системе (рисунок 3), можно представить в виде рисунка 4.

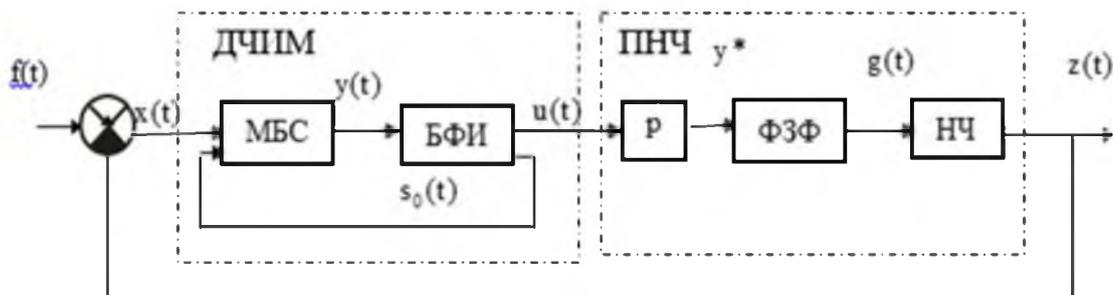


Рисунок 4 – Эквивалентная стохастическая система

Как видно из рисунка 4, в эквивалентной системе модулятор заменен тремя блоками: блоком сброса - БС, блоком формирования импульсов - БФИ и дифференцирующим звеном с передаточной функцией  $W(p) = p$ .

Процессы, протекающие в блоке сброса БС тождественны с процессам, протекающим в фильтре  $\Phi$  модулятора. Здесь осуществляется преобразование процесса ошибки  $x(t)$  в непрерывный процесс  $y(t)$  на отрезке  $t_n + 0 \leq t \leq t_{n+1} - 0$ . Выход  $y(t)$  претерпевает разрывы первого рода в моменты  $t = t_n + 0$ , т.е. выполняется:

$$\bar{y}(t_{n+1} - 0) = y(t_n + 0) + k_u \left[ \int_{t_n+0}^{t_n+\tau_m} x(\tau) d\tau + \int_{t_n+\tau_m}^{t_{n+1}-0} x(\tau) d\tau \right] \quad (10)$$

Выполнение условия (9) осуществляется за счет принудительного удержания выхода  $y(t)$  в нулевом состоянии в течение времени запаздывания объекта после выдачи управляющего импульса (5). В отличие от блока сброса обычного ДЧИМ [8, 9], в структуре блока сброса системы с запаздыванием присутствует дополнительный блок формирования сигнала  $\mu(t)$  [4, 10].

Назначение этого дополнительного блока заключается в формировании сигнала, принудительно удерживающего выход фильтра  $\Phi$  модулятора  $y(t)$  в нулевом положении после выдачи импульса управления в течение времени запаздывания объекта.

В блоке формирования импульсов БФИ осуществляется операция сравнения процесса  $y(t)$  с порогом  $\pm\Delta$  и, при выполнении условия (9), формируется два импульса: первый,  $\dot{y}(t) = \sum_n \lambda_{n+1} \delta(t - t_{n+1})$  (3) - служит выходом ДЧИМ; второй  $-s_0(t) = \delta(t - t_{n+1})$  служит сигналом сброса и поступает обратно в БС.

Структурная схема блока формирования импульсов БФИ приведена на рисунке 5. Она является инвариантной к конкретному виду модулятора. В то же время структурная схема блока сброса БС зависит от свойств фильтра  $\Phi$  в модуляторе.

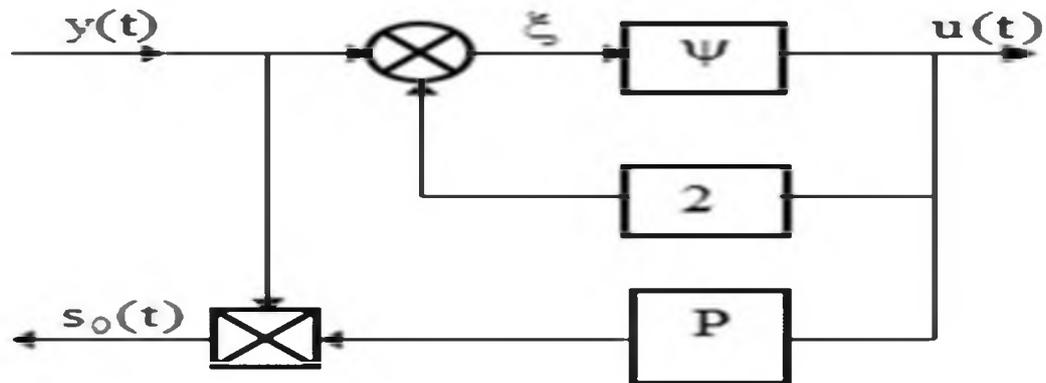


Рисунок 5 - Структурная схема блока формирования импульсов

Следует заметить, что в модели ДЧИМ только блок сброса БС [9] зависит от свойств фильтра в модуляторе.

**Блок сброса для фильтра типа апериодического звена.** Рассмотрим случай, когда в качестве управляющего устройства для управления объектами с запаздыванием используется  $\Sigma$ -ЧИМ. В этом случае фильтр  $\Phi$  модулятора характеризуется передаточной функцией вида [4, 22]:

$$W(p) = \frac{c_v}{p + p_v} \quad (11)$$

В соответствии с уравнениями:

$$y(t_{n+1} - 0) = \int_{t_n + \tau_0}^{t_{n+1} - 0} w(t_{n+1} - \tau) x(\tau) d\tau = \lambda_{n+1} \Delta \quad (12)$$

$$W(t) = k_u = \text{const} \quad (13)$$

(12) и (13) для модифицированного  $\Sigma$  - ЧИМ моменты появления  $t_{n+1}$  определяются из уравнения:

$$y_v(t_{n+1} - 0) = c_v \int_{t_n + \tau_0}^{t_{n+1} - 0} \exp(-p_v(t_{n+1} - \tau)) x(\tau) d\tau = \lambda_{n+1} \Delta \quad (14)$$

Где

$$\lambda_{n+1} = c_v \int_{t_n + \tau_0}^{t_{n+1} - 0} \exp(-p_v(t_{n+1} - \tau)) x(\tau) d\tau \quad (15)$$

Рассмотрим произвольный момент времени  $t_n$ . Пусть выходной сигнал в этот момент времени равен  $y_v(t_n + 0)$ .

Тогда для моментов времени  $t \leq t_n$ :

$$\bar{y}_v(t) = e^{-p_v(t-t_n)} y_v(t_n + 0) + c_v \int_{t_n}^t e^{-p_v(t-\tau)} x(\tau) d\tau \quad (16)$$

где  $y_v(t)$ - выход фильтра при начальном условии  $y_v(t_n + 0)$ .

Уравнение (16) перепишем в следующем виде:

$$\bar{y}_v(t) = e^{-p_v(t-t_n)} y_v(t_n + 0) + c_v \left[ \int_{t_n + 0}^{t_n + \tau_m} e^{-p_v(t-\tau)} x(\tau) d\tau + \int_{t + \tau_m}^{t_{n+1} - 0} e^{-p_v(t-\tau)} x(\tau) d\tau \right] \quad (17)$$

Из сопоставления (14) и (17) следует, что  $\bar{y}_v(t) = y_v(t)$ , если

$$\begin{aligned} \bar{y}_v(t) &= e^{-p_v(t-t_n)} y_v(t_n + 0) \\ &+ c_v \int_{t_n + 0}^{t_n + \tau_m} e^{-p_v(t-\tau)} [x(\tau) - \mu(\tau)] d\tau \\ &+ c_v \int_{t + \tau_m}^t e^{-p_v(t-\tau)} x(\tau) d\tau - c_v \int e^{-p_v(t-\tau)} \eta(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (18)$$

Для формирования сигнала  $\mu(t)$  представим его в виде произведения двух сигналов:

$$\mu(t) = x(t)\chi(t) \quad (19)$$

$$\chi(t) = \int_{t_n}^t q_{\tau_m}(t - \tau)s(\tau)d\tau \quad (20)$$

где

$$q_{\tau_m}(t) = L^{-1} \left[ \frac{1 - \exp(-\tau_m p)}{p} \right]$$

Импульсная переходная функция формирующего звена первого порядка. А сигнал  $\eta(t)$  формируется по выражению:

$$\eta(t) = s(t) \frac{y_v(t)}{c_v} \quad (21)$$

Структурная схема блока сброса  $\Sigma$ -ЧИМ, применяемого для управления объектами с запаздыванием, приведена на рисунке 6.

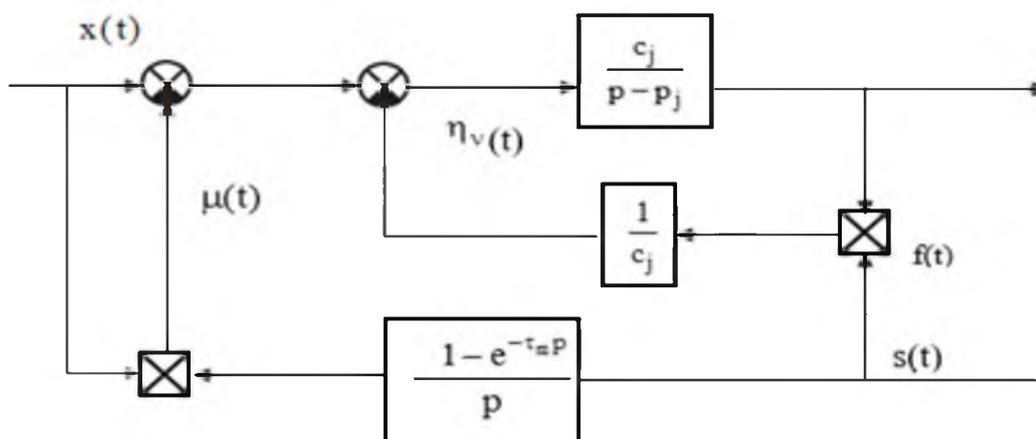


Рисунок 6 - Блок сброса  $\Sigma$ -ЧИМ системы с запаздыванием

Под мажорирующей системой понимается система, в которой процессы на выходе блока сброса БС  $y_m(t)$  и выходе приведенной непрерывной части ПНЧ  $z_m(t)$  мажорируют соответствующие процессы эквивалентной системы (рисунок 4) в смысле некоторых статистических характеристик. Например:

$$\max_{t_0, y_0} M |y(t, t_0, y_0)|^p \leq \max_{t_0, y_0} M |y_m(t, t_0, y_0)|^p \quad (22)$$

$$\max_{t_0, Y_c} M |z(t, t_0, z_0)|^p \leq \max_{t_0, Y_c} M |z_m(t, t_0, z_0)|^p \quad (23)$$

В полученной системе отсутствуют нелинейные обратные связи операции сброса. Они заменяются внешними случайными возмущениями, найденными из условия мажорирования.

Для построения мажорирующей системы рассмотрим сигнал  $s_0\{t\}$  обратной связи операции сброса эквивалентной системы (рисунок 4). Он представляет собой последовательность независимых импульсов со случайными временными положениями:

$$s_0(t) = \sum_1^N \delta(t - t_n), \quad 0 \leq t \leq T \quad (24)$$

Независимость  $\delta(t - t_i)$  и  $\delta(t - t_j), i \neq j$  вытекает из наличия операции сброса. Обозначим среднюю продолжительность между импульсами в сигнале  $s_0(t)$  через  $\tau_0$ . Далее вместо сигнала  $s_0(t)$  рассмотрим сигнал  $\xi(t)$ , состоящий из непересекающихся импульсов одинаковой формы с длительностью  $\theta$  и амплитудой  $\frac{1}{\theta}$  (при  $\theta \rightarrow 0$  получим  $\delta$ -импульсы). Средняя продолжительность  $\xi$  между импульсами в сигнале  $\xi(t)$  удовлетворяет неравенству:

$$\xi < \tau_0 \quad (25)$$

т.е. шум  $\xi(t)$  является более густым, чем сигнал  $s_0(t)$ . Шум  $\xi(t)$  характеризуется малым, но конечным временем корреляции  $\tau_k$ , а спектр его достаточно широкий. Такой шум возможен, когда выполняется неравенство:

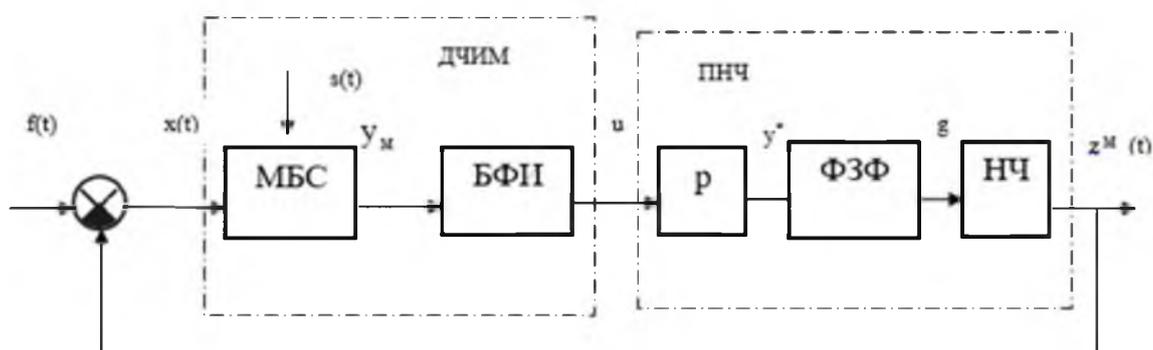
$$\tau_k \ll \tau_c$$

где  $\tau_c$  - наименьшая постоянная времени элементарных фильтров в блоке сброса БС, т.е.:

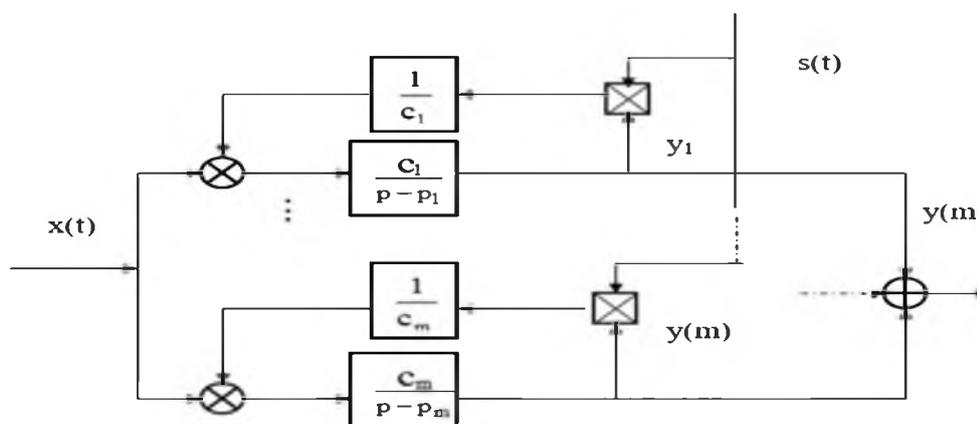
$$\tau_c = \min \left\{ \tau_i = \frac{p_i}{i} = 1, m \right\} \quad (26)$$

можно заменить эквивалентным белым шумом  $s_0(t)$  с интенсивностью  $\delta_0^2$ .

На рисунке 7а приведена структурная схема мажорирующей стохастической частотно-импульсной системы, на рисунке 7б - структурная схема блока сброса с линейным фильтром.



а) структурная схема мажорирующей стохастической частотно-импульсной системы



б) структурная схема блока сброса с линейным фильтром

Рисунок 7 – Мажорирующая стохастическая система

В дальнейшем задача построения мажорирующей системы сводится к оценке интенсивности  $\delta_0^2$  из условия мажорирования. Она зависит от значений параметров фильтра в ДЧИМ и модулируемого сигнала  $x(t)$ .

Корреляционную функцию шума вида  $\xi(t)$  можно представить в виде:

$$R(\tau) = \frac{1}{\tau^2} k(\tau) \quad (27)$$

где  $k(\tau)$  - нормированная узкая функция. Тогда интенсивность заменяющего белого шума  $s(t)$  определяется соотношением:

$$\delta_0^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\tau^2} k(\tau) d\tau = 2 \frac{\tau_k}{\tau^2} \quad (28)$$

Можно заметить, что между временем корреляции  $\tau_c$  шума  $\xi(t)$  и возможно минимальным периодом  $T_0$  появления импульсов в ДЧИМ имеет место неравенство:

$$0 < \tau_k \leq T_0 = \min \left\{ \frac{T_n}{n} = 1, 2, 3, \dots, N \right\} \quad (29)$$

В противном случае импульсы в последовательности  $\xi(t)$  будут независимыми (т.е. выполняется условие сброса). Тогда имеет место:

$$\delta_0^2 \leq 2 \frac{1}{\tau^2} T_0 \quad (30)$$

Среднюю продолжительность  $\tau$  между импульсами в последовательности  $\xi(t)$  можно оценить. Такая оценка вытекает из неравенства (30). Отсюда видно, что в последовательности  $\xi(t)$  имеются импульсы с меньшими интервалами появления, чем  $T_0$ , и большими. Тогда, для простоты можно считать среднюю продолжительность между импульсами равной:

$$\tau \cong T_0 \quad (31)$$

С учётом (30) неравенство (31) примет вид:

$$\delta_0^2 \leq \frac{2}{T_0} \quad (32)$$

Таким образом, установили, что интенсивность  $\delta_0^2$  мажорирующего белого шума  $s(t)$  удовлетворяет неравенству (32). Чем реже появляются импульсы, тем интенсивность заменяющего шума меньше, и наоборот. При этом не нарушается условие мажорирования (22) и (23), т.е. возможные отклонения процессов  $y_m(t)$  и  $z_m(t)$  мажорирующей системы будут не меньшими, чем процессов  $y(t)$  и  $z(t)$  эквивалентной системы (рисунок 7).

**Заключение.** В статье дан обзор проектируемой системы автоматизации, а именно принцип действия автоматизированной башни вытяжки оптического волокна и структурная схема системы автоматического управления технологическим процессом вытяжки волокна. Получена непрерывная передаточная функция зоны перетяжки. Рассмотрена частотно-импульсная система стабилизации (ЧИСС) температуры высокотемпературной печи вытяжки. Выполнен анализ стохастической устойчивости ЧИСС температуры печи вытяжки оптического волокна, а именно структурное преобразование  $\Sigma$ -ЧИМ, получена структурная модель нелинейной эквивалентной, исходному модулятору, системы. Дана мажорирующая стохастическая система.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Д.Б. Чостковский. Структурный синтез системы управления процессом вытяжки градиентных оптических волокон // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки» - 2010. - №4 (27). – С. 73-78
2. Б.К. Чостковский, Р.Ш.Галиулин. Математическое моделирование и управление технологическим процессом вытяжки оптических волокон // Вестник СамГТУ. Серия «Технические науки» - 2011. - №2(30). – С.52-57.
3. Б.Х.Айтчанов, А.С.Тергеусизова. Технологический процесс вытяжки оптических стержней как объект автоматизированного управления // Доклады Национальной академии наук Республики Казахстан – 2017. - №2.2017. – С. 91-95

4. Айтчанов Б.Х. Модели динамических частотно-импульсных систем автоматического управления объектами с запаздыванием // Модели и методы автоматизации управления производственными системами. – 1996. – № 2. – С. 65–73.
5. Айтчанов Б.Х. Методы математического описания частотно-импульсных систем управления объектами с запаздыванием // Вестник КазНТУ. – 2002. – № 2 (30). – С. 72-82.
6. Aitzhanov B.Kh., Nikulin V.V., Baimuratov O.A. Mathematical Modeling of Digital Pulse-Frequency Modulation Control Systems Developed for Objects with Transport Delay // The 2013 Chinese Control and Decision Conference. – 2013. – P. 1407-1411
7. Aitzhanov B.Kh., Kurmanov B.K., Umarov T.F., Dynamic Pulse-Frequency Modulation in Objects Control with Delay // Asian Journal of Control. – 2012. – Vol. 14, № 6. –P. 1662-1668
8. Айтчанов Б.Х., Алдибекова А.Н. Применение динамического частотно-импульсного модулятора в системах управления с использованием ядерного магнитного резонанса в устройствах омагничивания жидкостей // Вестник КазНТУ– 2014. – №5 (105). – С. 148-155.
9. B. H. Aitchanov, Sh. K. Aitchanova, O. A. Baimuratov, A. N. Aldibekova. A Simplified Model of the Control System with PFM // ICITE 2015: XII International Conference on Information Technology and Engineering. – Paris France May 18-19, 2015. - 17 (5). – Part IX. –P. 1465-1468.
10. B.H. Aitchanov. Time-domain quantization in dynamic pulse-frequency systems with transport delay. Poisk, Natural and technical sciences series, 209-214.
11. B.H. Aitchanov. On the analysis of stochastic digital pulse-frequency modulation systems with transport delay. Poisk, Natural and technical sciences series, 219-223.

#### REFERENCES

1. D.B.Chostkovskiy. Strukturnyy sintez sistemyi upravleniya protsessom vytyazhki gradientnyih opticheskikh volokon // Vestnik SamGTU. Seriya «Tehnicheskie nauki» - 2010. - №4(27). – S. 73-78
2. B.K. Chostkovskiy, R.Sh.Galiulin. Matematicheskoe modelirovanie i upravlenie tehnologicheskim protsessom vytyazhki opticheskikh volokon // Vestnik SamGTU. Seriya «Tehnicheskie nauki» - 2011. - №2(30). – S.52-57.
3. B.H.Aitchanov, A.S.Tergeusizova. Tehnologicheskiiy protsess vytyazhki opticheskikh sterzhney kak ob'ekt avtomatizirovannogo upravleniya // Dokladyi Natsionalnoy akademii nauk Respubliki Kazahstan – 2017. - №2.2017. – S. 91-95
4. Aitchanov B.H. Modeli dinamicheskikh chastotno-impulsnyih sistem avtomaticheskogo upravleniya ob'ektami s zapazdyivaniem // Modeli i metodyi avtomatizatsii upravleniya proizvodstvennyimi sistemami. – 1996. – № 2. – S. 65–73.
5. Aytchanov B.H. Metodyi matematicheskogo opisaniya chastotno-impulsnyih sistem upravleniya ob'ektami s zapazdyivaniem // Vestnik KazNTU. – 2002. – № 2 (30). – S.72-82.
6. Aitchanov B.Kh., Nikulin V.V., Baimuratov O.A. Mathematical Modeling of Digital Pulse-Frequency Modulation Control Systems Developed for Objects with Transport Delay // The 2013 Chinese Control and Decision Conference. – 2013. – P. 1407-1411
7. Aitzhanov B.Kh., Kurmanov B.K., Umarov T.F., Dynamic Pulse-Frequency Modulation in Objects Control with Delay // Asian Journal of Control. – 2012. – Vol. 14, № 6. –P. 1662-1668

8. Aytchanov B.H., Aldibekova A.N. Primenenie dinamicheskogo chastotno-impulsnogo modulyatora v sistemah upravleniya s ispolzovaniem yadernogo magnitnogo rezonansa v ustroystvah omagnichivaniya zhidkostey // Vestnik KazNTU

9. B. H. Aitchanov, Sh. K. Aitchanova, O. A. Baimuratov, A. N. Aldibekova. A Simplified Model of the Control System with PFM // ICITE 2015: XII International Conference on Information Technology and Engineering. – Paris France May 18-19, 2015. - 17 (5).– Part IX. –P. 1465-1468.

10. B.H. Aitchanov. Time-domain quantization in dynamic pulse-frequency systems with transport delay. Poisk, Natural and technical sciences series, 209-214.

11. B.H. Aitchanov. On the analysis of stochastic digital pulse-frequency modulation systems with transport delay. Poisk, Natural and technical sciences series, 219-223.

## **ОПТИКАЛЫҚ ТАЛШЫҚТЫ ТАРТУ ПРОЦЕСІНДЕ АВТОМАТТЫ БАСҚАРУДЫҢ ДИНАМИКАЛЫ ЖИІЛІКТІК-ИМПУЛЬСТІК ЖҮЙЕЛЕРДІ ҚОЛДАНУ**

<sup>1</sup>Б.Х.Айтчанов, <sup>2</sup>А.С.Тергеусизова

<sup>1</sup>Сулейман Демирел университеті, Алматы, Қазақстан  
Әл ө Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

**Аңдатпа.** Мақалада оптикалық талшықты тарту процесі автоматты басқару объектісі ретінде қарастырылған. Басқару объектісі ретінде оптикалық талшықты тарту аймағы алынған, ал объектінің шығысында берілген диаметрмен талшық алынады. Талшықтың диаметрін басқару тарту жылдамдығын өзгертумен және дайын затты балқытатын печтің температурасымен орындалады. Тарту аймағының басқару жүйесі дайын заттың диаметрін ескере отырып құрастырылған. Автоматтандырылған мұнаның құрылысы және оптикалық талшықты тартудың басқарылатын құрылымдық сұлбасы көрсетілген. Сонымен қатар маңызды мақсаты ретінде реттеудің динамикалық дәлдігі саналады. Реттеудің динамикалық дәлдігінің төмендігі реттеу объектісінің инерттілігіне және «транспорттық кешігуіне» байланысты. Соңында құрылған аймақтан датчикке дейінгі шыны бұйымның тартылып алынған уақыт аралығы анықталаған, ол арқылы көлденең қиманың өлшемі анықталады. Нәтижесінде автотербелістің болуы мүмкін. Температураны реттеу мақсатын шешу үшін кешігетін объекіден тұратын динаимкалы жиілікті-импульсті автоматты басқару жүйесін қолдану ыңғайлы болып келеді. Бұл басқару жүйесі сигналдардың сызықты емес түрленуінің және параметрлік кері байланыстың болуымен сипатталады. Мақалада кешігетін объекіден тұратын динаимкалы жиілікті-импульсті автоматты басқару жүйесінің математикалық жазылуы көрсетілген.

**Тірек сөздер:** Динамикалы жиілікті-импульсті модулятор, транспортты кешігу, кешігуден тұратын жиілікті-импульсті жүйе, оптикалық талшықты тарту, тарту аймағы, тарту жылдамдығы, оптикалық талшықтың диаметрі.

## **APPLICATION OF DYNAMICIC FREQUENCY-PULSE AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS IN THE OPTICAL FIBER EXHAUST**

<sup>1</sup>Aitchanov B.H., <sup>2</sup>Tergeussizova A.S.,

<sup>1</sup>Suleyman Demirel University

<sup>2</sup>Kazakh National University named after al-Farabi

**Abstract.** The article deals with the process of drawing the optical fiber as an object of automatic control. The control object is the zone of the optical fiber constriction, and at the output of the object a fiber of a given diameter is obtained. The fiber diameter is controlled by changing hood speed and furnace temperature of the sample melt. The control system of the constriction zone is constructed taking into account the trend of the sample diameter. The structure of the automated tower and the structural control scheme of the optical fiber extraction are given. Another important task is to increase the dynamic accuracy of regulation. Low dynamic accuracy of regulation is due to the inertia of the regulated object and the so-called "transport delay". The latter is determined by the time of the extracted glassware passage from the formation zone to the sensor determining the dimensions of the cross section. As a result, self-oscillations may occur. To solve the problem of temperature control, the most promising is the use of dynamic frequency-pulse systems for automatic control of objects with delay. Control systems of this class are characterized by the presence of nonlinear transformations of signals, as well as the parametric feedbacks. The article gives the information on Mathematical description of object's frequency-impulse control systems with delay.

**Key words:** Dynamic frequency-pulse modulator, transport delay, stochastic frequency-pulse system with delay, extraction of optical fiber, zone of constriction, hood speed, hood tension, diameter of optical fiber.

**МРНТИ 55.01.85**

**А.К.Аталыкова**

Алматинский Университет Энергетики и Связи, г. Алматы, Республика Казахстан

## **МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИЗДЕЛИЙ ТИПА ТЕЛ ВРАЩЕНИЯ**

**Аннотация.** В статье рассмотрены методы контроля динамических характеристик изделий типа тел вращения. Известно, что главной динамической характеристикой изделий типа тел вращения, влияющей на эксплуатационные качества, является радиальное смещение центра масс (РСЦМ). Отклонение указанной характеристики от норм приводит к снижению точности и уменьшению срока службы приборов и машин [1]. Особенно велико значение влияния на качественную работу оборудования таких параметров, как некруглость и РСЦМ, несоблюдение которых приводит к возникновению неуравновешенных радиальных сил, которые являются источниками вибраций, снижения точности повышенного износа деталей, уменьшения срока службы и т.д., поэтому эти изделия должны строго контролироваться по вышеназванным параметрам.

В некоторых машинах РСЦМ создаются искусственно и они необходимы для выполнения машиной целевых функций. Но для основной массы машин и приборов дисбалансы недопустимы, так как они являются источниками вынужденных колебаний как отдельных деталей, так и машины в целом, вместе с фундаментом. Эти колебания могут передаваться близко расположенному оборудованию, измерительным и управляющим приборам, а также частям здания. Кроме того, вибрации оказывают вредное воздействие на организм человека. Большое влияние дисбаланс оказывает также на работу самих машин и механизмов, снижая ресурс, надежность и точность их работы вследствие появления преждевременного износа кинематических пар и т.д. В связи с этим проводятся многочисленные работы по ликвидации РСЦМ деталей типа тел вращения.

**Ключевые слова:** тела вращения, динамические характеристики, радиальное смещение центра масс, некруглость, неуравновешенные радиальные силы, дисбаланс, надежность, точность.

В точном машиностроении, приборостроении, подшипниках качения, оборудовании текстильной промышленности содержится большое количество деталей типа тел вращения, от качества их изготовления во многом зависит и качество работы всего оборудования. При разработке методов автоматического контроля основных динамических характеристик изделий имеем следующие предпосылки:

1) для обнаружения радиального смещения центров масс изделий необходимо придать ему вращательное движение. При этом возникают неуравновешенные силы и момент, которые оказывают воздействие на датчик, информирующий о величине отклонения динамических характеристик изделия.

2) в связи с тем, что основной характеристикой, влияющей, как было установлено выше, на качество изделий, является РСЦМ изделия, необходимо разработать методы автоматического контроля применительно к ней.

Проблема автоматического контроля динамических характеристик изделий точного машиностроения представляет определенную научную задачу, требующую решения. Для этого необходимо проанализировать все существующие методы контроля неуравновешенности изделий, по возможности модернизировать с целью использования их для контроля данного изделия и затем разработать новые методы, удовлетворяющие требованиям производства.

Все методы контроля неуравновешенности могут быть охарактеризованы и, следовательно, классифицированы воздействием, вызывающим появление

неуравновешенности детали в процессе контроля. На рисунке 1 приведена классификация методов контроля [2].

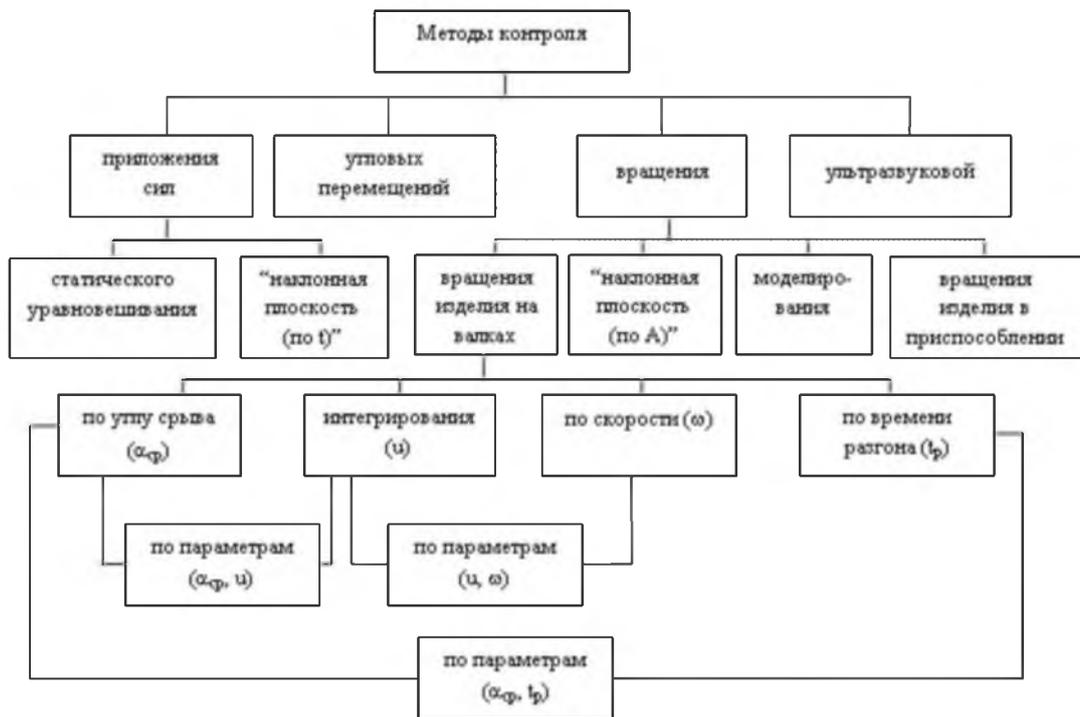


Рисунок 1 - Классификация методов контроля РСЦМ изделий типа тел вращения

Проведем сравнительный анализ рассмотренных методов.

Метод угловых колебаний хотя и дает сравнительно большую точность по сравнению с методом приложения сил, но очень сложен для практической реализации, особенно для мелких изделий с малым весом. При этом требуется время на установку и снятие изделий, что существенно снижает производительность труда и требует у детали наличие базирующей поверхности. В связи с этим данный метод неприемлем для контроля рассматриваемых изделий.

Метод приложения силы тяжести (временной способ) представляет интерес тем, что он высокопроизводителен в связи с совмещением движения транспортировки контроля; реализация данного метода проста, поэтому он подлежит теоретическому и экспериментальному изучению.

В методе вращения представляет интерес вращение контролируемого изделия в базирующем приспособлении тем, что он обладает высокой чувствительностью и может быть применен, если процесс контроля выборочный, так как данный метод требует установки и снятия детали, а также наличия базирующей поверхности у изделия. Требуется также высокая точность изготовления и сборки устройства контроля для получения высокой чувствительности.

Метод вращательно-поступательного движения контролируемого изделия («наклонная плоскость»), отличающийся по сравнению с предыдущим методом меньшей точностью, но большей производительностью, благодаря совмещению транспортного движения с процессом контроля, может быть применен для контроля изделий с большой массой и меньшей требуемой точностью. Конструктивно метод прост, и его реализация не требует особых сложностей.

Наиболее перспективным является метод свободного вращения контролируемого изделия на вращающихся опорных валках; помимо вышеотмеченных достоинств, метод позволяет учитывать и другие отклонения, что дает возможность интегрально осуществлять контроль качества изделий.

Интерес также представляет ультразвуковой метод. Однако, для разработки на его основе систем контроля необходимо провести работу по анализу технологического процесса изготовления изделий, а именно – необходимо доказать путем набора статистических данных, что смещение центра масс происходит за счет колебания стенок наружной детали.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод: для создания систем автоматического контроля изделия определенный интерес представляют в методе вращения изделия на валках, у которых процесс контроля более производителен.

Новый метод должен соответствовать следующим требованиям:

- простота процесса контроля;
- легкость реализации;
- возможность непосредственной оценки неуравновешенности без применения сложных счетно-решающих систем;
- интегральность, то есть возможность измерения нескольких параметров качества специзделий;
- универсальность, т.е. возможность контроля изделий разных размеров без сложной перенастройки и переналадки оборудования;
- высокая производительность с перспективой доведения контроля качества до стопроцентного уровня;
- возможность полной автоматизации процесса контроля.

Для выполнения поставленной задачи необходимо проведение следующих этапов работы:

- разработка нового метода контроля;
- разработка математической модели метода;
- разработка алгоритма расчета параметров устройства контроля;
- расчет массо-геометрических и режимных параметров информационно-измерительного устройства;
- разработка конструкции информационно-измерительного участка;
- разработка конструкции и расчет параметров загрузочного устройства;
- разработка системы съема информации и управления;
- расчет экономической эффективности применения автомата контроля на основе разработанного метода.

Выводы:

1. Разработана методика определения величины неуравновешенности изделия. Согласно методике можно определять значения неуравновешенной силы и момента, вызванных наличием дисбаланса контролируемых изделий, что дает возможность приступить к разработке методов и теории контроля;

2. Дан принцип построения схемы контроля (рисунок 1), на основе которого разработан ряд методов автоматического контроля динамических характеристик изделий;

3. На основании анализа для разработки и исследования были выбраны методы контроля РСЦМ по скорости и времени разгона как наиболее перспективные;

4. Сформулированы задачи исследований, которые позволят решить проблему контроля погрешности формы и РСЦМ изделий типа тел вращения с малыми массой и габаритами.

### СПИСОКЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Бирюков М.П. Динамика и прогнозирующий расчет механических систем. Высшая школа, 1980.-183 с.
- [2] Муслимов А.П., Киреев О.Л. Теоретические основы, методы и устройства контроля качества мелких изделий типа тел вращения. – СПб., 2007. – 117с.

### REFERENCES

- [1] Biryukov P. M. the Dynamics of prediction and calculation of mechanical systems. Higher school, 1980.- 183 p. (in Russ).
- [2] Muslimov A. P., Kireev O. L. Theoretical bases, methods and devices of quality control of small products of rotation. –Spb., 2007. – 117 p. (in Russ).

## АЙНАЛУ ДЕНЕЛЕР ТҮРІНДЕГІ БҰЙЫМДАРДЫҢ ДИНАМИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫН БАҚЫЛАУ ӘДІСТЕРІ

**А.К.Аталыкова**

Алматы Энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан

**Андатпа.** Мақалада айналу денелері түріндегі бұйымдардың динамикалық сипаттамаларын басқару әдістері қарастырылған. Айналу денелері түріндегі бұйымдардың эксплуатациялық сапасына әсер ететін басты динамикалық сипаттамалары масса орталығының радиалды жылжуы (МСРЖ) екені белгілі. Бұл сипаттаманың нормалардан ауытқуы құрылғылар мен машиналардың нақтылығын азайтады және қызмет ету мерзімінің қысқаруына әкеледі. Жабдықтың сапалы жұмыс істеуіне айналма емес және МСРЖ сияқты параметрлердің әсері өте маңызды, олардың сақталмауы діріл көздері болып табылатын теңгерімсіз радиалды күштердің пайда болуына әкеледі, бөлшектердің тозуының дәлдігін төмендетеді, қызмет мерзімін қысқартады және т.б., сондықтан бұл өнімдер жоғарыда көрсетілген параметрлермен қатаң бақылануы керек.

Кейбір машиналарда МСРЖ жасанды түрде жасалады және олар машинаның мақсатты функцияларын орындау үшін қажет. Бірақ машина мен аспаптардың көп бөлігі үшін теңгерімсіздік орынсыз, өйткені олар іргетаспен бірге жеке бөліктердің де, тұтас машинаның да мәжбүрлеп ауытқу көздері болып табылады. Бұл ауытқулар тығыз орналасқан жабдықта, өлшеу және басқару құрылғысына, сондай-ақ ғимараттың бөліктеріне жіберілуі мүмкін. Сонымен қатар, діріл адам ағзасына зиянды әсер етеді. Теңгерімсіздік кинематикалық жұптардың мезгілсіз тозуының пайда болуына байланысты ресурстарды, сенімділікті және олардың жұмысының дәлдігін азайта отырып, машиналар мен механизмдердің де жұмысына үлкен әсер етеді. Осыған байланысты айналу денелері түріндегі МСРЖ бөлшектерді жою бойынша көптеген жұмыстар жүргізілуде.

**Кілттік сөздер:** айналма дене, динамикалық сипаттама, масса орталығының радиалды жылжуы, айналма емес, теңгерімсіз радиалды күштер, теңгерімсіздік, сенімділік, дәлдік.

**METHODS FOR CONTROLLING THE DYNAMIC CHARACTERISTICS OF PRODUCTS SUCH AS BODIES OF ROTATION**

**A.K. Atalykova**

Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan

**Abstract.** The type of bodies rotation and the methods of controlling the products of dynamic characteristics are described in this article. It is known that the main products of dynamic characteristics of the type of bodies rotation, affecting the quality performance is the radial displacement of the center of mass (RDCM). The deviation of this characteristic from the norms leads to a decrease in the accuracy and service life of devices and machines. Especially the impact on the quality of the equipment parameters such as non-roundness and RDCM is important. Failures lead to unbalanced radial forces, which are the sources of vibration, and reduce the accuracy of increased wear of parts, reduce service life, etc., so these products must be strictly controlled by the above parameters.

In some machines RDCM are created artificially and they are necessary to perform machine target functions. But for the bulk of machines and devices imbalances are unacceptable, as they are the sources of forced fluctuations as individual parts, and the machine as a whole, together with the infrastructure. These vibrations can be transmitted to closely located equipment, measuring control devices, as well as parts of the building. In addition, vibrations have a harmful effects on the human body. The imbalance also has a great influence on the operation of the machines and mechanisms, reducing the resource, reliability and accuracy of their work due to the appearance of premature wear of kinematic pairs, etc. In this regard, numerous works are carried out to eliminate the RDCM parts of the type of bodies of rotation.

**Key words:** bodies of rotation, dynamic characteristics, radial displacement of the center of mass, non-roundness, unbalanced radial forces, imbalance, reliability, accuracy.

ГРНТИ 50.01.05

**Т.О.Чигамбаев, Б.А.Ниязов**

Алматы Энергетика және Байланыс Университеті

### ӨНДІРІСТІК ЖЕЛІЛЕРГЕ ШОЛУ

**Аннотация.** Өнеркәсіп объектінің автоматтандыру үрдісі қарқынды қарқынмен дамып келеді: «ақылды» түпкі құрылғылар саны артып келеді, технологиялық процесті бақылау және бақылауға қатысатын микрокомпьютерлік есептеу жүйелерінің саны өсіп келеді. Осы жағдайларда автоматтандырылған процестерді басқару жүйесінің барлық деңгейлерінде жиналған деректердің рөлі айтарлықтай артады. Осы ақпарат тұтынушылар тарапынан қойылған талаптар көлемі, жылдамдығы, сенімділігі мен деректерді алудың тиімділігіне байланысты күшейе түседі, сондықтан коммуникацияларды беру мәселелері басымдыққа не болады. Мақалада өндірістік шиналарға (fieldbus) шолу жасалады, сондай-ақ ең танымалдардың сипаттамалары салыстырылады.

**Кілт сөздер:** өндірістік желілер, шина, деректерді беру хаттамалары.

Автоматтандырылған жүйенің құрамына кіретін құрылғылар (компьютерлер, контроллерлер, датчиктер, атқарушы құрылғылар) арасындағы ақпарат алмасу тұтастай өндірістік желі арқылы жүзеге асырылады (Fieldbus, «өндірістік шина»).

Өндірістік желілер кеңселік желілерден келесі қасиеттермен ерекшеленеді:

- а) Шаннан, ылғалдан, дірілден, соққыдан қорғауды қамтамасыз ететін арнайы конструктивті орындаумен;
- б) Кең температуралық диапазонмен (әдетте -40 тан +70 град дейін);
- в) Кабельдің, оқшаулағыштардың, жалғағыштардың, бекітетін элементтердің аса беріктілігімен;
- г) Электрмагниттік бөгеттер әсеріне жоғары тұрақтылығымен;
- д) Сенімділікті жоғарылату мақсатында резервтеу мүмкіндігімен;
- е) Деректерді берудің жоғары сенімділігімен;
- ж) Ақаулардан кейін өзін-өзі қалпына келтіру мүмкіндігімен;
- з) Хабарларды жеткізудің белгілі бір уақытылығымен;
- к) Нақты уақытта жұмыс істеу мүмкіндігімен (аз, тұрақты және белгілі кідіріс мөлшерімен);
- л) Ұзын байланыс желілермен жұмысымен (жүздеген метрден бірнеше километрге дейін).

Өндірістік желілер, әдетте, бір кәсіпорын шегінен асып кетпейді. Алайда, Ethernet және Internet пайда болған кезде өндірістік желілер үшін кеңселіктерге де қолданылатын классификация пайдаланыла бастады :

- LAN (Local Area Network) - шектеулі аймақта орналасқан желілер (цехта, кеңседе, зауыт шегінде);

- MAN (Metropolitan Area Networks) – қалалар желілері;

- WAN (Wide Area Network) -

бірнеше қаланы немесе құрлықтарды қамтитын галамдық желі.

Әдетте,

бүл үшін Интернет технологиясы қолданылады.

Қазіргі уақытта 50-ден астам өндірістік желілер бар (Modbus, Profibus, DeviceNet, CANopen, LonWorks, ControlNet, SDS, Seriplex, ArcNet, BACnet, FDDI, FIP, FF, ASI, Ethernet, WorldFIP, Foundation Fieldbus, Interbus, BitBus және т.б.). Алайда олардың тек қана бір бөлігі кең таралған. Қазақстанда технологиялық процестерді автоматтандырылған басқару жүйелерінің басым бөлігі Modbus және Profibus желілерін пайдаланады. Соңғы жылдары CANopen және DeviceNet негізіндегі желілерге қызығушылық артты.

Қазақстанда сол я басқа өндірістік желінің таралуы ең алдымен әкелінетін жабдықты сататын Қазақстандық фирмалардың артықшылықтары мен белсенділігіне байланысты.

Ең кең таралғандары болып: Profibus, Modbus, DeviceNet, CANopen, Ethernet, AS-Interface, ControlNet, Foundation Fieldbus сияқты ашық өндірістік желілер саналады. Желінің өздігінен қолданылуы үлкен артықшылықтарға ие және бұл артықшылықтар неғұрлым жоғары болса соғұрлым жүйе ауқымды: қосылуға арналған кабельдерді төсеу уақыты қысқартылып, орнатудың құны азаяды, модульдік көрініс пайда болады және диагностика жүргізудің ықтимал мүмкіндіктері жасалады. Өндірістік желілердің осындай алуан түрлілігінен ең жақсы және тиімдісі қайсысы деген сұрақ туындайды. Бұл сұраққа жауап беру үшін жалпы алғанда тиімділік не екенін анықтау керек. Тиімділік - кез-келген қызметтің нәтижелілігінің әмбебап сипаттамасы. Ол нәтиженің нәтиже алуға кеткен шығынға қатынасы арқылы өлшенеді. Тиімділік экономикалық, әлеуметтік, технологиялық, экологиялық - тұтастай алғанда, шығындар мен нәтижелерді салыстыру қажет болса - кез келген болуы мүмкін. Демек, берілу жылдамдығын және берілетін деректердің көлемін ескере отырып, деректерді берудің ең аз кешігулерімен толықтай жүзеге асыратын желіні тиімді деуге болады. Егер осы логика арқылы бағаласақ, онда әрбір өндірістік желі үшін сол салаға қолайлы болатын тип болуы керек, әрине, өндірістің өсуі немесе азаюымен - желі сәйкесінше өсуі немесе азаюы керек. Өндірістік желінің түрін таңдау және жүргізу үшін, олардың кейбірін салыстыру бойынша жұмыс жасадым (Кесте-1) [1].

Кесте1 – Шолу кестесі

	Ethernet	Modbus RTU/ASCII II	Profibus	Foundation Fieldbus	DeviceNet	CANopen
Пайда болуы	Digital Equipment Corp., Intel, және Xerox - 1976	Modicon - 1978	German govt. and automation manufacturers - 1989	ISA - 1998	Allen-Bradley - 1994	CAN in Automation - 1993
Форматтары	10Base-2, 10Base-T, 100Base-T, 100Base-FX, 1Gb; есулі қосақ, оптикалық талшық	Типтік RS-232, RS-422, RS-485	Profibus DP (master/slave) Profibus FMS (multimaster/нүкте нүкте), және Profibus PA	Н1 аса қорғанысты және жоғары жылдамдықты Ethernet (HSE); ISA SP50/IEC61158 негізінде	-	-

Коннекторлар	RJ-45 немесе коаксиал	Типтік DB9 немесе терминалды блок	D типті 9-піндік коннектор немесе 12 мм IP 67 quick disconnect	Бағдарламалық қамтамасыз етуге байланысты	Мини 18 мм және микро 12 мм су жұқтырмайтын, құрылғыларды тез өшіретін және орын ауыстыратын; 5 піндік Phoenix терминалды блок	Мини 18 мм және микро 12 мм құрылғыларды тез өшіретін және орын ауыстыратын; 9-типиновый D-shell
Түйіндердің максималды саны	1024, маршрут изаторлар арқылы кеңейтілуі мүмкін	250	127	240/сегмент; 65000 мүмкін сегменттер	64	64
Максималды арақашықтығы	100 м – ден (10Base-T) 50 км-ге дейін	RS-485 үшін 350 м	100 м-ден 24 км-ге дейін	H1 үшін 1900м	100-500 м	100-500 м
Максималды жылдамдық	10 Мбайт/с -тан 1 Гбайт/с-ке дейін	9600 -ден 38400 байт/с-ке дейін	9600 байт/с-тен 12 Мбайт/с – ке дейін	H1 үшін 31.25 Кбайт/с және HSE үшін 100 Мбайт/с	125, 250 және 500 Кбайт/с	125, 250 және 500 Кбайт/с
Хабарлама өлшемі	46-1500 байт	0-254 байтов	Макс. 244 байт	128 октет	8 байт	8 байт
Хабарлама форматы	Нүкте нүкте	Master/Slave	Нүкте нүкте және DP/PA	Клиент/сервер	UCMM	Polling, strobing etc
Қысқа сипаттамасы	Әкімшілік есептеуіштік желілердің бейресм	Master-slave сәулетіне негізделген ашық хаттама	Ашық өндірістік желі	Зауыттың зауыттық автоматтандыру жүйесіндегі желінің негізгі	Өндірістік CAN желісіне арналған хаттама	Борттық көлікте және өнеркәсіптік желілерде ендірілген құрылғыларды қосу үшін

	и элементы стандарты			деңгейі ретінде қызмет ететін сандық, дәйекті, екі жақты байланыс жүйесі		жоғары деңгейлі ашық желі хаттамасы
--	----------------------------	--	--	--	--	--

Осы шолу кестесіне сүйене отырып, өндіріскесәйкес келетін желіні тандауға болады және өндірісте тиімділікті арттыру үшін бірнеше желі түрлерін қолдануға болады.

### Қорытынды

Байланыс технологиясын тандағанда сандық параметрлерді басшылыққа алуға болады (жіберілетін пайдалы жүктеме деректерінің саны, шинаның максималды ұзындығы, шинадағы түйіндердің рұқсат етілген саны, шудан қорғануы және т.б.), бағалық өлшемі бойынша (бір түйінге кеткен шығын), танымалдылық, проблеманы шешудің тиімділігі, конфигурацияның қарапайымдылығы и т. д. Бұл жағдайда бір параметрді жақсарту басқа біреуінің нашарлауына әкелуі мүмкін. Әрбір өндірістік желіні іске асырылғанда өзінің артықшылықтары мен кемшіліктері болатынын түсінуіміз керек. Сондықтан, нақты хаттамалық шешімді тандағанда, ақылға қонымды жеткіліктілік принципін ұстану қажет.

Өмірдің барлық жағдайлары үшін әмбебап желілік шешім қабылдауға деген ұмтылыс, әрине, мақтауға тұрарлық, бірақ бұл шындыққа ұқсауы әзірге екіталай.

### ҚОЛДАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР

1. Олифер В., Олифер Н. Компьютерлік желілер. Принципітері, технологиялары, хаттамалары: ЖОО арналған оқулық. 5-ші басылым. — СПб.: Питер, 2016. — 992 бет.
2. A beginners guide to Ethernet 802.3. Engineer-to-Engineer Note EE-269. - Analog Devices, In. - 2005, 26 p.
3. Спортак М. Компьютерлік желілер мен желілік технологиялар /М.Спортак. – М.:ДиаСофт, 2005 – 711бет.
4. Гришин А.В., Страшун Ю.П. Ондірістік ақпараттық жүйелер мен желілер.. М.: Радио и связь, 2010. 176 бет

### ОБЗОР НА ПРОМЫШЛЕННЫЕ СЕТИ

Чигамбаев Т.О. Ниязов Б.А.

Алматинский Университет Энергетики и Связи

**Аннотация.** Процесс автоматизации промышленных объектов развивается все более ускоряющимися темпами: растет количество вычислительных систем на основе микроконтроллеров, вовлеченных в процессы контроля и управления технологическим процессом, увеличивается число «интеллектуальных» конечных устройств. В этих условиях значительно увеличивается роль данных, собираемых на всех уровнях АСУ ТП. Предъявляемые условия потребителей этой информации все больше ужесточаются в части скорости, объема, эффективности и надежности получения данных, по этой причине

проблемы обеспечения коммуникаций имеют высокий приоритет. В статье дается общее представление о промышленных шинах (fieldbus), а также обзор и сравнительные характеристики наиболее популярных из них.

**Ключевые слова:** промышленные сети, шина, протоколы передачи данных

## **OVERVIEW OF INDUSTRIAL NETWORKS**

Chigambaev T.O. Niyazov B.A.

Almaty University of Power Engineering and Telecommunications

**Annotation.** The process of automation of industrial object is expanding at an ever accelerating pace: the number of "smart" terminals is rising, and the number of microcomputer-based computing systems engaged in monitoring and controlling the technological process is increasing. Under these conditions, the role of data collected at all levels of the ACS TP importantly grows. The requirements placed on the part of consumers of this information are progressively tightened in condition of volume, speed, reliability and efficiency of data acquisition, so the problems of providing communications become of a high priority. The article gives an overview of industrial buses (fieldbus), as well as an overview and comparative characteristics of the most popular ones

**Key words:** industrial networks, bus, data transfer protocols

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Олифер В., Олифер Н. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: Учебник для вузов. 5-е изд. — СПб.: Питер, 2016. — 992 с.
2. A beginners guide to Ethernet 802.3. Engineer-to-Engineer Note EE-269. - Analog Devices, In. - 2005, 26 p.
3. Спортак М. Компьютерные сети и сетевые технологии/М.Спортак. – М.: ДиаСофт, 2005 – 711с.
4. Гришин А.В., Страшун Ю.П. Промышленные информационные системы и сети. Практическое руководство. М.: Радио и связь, 2010. - 176 с.

## **BIBLIOGRAPHY**

1. Olifer V. Olifer N. Computer networks. Principles, technologies, protocols: Textbook for high schools. 5 th ed. - St. Petersburg: Peter, 2016. - 992 p.
2. A beginners guide to Ethernet 802.3. Engineer-to-Engineer Note EE-269. - Analog Devices, In. - 2005, 26 p.
3. Sportak M. Computer networks and network technologies / M.Sportak. - M.: DiSoft, 2005 - 711p.
- Grishin A.V., Strashun Y.P. Industrial information systems and networks. Practical guidance. M.: Radio and Communication, 2010. - 176 p.

МРНТИ 55.01.85

Е.О.Елеукулов

Алматинский Университет Энергетики и Связи, г. Алматы, Республика Казахстан

### РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ТОКАРНОГО СТАНКА

**Аннотация.** В статье рассмотрены проблемы современного машиностроения, в частности управление токарным станком для изготовления изделий, когда изменение припусков на обработку, неоднородность обрабатываемого материала, затупление режущего инструмента при точении, повышение температуры в зоне обработки являются причинами возрастания сил резания, упругого отклонения технологической системы от настроенных размеров, что в конечном итоге приводит к неточности геометрических размеров обработанных деталей. В связи с этим автоматическое регулирование режимов работы токарного станка с целью стабилизации силы резания по трем параметрам (скорости резания, подачи инструмента и зазором в гидростатических направляющих) позволяет решить задачу по обеспечению заданной точности, обрабатываемых деталей.

**Ключевые слова:** качество изделий, обработка изделий, станок, приспособление, инструмент, деталь, подача шпинделя, скорость резания, сила резания, зазор гидростатических направляющих, динамические характеристики, неуравновешенные радиальные силы, надежность, точность.

Решающие проблемы современного машиностроения — повышение качества изделий и увеличение производительности труда. Одним из основных показателей качества является точность изделия. Требования к точности изделий непрерывно возрастают. Некоторые детали современных машин и приборов необходимо изготавливать с отклонениями, не выходящими за пределы допуска в 0,0002 мм.

Известно, что токарная обработка производится на высоких скоростях резания [1], и сила резания, начиная со скорости 60 м/мин, обычно уменьшается, и она продолжается до скорости резания 400-500 м/мин (рисунок 1.1), после чего процесс резания стабилизируется, и сила резания  $P_z$  при дальнейшем увеличении скорости остается постоянной.

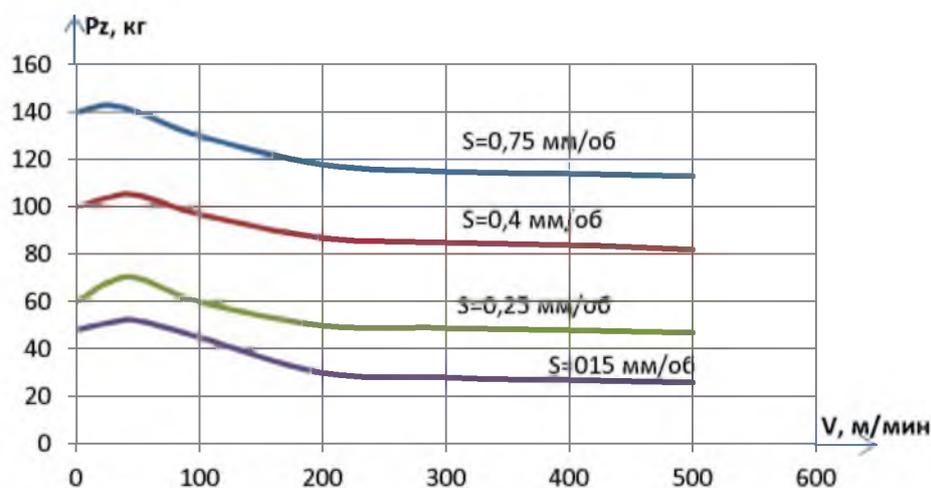


Рисунок 1 - Зависимость силы резания  $P_z$  от скорости резания при различных значениях подачи

Аналогично силе  $P_z$  с изменением скорости резания изменяются силы  $P_y$  и  $P_x$  [1]:

$$P_y = \frac{C_1}{g^{n_1}}; \quad P_x = \frac{C_2}{g^{n_2}};$$

Значения  $n_1 = 0.18 \div 0.3$ ;  $n_2 = 0.22 \div 0.4$ .

$C_1$  и  $C_2$  – коэффициенты, учитывающие материал и условия обработки.

С увеличением подачи, силы резания растут, в связи с ростом сил деформации и трения.

На рисунке 2 показано влияние подачи на силы резания  $P_z$ ,  $P_y$ , и  $P_x$  при обработке стали 45 резцами, и быстрорежущей стали при  $t=3$  мм.

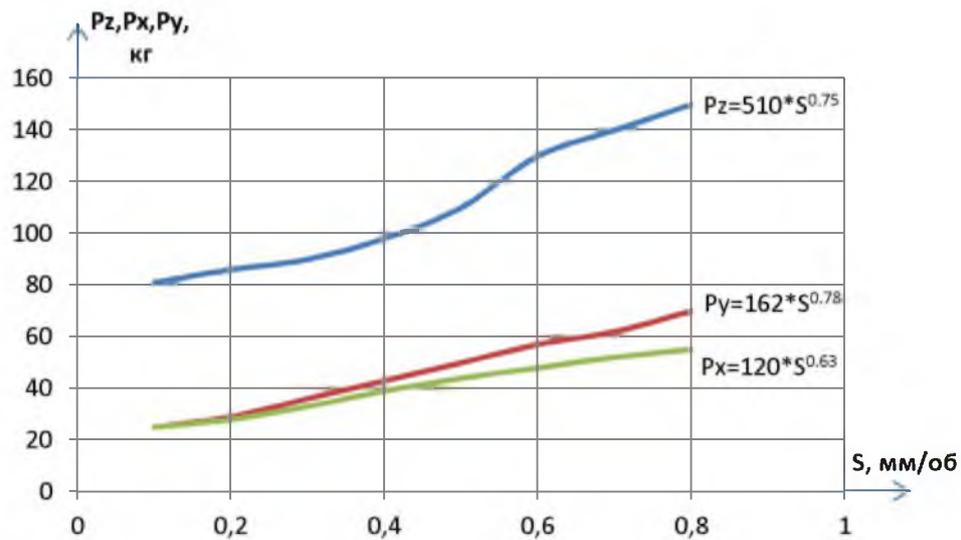


Рисунок 2 - Зависимость сил резания  $P_z$ ,  $P_y$ , и  $P_x$  от подачи при обработке стали 45,  $t=3$  мм.

Для управления упругими перемещениями системы Станок–Приспособление–Инструмент–Деталь (СПИД) путем бесступенчатого изменения продольной подачи создаются системы автоматического регулирования [2].

Известно, что в высокоточных токарных станках, предназначенных для изготовления качественных деталей, перемещение суппорта осуществляется на гидростатических направляющих, что дает возможность повышения точности, виброустойчивости при широком диапазоне режимов обработки.

Важным условием эффективной работы гидростатических направляющих является поддержание величины зазора в ней, в пределах выбранной величины, независимо от колебания сил резания, поскольку непостоянство зазора приводит к погрешностям геометрических размеров обрабатываемых деталей.

Таким образом, возникает задача по разработке автоматической системы стабилизации зазора в гидростатических направляющих так, чтобы толщина масляного зазора в нем поддерживалась постоянной, даже при значительной динамической нагрузке на опору.

На рисунке 3 представлена принципиальная схема автоматического управления режимами работ токарного станка по трем параметрам: скорости резания, подачи инструмента и зазора в гидростатических направляющих.

Автоматическая система состоит из следующих элементов:

1- Обрабатываемая деталь, 2 - резец, установленный в суппорте, 3 – силометрический датчик ДСР-1, 4 – гидростатические направляющие, 5 – канал обратной

связи по давлению, 6 – регулятор расхода, 7 – демпферы, 8 – насос с постоянной производительностью, 9 – редукционный клапан, 10 – сумматор, 11 – задающее устройство, 12 – усилитель, 13 – преобразователь частоты тока, 14 – электродвигатель,  $i_{кс}$  – передаточное отношение коробки скоростей,  $i_{кн}$  – передаточные отношения коробки подач,  $\omega$  – угловая скорость вращения детали,  $S$  – подача инструмента,  $\delta$  – зазор в гидростатических направляющих,  $Q$  и  $P$  – соответственно, расход и давление в гидростатических направляющих,  $h$  – величина проходной щели регулятора,  $P_y$  – управляющее давление,  $\Delta P = P_y - P$  – давление рассогласования,  $f_{кл}$  – площадь торца золотника регулятора,  $Q_n$  и  $P_n$  – соответственно расход и давление насоса.

Поскольку разработанная автоматическая система может быть эффективно использована в высокоточных станках, необходимо регулирование таких параметров технологического процесса как скорость резания, подача инструмента за один оборот шпинделя и величина зазора в гидростатических направляющих суппорта.

Таким образом, установлено, что -

1) с помощью регулирования скорости резания и стабилизации подачи инструмента представляется возможным также стабилизировать радиальную составляющую силу резания. При этом обеспечивается точность геометрических размеров изделия;

2) применение гидростатических направляющих с автоматической системой регулирования зазора между суппортом и станиной повышает точность изготовления изделий;

3) на основании изложенного в пунктах 1 и 2 возникает обоснованная необходимость разработки автоматической системы управления технологическими параметрами при токарной чистовой обработке по трем параметрам: скорости резания, подачей инструмента и зазором гидростатических направляющих.

Принципиальная схема разработанной системы автоматического управления режимами работ токарного станка по трем параметрам: скорости резания, подачей инструмента и зазором в гидростатических направляющих представлена на рисунке 3.

Автоматическая система состоит из следующих элементов:

1- Обрабатываемая деталь, 2 - резец, установленный в суппорте, 3 – силومترический датчик ДСР-1, 4 – гидростатические направляющие, 5 – канал обратной связи по давлению, 6 – регулятор расхода, 7 – демпферы, 8 – насос с постоянной производительностью, 9 – редукционный клапан, 10 – сумматор, 11 – задающее устройство, 12 – усилитель, 13 – преобразователь частоты тока, 14 – электродвигатель,  $i_{кс}$  – передаточное отношение коробки скоростей,  $i_{кн}$  – передаточные отношения коробки подач,  $\omega$  – угловая скорость вращения детали,  $S$  – подача инструмента,  $\delta$  – зазор в гидростатических направляющих,  $Q$  и  $P$  – соответственно, расход и давление в гидростатических направляющих,  $h$  – величина проходной щели регулятора,  $P_y$  – управляющее давление,  $\Delta P = P_y - P$  – давление рассогласования,  $f_{кл}$  – площадь торца золотника регулятора,  $Q_n$  и  $P_n$  – соответственно расход и давление насоса.

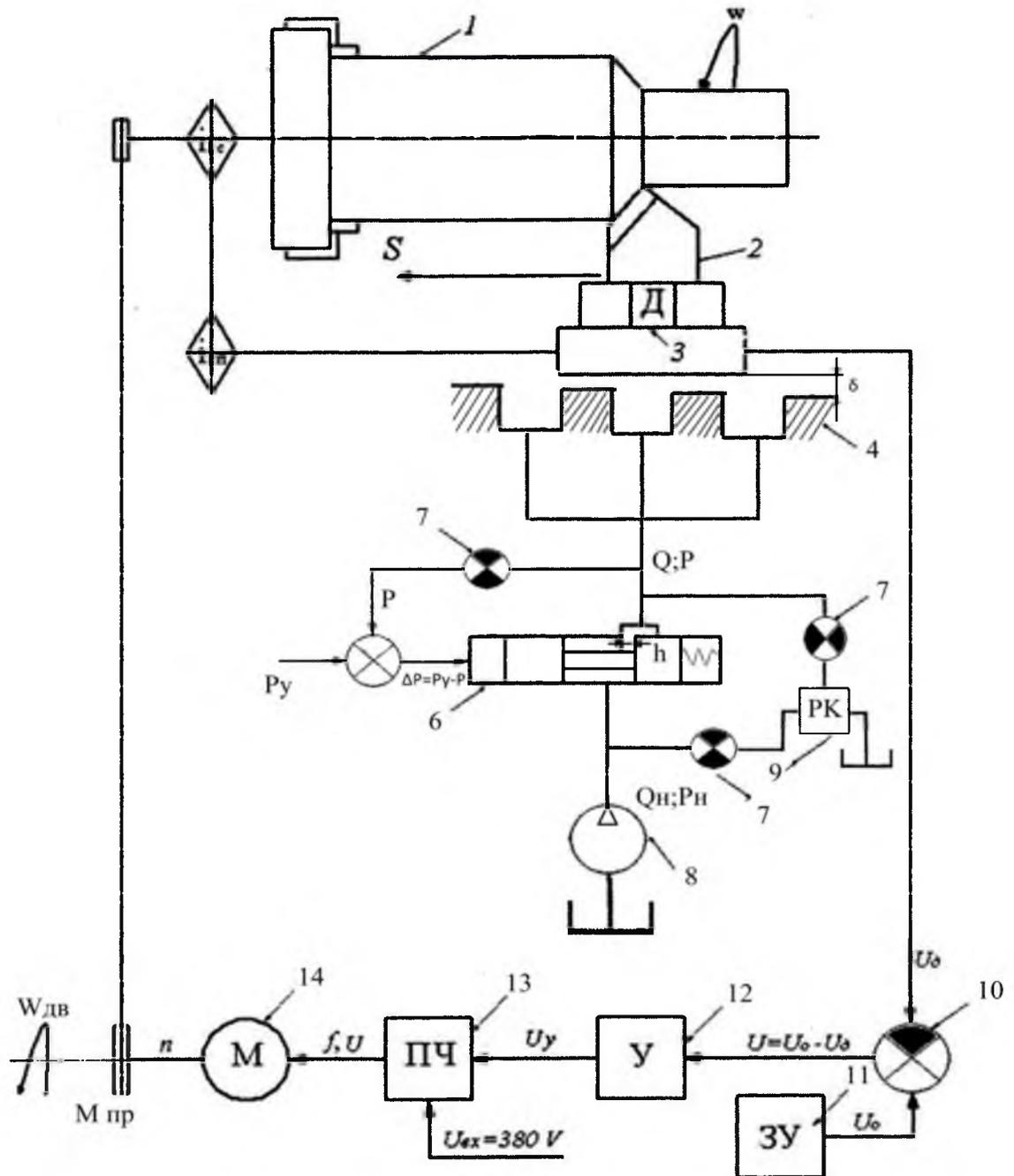


Рисунок 3 - Принципиальная схема автоматического управления режимами работ токарного станка по параметрам: скорости резания, подачи инструмента и зазора в гидростатических направляющих.

Автоматическая система имеет два контура:

Первый контур обеспечивает регулирование скорости и подачи инструмента, второй контур – регулирование зазора в гидростатических направляющих.

Работа первого контура: при изменении величины радиальной составляющей силы резания  $P_y$  изменяется сигнал, идущий от датчика

$U = U_o - U_d$  в усилителе усиливается по мощности до значения  $U_y$ , которое воздействует на преобразователь частоты, и его выходные параметры  $f$  и  $n$  изменяют скорость вращения электродвигателя.

При этом изменяется число оборотов шпинделя с деталью таким образом, чтобы  $P_v$  была постоянной, а подача инструмента наоборот оставалась постоянной в связи с тем, что коробка подач кинематически жестко связана с коробкой скоростей, но при этом возрастает минутная подача, что существенно повышает производительность обработки изделия.

Работа второго контура: известно, что величина зазора  $\delta$  в гидростатических направляющих зависит от давления в их камерах, которое, в свою очередь, зависит от расхода  $Q$ , поступающего из регулятора расхода.

Стабилизация зазора  $\delta$  осуществляется следующим образом: при увеличении силы резания зазор  $\delta$  в гидростатических направляющих уменьшается, а давление возрастает и оно по каналу обратной связи воздействует на торец золотника  $f_{кл}$  и перемещает его вправо, при этом увеличиваются величина проходной щели регулятора  $h$  и расход, поступающий в гидростатические направляющие. При этом давление в них возрастает ровно на столько, чтобы зазор  $\delta$  был постоянным независимо от нагрузки.

Следует отметить, что эти два контура работают одновременно, как только происходит изменение величины сил резания, обеспечивая стабилизацию их в конечном итоге повышения качества изготовления изделий: точность геометрических размеров, чистоту обработанной поверхности, производительности и стойкости инструмента.

Разработанную автоматическую систему рекомендуется использовать для модернизации существующих, а также при создании новых высокоточных станков различного назначения.

#### **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

- [1] Левит Г.А., Лурье Б.Г. Расчет гидростатических замкнутых направляющих. Станки и инструмент, 1964.
- [2] Шиманович М.А. Гидростатические опоры металлорежущих станков в качестве привода перемещений. - М.: НИИМАШ, 1972.

#### **REFERENCES**

- [1] Leviticus, G. A., Lur, B. G. Calculation of hydrostatic closed guides. Machines and tools, 1964. (in Russ.).
- [2] Shimanovich M. A. Hydrostatic supports of metal-cutting machines as a drive. - M.: NIIMASH, 1972. (in Russ.).

**ТОКАРЬ СТАНОГЫНА АРНАЛҒАН АВТОМАТТЫ БАСҚАРУ ЖҮЙЕСІН  
ҚҰРУ  
Е.О.Елеукулов**

Алматы Энергетика және байланыс университеті, Алматы қ., Қазақстан

**Анатпа.** Мақалада заманауи машина жасаудың проблемалары, атап айтқанда, өңдеу әдібінің өзгересі, өңделетін материалдың әртектілігі, жону кезінде кескіш құралдың мұқалуы, өңдеу аймағындағы температураның жоғарылауы кескіш күштердің өсуіне, технологиялық жүйенің бапталған өлшемдерден серпінді ауытқуына себеп болатын, түпкі нәтижеде өңделген бөліктердің геометриялық өлшемдерінің дәлсіздігіне әкелетін өнімдерді жасау үшін арналған жону станогын басқару.

Осыған байланысты кесу күші тұрақтылығын қамтамасыз ету үшін станоктардың жұмыс режимдерін үш параметр: кесу жылдамдығы, құрал – саймандарды беру және гидростатикалық бағыттаушылардағы саңылау бойынша автоматты реттеу өңделген бөлшектердің нақты дәлдігін қамтамасыз ету міндетін шешуге мүмкіндік береді.

**Кілт сөздер:** бұйымдардың сапасы, бұйымдарды өңдеу, станок, аспап, құрал, бөлшек, шпиндельді беру, кесу жылдамдығы, кесу күші, гидростатикалық бағыттаушылардың саңылауы, динамикалық сипаттамалар, теңгерімсіз радиалды күштер, сенімділік, дәлдік.

**DEVELOPMENT OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR TURNING  
LATHE  
Yerlan O.Yeleukulov**

Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Almaty, Kazakhstan

**Abstract.** The article deals with the problems of modern engineering, in particular the control of the lathe for the manufacture of products, when the change of machining allowances, the heterogeneity of the processed material, blunting of the cutting tool when turning, the temperature increase in the processing area, are the reasons for the increase in cutting forces, the elastic deviation of the technological system from the configured dimensions, which ultimately leads to inaccuracy of the geometric dimensions of the processed parts. In this regard, the automatic adjustment of the lathe operation modes is needed in order to stabilize the cutting force on three parameters: cutting speed, tool feed and the gap in the hydrostatic guides that allows to solve the problem of ensuring the specified accuracy of the processed parts.

**Keywords:** product quality, product processing, lathe, device, tool, part, spindle feed, cutting speed, cutting force, gap of hydraulic guides, dynamic characteristics, unbalanced radial forces, reliability, accuracy.

ГРНТИ 44.31.35

В.А.Мунц, С.А.Ивакина, Ю.Г.Мунц, Н.С.Василевский  
Уральский федеральный университет имени первого президента России  
Б.Н.Ельцина, Екатеринбург, Россия

## ОБЖИГОВАЯ ПЕЧЬ КИПЯЩЕГО СЛОЯ КАК ОБЪЕКТ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

**Аннотация.** Актуальность исследований обусловлена непрерывным увеличением использования цинка в мире. Получение цинка – дорогостоящий процесс, одним из этапов которого является обжиг сульфидных цинковых концентратов (шихты) в печи кипящего слоя с использованием воздушного дутья, обогащенного кислородом. Приведены экспериментальные данные по кинетике окисления сфалерита и пирита и собственно шихты при их окислении воздухом, и воздухом обогащенным кислородом. Предложена модель, описывающая переходные процессы в кипящем слое при изменении расхода шихты. Экспериментально и расчетным путем определены постоянные времени переходных процессов. Огромная масса кипящего слоя в обжиговых печах определяет большую инерционность, поэтому необходимо использование системы автоматического регулирования.

**Ключевые слова:** цинковый концентрат, кипящий слой, автоматическое регулирование, постоянная времени, константа скорости химического реагирования.

**Цель исследований:** оптимизация работы печи кипящего слоя для обжига сульфидных цинковых концентратов, в частности, введение автоматического регулирования температуры кипящего слоя во избежание колебания температуры в широких пределах. Значительное понижение температуры слоя приводит к ухудшению обжига концентрата, как следствие, уменьшается выход конечного продукта – цинка. При повышении температуры существенно возрастает опасность шлакования слоя из-за возможных его локальных перегревов. Для этого необходимо на основе изученной кинетики окисления цинкового концентрата в печи кипящего слоя получить зависимость температуры слоя от расхода шихты как расчетным, так и экспериментальным путем.

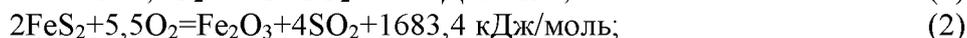
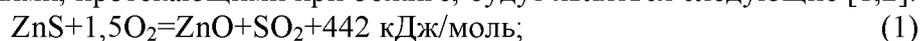
Обжиг цинкового концентрата на Челябинском цинковом заводе проводят в печах кипящего слоя диаметром в свету 6,4 м (рисунок 1).

Основные эксплуатационные характеристики печи: внутренний диаметр печи 6,46 м, высота кипящего слоя 1,6 м, температура в рабочем пространстве 920-1100°C, температура уходящих газов 820-1100°C. Охлаждение кипящего слоя осуществляется системой испарительного охлаждения, которая включает в себя 22 кессона с площадью охлаждения 40 м<sup>2</sup>. В слой подают воздух обогащенный кислородом до концентрации 28-42% с избыточным давлением 32-36кПа.

Усредненный состав шихты в сухом состоянии представлен следующими соединениями: Zn<sup>d</sup>=49,43%, Pb<sup>d</sup>=1,16%, Cu<sup>d</sup>=1,56%, S<sup>d</sup>=33,04%, Fe<sup>d</sup>=8,71%, SiO<sub>2</sub><sup>d</sup>=1,63%, Влажность шихты в рабочем состоянии W<sup>t</sup>=9,08%.

Сера содержится в следующих соединениях: ZnS – сфалерит; PbS–галенит; CuS–ковеллин, CuFeS<sub>2</sub>– халькоперит (медь находится в соотношении 1:1); FeS<sub>2</sub> – пирит, FeS–троилит (железо находится в соотношении 3:1).

Основными компонентами цинкового концентрата являются сфалерит ZnS и пирит FeS<sub>2</sub>. Основными реакциями, протекающими при обжиге, будут являться следующие [1,2]:



По приведенным в справочной литературе [3] данным по свободным энтальпиям различных веществ были определены теплоты возможных реакций окисления. Тепловой

эффект  $Q$  химической реакции рассчитывается как  $Q = -\sum \Delta H_i$ , разность свободных энтальпий конечных веществ и исходных продуктов.

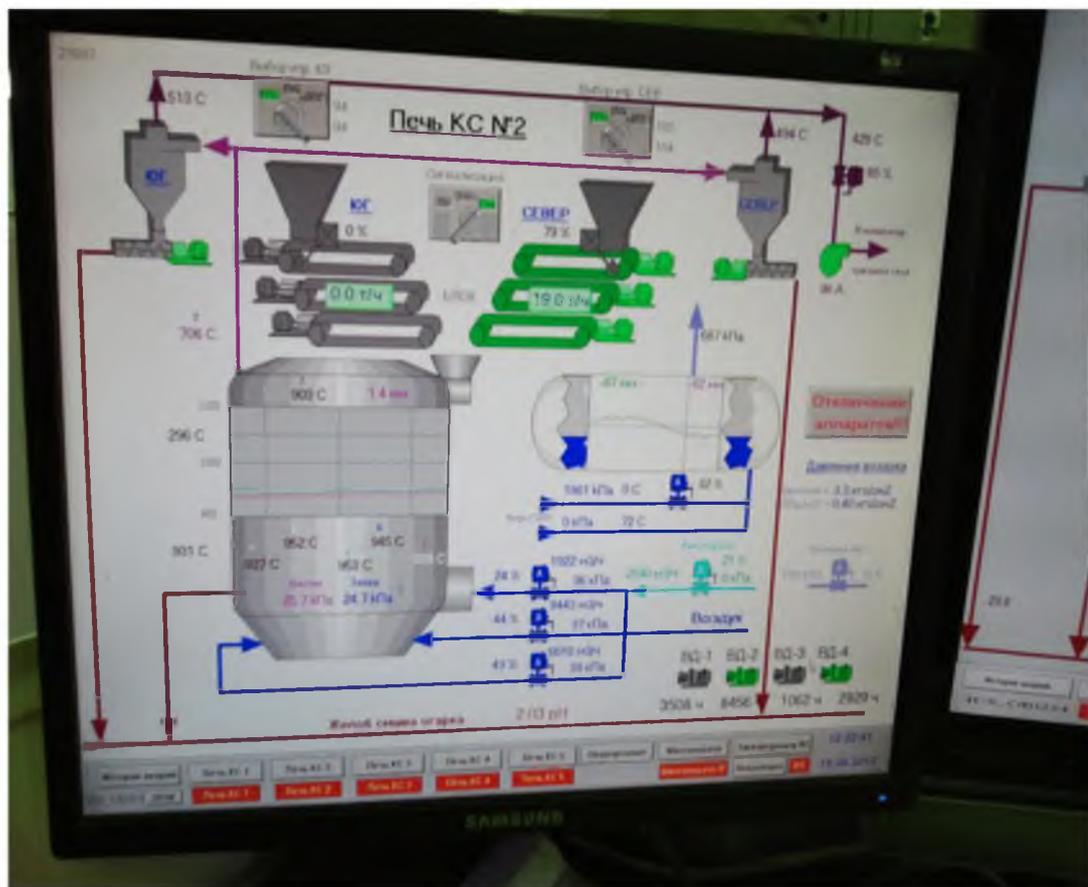


Рисунок 1. Схема обжиговой печи кипящего слоя

Суммарная теплота всех реакций с учетом окисления соединения меди и свинца дает значение равное  $Q_{\Sigma} = 5064,7$  кДж/кг.

Теплота сгорания за вычетом теплоты на испарение влаги и теплоты золы определяется по формуле:

$$Q_N^P = Q_{\Sigma} \cdot \frac{100 - W^P}{100} - 25W^P - \frac{A^P}{100} (c_{\text{зл}} \cdot t_{\text{зл}}) =$$

$$= 5064,7 \cdot \frac{100 - 9,08}{100} - 25 \cdot 9,08 - \frac{74,44}{100} (0,5 \cdot 945,2) = 4026 \text{ кДж/кг.}$$

Определенная экспериментально (в лаборатории ВУХИН) теплота сгорания составила 4025,5-кДж/кг.

Если при горении органических веществ, как правило, вся органика переходит в газообразную фазу, то при окислении минеральных веществ протекание реакции не приводит к исчезновению твердого вещества, и масса продукта иногда мало отличается от массы исходного вещества. Так при протекании реакции (1) молекулярная масса продукта  $\mu_{\text{ZnO}} = 81,008$  кг/кмоль, молекулярная масса исходного вещества  $\mu_{\text{ZnS}} = 97,434$  кг/кмоль.

Для изучения кинетики окисления цинкового концентрата (шихты) в кипящем слое были проведены эксперименты на шихте и ее основных компонентах - сфалерите ( $\text{ZnS} = 67\%$ ) и пирите ( $\text{FeS}_2 = 23,5\%$ ).

Эксперименты выполнялись при различных температурах на приборе синхронного термического анализа NETZSCH STA 449 F3, совмещенного с масс-спектрометрической

системой QMS 403C, предназначенной для качественного и количественного анализа компонентов газовой смеси, выделяющейся в процессе термохимической конверсии.

В тигель помещали навеску массой  $m=10$  мг. Нагрев навески происходил в среде аргона, при достижении требуемой температуры подавался воздух. Непрерывно измерялась масса навески и относительная концентрация газовых компонентов.

В экспериментах использовали навески узких фракций: 0-200 мкм, 200-400 мкм, 400-630 мкм, при этом средний размер частиц в навеске составлял:  $\delta = 100, 300, \text{ и } 515$  мкм. Обжиг навески сульфида цинка проводили при температурах 700, 800 и 900 °C в среде воздуха, а также воздуха, обогащенного кислородом ( $O_2 = 28\%$ ).

Убыль массы навески сфалерита в зависимости от времени при  $t=900$  °C представлена на рисунке 2.

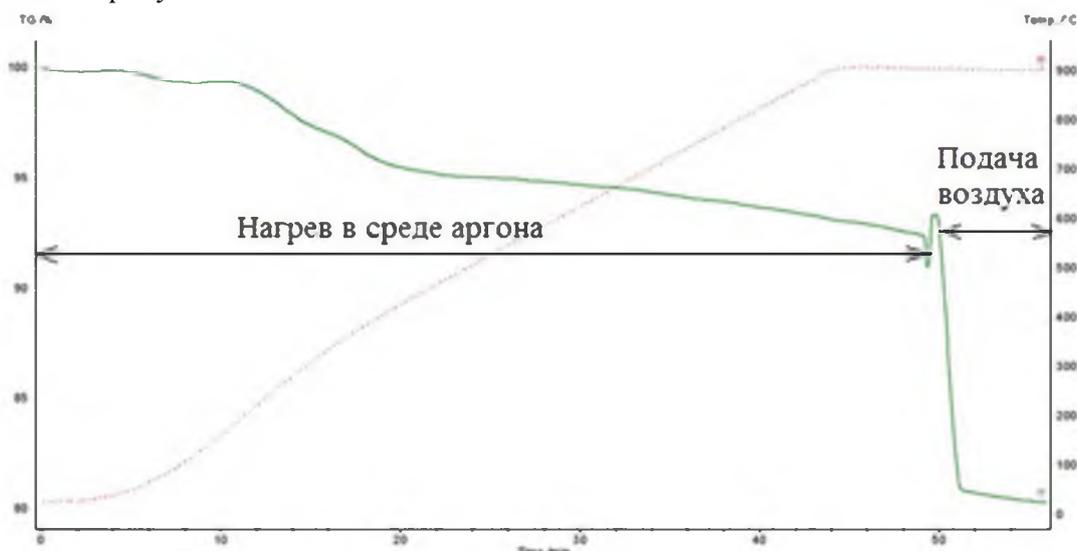


Рисунок 2. Изменение массы навески сфалерита при  $t = 900$  °C.

В период прогрева навески в среде аргона происходит незначительное уменьшение массы за счет выхода влаги и реагирования сульфида цинка с кислородом, который находится в порах вещества. При подаче воздуха происходит резкое, практически линейное, уменьшение массы навески за счет протекания реакции окисления. В этот же момент масс-спектрометр фиксирует образование  $SO_2$ .

Реакция окисления сульфида цинка:  $ZnS + 1,5O_2 = ZnO + SO_2$ .

Молярные массы веществ  $\mu_{ZnS} = 97,434$  г/моль,  $\mu_{ZnO} = 81,37$  г/моль,  $\Delta\mu = 97,434 - 81,37 = 16,064$  г/моль. При окислении  $ZnS=100\%$  максимальное изменение массы составит:

$$\frac{\Delta m_{\max}}{m_0} \cdot ZnS = \frac{97,434 - 81,37}{97,434} \cdot 100 = 16,487\%.$$

Это значение отнесено к изменению разницы масс исходного и конечного продукта на 16,064 г/моль, в то время как исчезает 97,434 г/моль сульфида цинка. Таким образом, необходимо ввести коэффициент, учитывающий исчезновение исходного вещества, отнесенное к разности масс исходного вещества и продукта:

$$\xi_{ZnS} = \frac{\mu_{ZnS}}{\Delta\mu} = \frac{97,434}{16,064} = \frac{100}{16,487} = 6,065.$$

На рисунке 2 относительное изменение массы при подаче воздуха составило около 14% (от 94 до 80%), что свидетельствует о практически полном завершении реакции практически в течении 50 секунд. Как показали эксперименты, массовое количество сульфида цинка, реагирующего в единицу времени

$$J = \xi_{ZnS} \frac{m_0 d(m/m_0)}{d\tau}, \text{ кг/с, не зависит}$$

от диаметра частиц в навеске, а зависит только от температуры обжига. Это свидетельствует о протекании реакции во всем объеме частицы.

Выражение для изменения массы реагирующего сульфида в кг/с формально может быть записано как

$$\frac{dm}{d\tau} = \xi_{ZnS} \frac{m_0 \cdot d(m/m_0)}{d\tau} = -\nu \cdot K \cdot C_{O_2}, \text{ кг/с.} \quad (3)$$

Тогда, эффективная константа скорости химического реагирования может быть определена по экспериментальным данным как:

$$K = \frac{\xi}{\nu} \cdot \frac{m_0 \cdot d(m/m_0)}{m_0 C_{O_2} d\tau}. \quad (4)$$

Здесь следует отметить, что размерность эффективной константы  $K$  м<sup>3</sup>/с, и фактически она представляет собой произведение константы скорости химического реагирования на полную поверхность реагирования  $S_0$  в м<sup>2</sup>. Коэффициенты, входящие в (4) представляют собой: коэффициент, учитывающий количество исходного вещества,

вступившего в реакцию к видимому изменению массы  $\xi = \frac{\mu_{ZnS}}{\mu_S - \mu_O} = \frac{97,434}{16} = 6,065$ ; и

стехиометрический коэффициент реакции окисления сфалерита

$$\nu = \frac{\mu_{ZnS}}{1,5\mu_{O_2}} = \frac{97,434}{1,5 \cdot 32} = 2,99$$

Эксперименты показали, что значения эффективной константы скорости химического реагирования в среде воздуха с концентрацией кислорода 21% и обогащенного кислородом до 28% практически совпадают. Это позволяет сделать вывод, что реакция  $ZnS + 1,5O_2$  имеет первый порядок по кислороду. На рис. 3 представлена обобщенная зависимость логарифма эффективной константы скорости химического реагирования от обратной температуры для обеих концентраций кислорода.

По данным аппроксимации, представленной на рисунке 3, рассчитаны значения энергии активации  $E_a = 24747,5$  кДж/кмоль, и предэкспоненциальный множитель  $k_0 = 1,37 \cdot 10^{-5}$ .

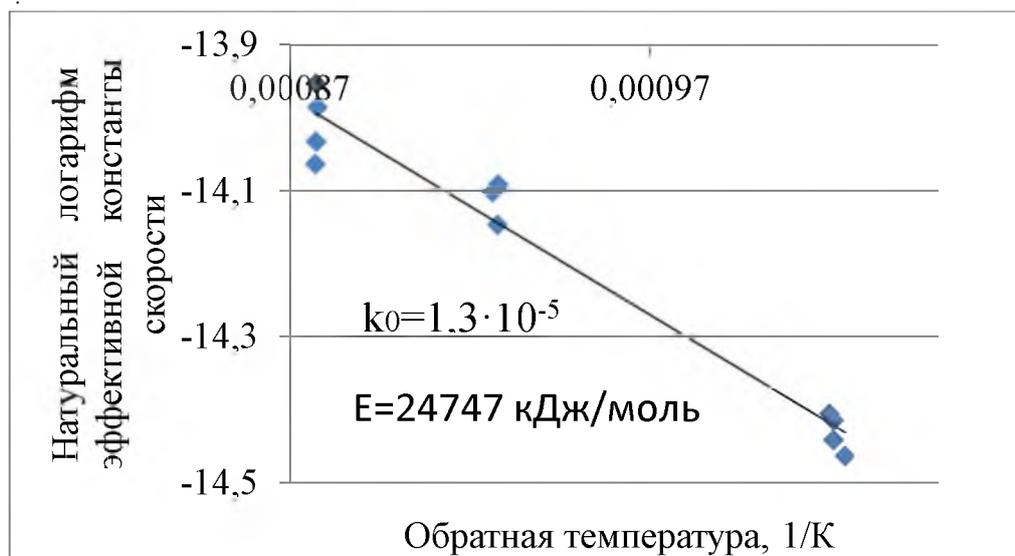


Рисунок 3. Зависимость логарифма эффективной константы скорости окисления сфалерита от обратной температуры

Аналогичным образом определены кинетические константы скоростей химического реагирования для сульфида железа и собственно шихты.

На рисунке 4 приведено сопоставление констант скорости реагирования сульфида цинка, пирита и шихты. Константа скорости окисления пирита в 4 раза меньше константы скорости окисления сфалерита. Пропорционально содержанию пирита в шихте уменьшается константа скорости окисления шихты по сравнению со скоростью окисления сфалерита.

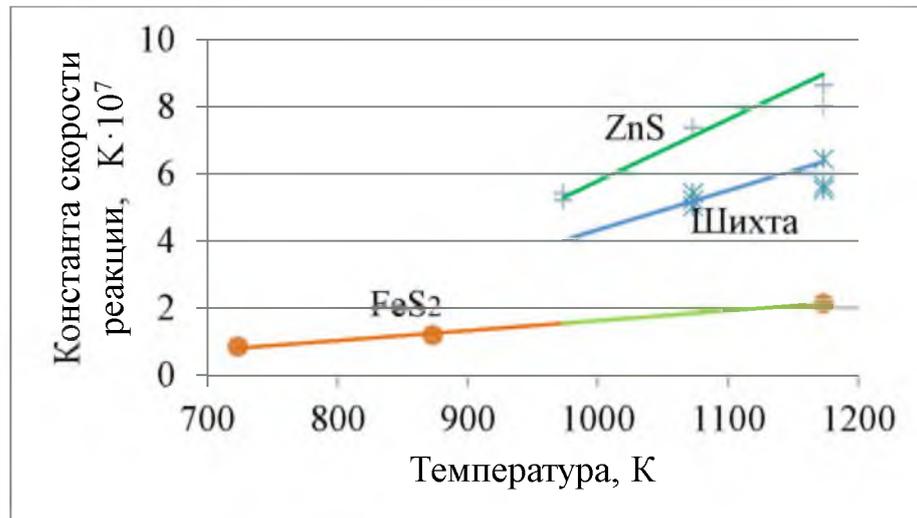


Рисунок 4. Сопоставление констант скорости реагирования. Линии - расчет по аппроксимациям, точки – эксперимент.

Для определения взаимосвязи между частотой электропривода ленточного транспортера и температурой кипящего слоя построены графики изменения данных параметров в режиме реального времени в различных точках печи. Для примера на рисунке 5 приведены графики изменения температур и частоты вращения ленточного транспортера печи №2 со 150 до 270 минуты от начала смены.

Из графиков видно, что при ступенчатом возмущении (кратковременном уменьшении частоты электропривода ленточного транспортера) наблюдается изменение температуры с транспортным запаздыванием в 20 мин.

Для получения значения постоянной времени из эксперимента при импульсном возмущении необходимо преобразовать рисунок 5, построив изменение, например, температуры в точке 3 до ступенчатого возмущения (рисунок 6).

Определенная из данного эксперимента (рисунок 6) постоянная времени составила 70,8 минут. На основании 5 экспериментальных значений постоянных времени (разных печей и смен) определено среднее значение, равное 68,7 минут.

Для описания свойств кипящего слоя как объекта регулирования рассмотрена [9,10] сопряженная система уравнений теплового и материального баланса.

$$M \cdot c_c \cdot \frac{dt_c}{d\tau} = V \cdot j^* \cdot z \cdot Q_n^p - w \cdot F_c \cdot c_c \cdot t_c - k_n \cdot F_n \cdot t_c, \quad (5)$$

$$M \cdot \frac{dz}{d\tau} = B - V \cdot j^* \cdot z. \quad (6)$$

Здесь  $M$  – масса кипящего слоя, кг;  $c_c, c_{ш}$  – теплоемкость слоя, кДж/(кг·К);  $c_r$  – теплоемкость уходящих газов, кДж/(м<sup>3</sup>·К);  $t_c$  – температура слоя, °С;  $\tau$  – время, с;  $Q_n^p$  – низшая рабочая теплота сгорания шихты, кДж/кг;  $B$  – расход шихты, кг/с;  $w$  – скорость воздушного дутья, м/с;  $F_c, F_n$  – площадь сечения топки и площадь поверхностей теплообмена соответственно, м<sup>2</sup>;  $k_n$  – коэффициент теплопередачи от слоя к поверхностям теплообмена, кВт/(м<sup>2</sup>·К).

Выразив из уравнения (6) концентрацию горючих веществ в слое как  $z = \frac{B}{V \cdot j^*} - \frac{M}{V \cdot j^*} \cdot \frac{dz}{d\tau}$  и подставив ее в уравнение (5), получим уравнение теплового баланса в виде, удобном для качественного анализа:

$$M \cdot c_c \cdot \frac{dt_c}{d\tau} = Q_n^p \cdot \left( B - M \cdot \frac{dz}{d\tau} \right) - w \cdot F_c \cdot c_c \cdot t_c - k_n \cdot F_n \cdot t_c, \quad (7)$$

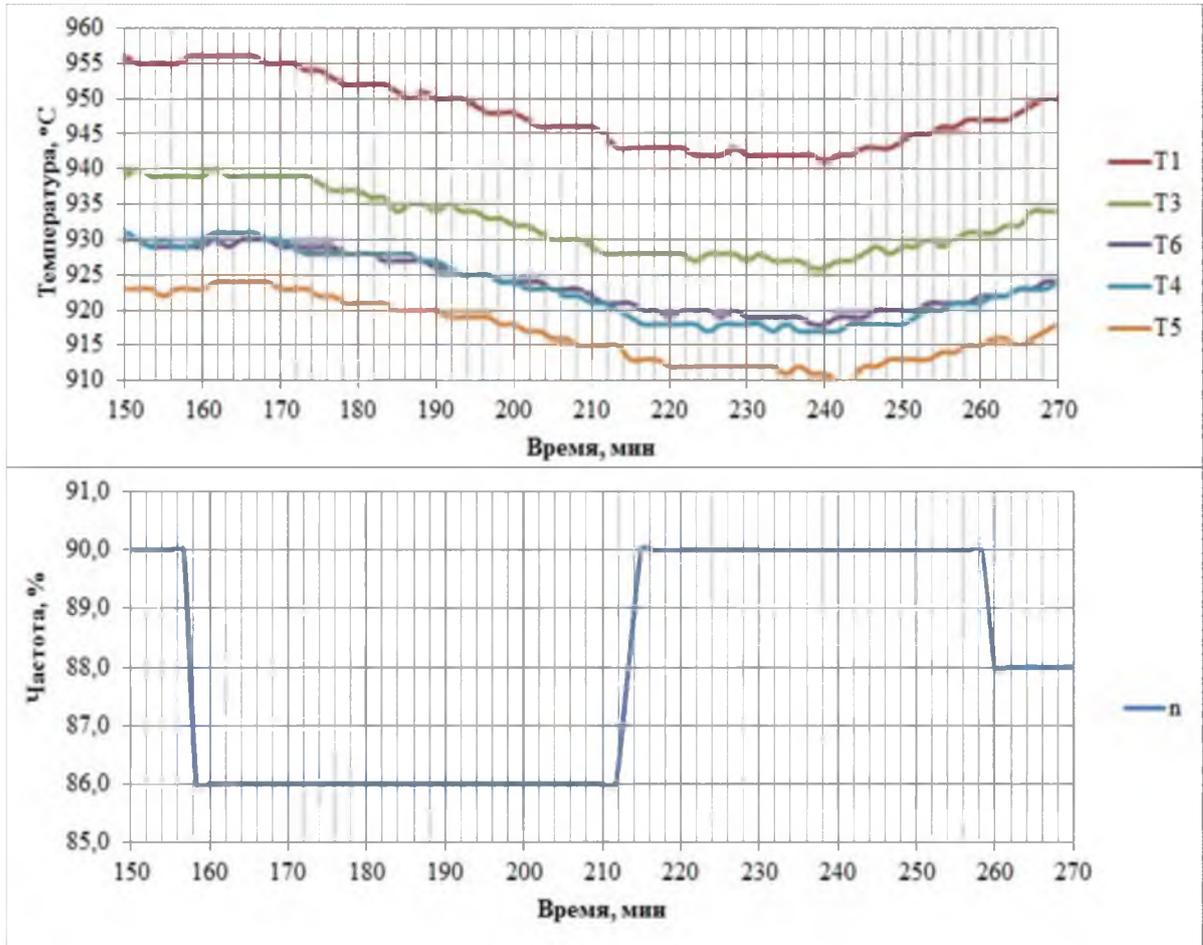


Рисунок 5. Изменение температур в кипящем слое при изменении частоты вращения электропривода ленточного транспортера с течением времени

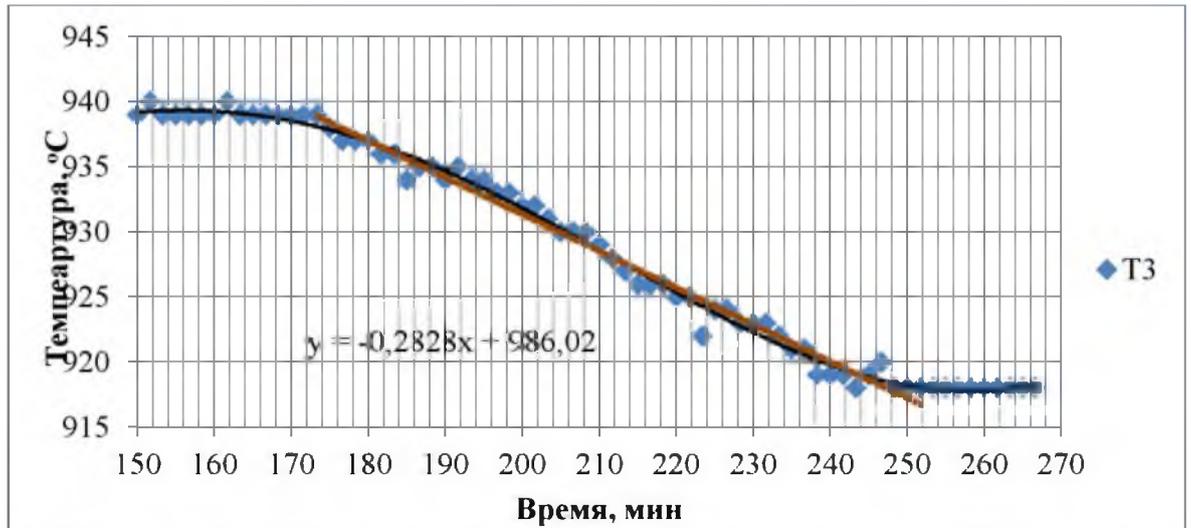


Рисунок 6. Изменение температуры слоя T<sub>3</sub> при ступенчатом изменении частоты электропривода ленточного транспортера

Для оценки постоянной времени кипящего слоя [4-6] продифференцируем уравнение (7) по времени:

$$M \cdot c_c \cdot \frac{d^2 t_c}{d\tau^2} = V \cdot j^* \cdot z \cdot Q_n^p \cdot \frac{dz}{d\tau} - (w \cdot F_c \cdot c_z + k_n \cdot F_n) \cdot \frac{dt_c}{d\tau} \quad (8)$$

Считая поток  $j^*$  постоянным, выразим из уравнения (8) производную  $\frac{dz}{d\tau}$ :

$$\frac{dz}{d\tau} = \frac{1}{M \cdot Q_n^p} \cdot \left[ Q_n^p \cdot B - M \cdot c_c \cdot \frac{dt_c}{d\tau} - (w \cdot F_c \cdot c_z + k_n \cdot F_n) \cdot dt_c \right]$$

Подставив ее в (7), получим уравнение второго порядка для изменения температуры кипящего слоя в виде:

$$\begin{aligned} \frac{M \cdot c_c \cdot \rho_c \cdot (1-\varepsilon)}{j^*} \cdot \frac{d^2 t_c}{d\tau^2} + \left[ M \cdot c_c + \frac{\rho_c \cdot (1-\varepsilon)}{j^*} \cdot (w \cdot F_c \cdot c_z + k_n \cdot F_n) \right] \cdot \frac{dt_c}{d\tau} = \\ = Q_n^p \cdot B - (w \cdot F_c \cdot c_z + k_n \cdot F_n) \cdot t_c \end{aligned} \quad (9)$$

При ступенчатом изменении расхода топлива в момент времени  $\tau = 0$  с  $B_0$  до  $B$  температура возрастает за продолжительный отрезок времени с  $t_0$  до  $t_c$ . Учитывая, что до внесения возмущения в стационарном состоянии наблюдалось равенство тепловыделений и теплоотвода

$$Q_n^p \cdot B_0 - (w \cdot F_c \cdot c_z + k_n \cdot F_n) \cdot t_0 = 0, \quad (10)$$

вычтем уравнение (10) из (9) и, введя традиционно используемые обозначения при описании свойств объектов автоматического регулирования  $B - B_0 = x$  и  $t_c - t_0 = y$ , получим уравнение многоемкостного статического объекта [8,20,21] (кипящего слоя) в виде:

$$T_1 \cdot T_2 \cdot \frac{d^2 y}{d\tau^2} + (T_1 + T_2) \cdot \frac{dy}{d\tau} + y = K_y \cdot x \quad (11)$$

В случае монотонного изменения параметров можно, пренебрегая второй производной по времени уравнения (11), представить кипящий слой как одноемкостный статический объект:

$$(T_1 + T_2) \cdot \frac{dy}{d\tau} + y = K_y \cdot x, \quad (12)$$

в котором постоянная времени включает в себя два характерных слагаемых:

$$T_1 = \frac{M \cdot c_c}{w \cdot F_c \cdot c_c + k_n \cdot F_n} = \frac{H \cdot (1-\varepsilon) \cdot \rho_c \cdot c_c}{w \cdot c_c + k_n \cdot F_n / F_c}, \quad (13)$$

$$T_2 = \frac{\rho_c \cdot (1-\varepsilon)}{j^*} = \frac{\rho_c \cdot (1-\varepsilon)}{v_w \cdot (k \cdot S_w) \cdot C_{O_2}} \cdot \frac{\rho_w}{\rho_c \cdot (1-\varepsilon)} = \frac{\rho_w}{v_w \cdot (k \cdot S_w) \cdot C_{O_2}}. \quad (14)$$

Первая составляющая постоянной времени (14) характеризует соотношение между затратами теплоты на нагрев слоя, с одной стороны, и на нагрев продуктов сгорания и теплоносителя в трубах, с другой. Используя соотношение между расходом топлива и концентрацией горючих веществ в слое для начального стационарного состояния  $B_0 = V \cdot j^* \cdot z_0$ , можно записать:

$$T_2 = \frac{\rho_c \cdot (1-\varepsilon)}{j^*} = \frac{V \cdot \rho_c \cdot (1-\varepsilon)}{B_0} \cdot z_0 = \frac{M \cdot z_0}{B_0}. \quad (15)$$

Используя данное выражение, вторую составляющую постоянной времени  $T_2$  можно легко определить из эксперимента.

Таким образом, на инерционность кипящего слоя основное влияние оказывают его высота, условия выгорания (коэффициент избытка воздуха, скорость дутья) и концентрация горючих в слое, зависящая от кинетических характеристик реагирования шихты. Оценочные расчеты для обжиговой печи № 2 Челябинского цинкового завода дают следующие значения для постоянных времени. Так  $T_1 = 65$  минут,  $T_2 = 3,5$  минуты, тогда суммарная постоянная времени составляет 68,5 минут. Таким образом, основная инерция заключается в чрезвычайно большой массе слоя (более 100 тонн материала). И если концентрация горючих меняется сравнительно быстро (в течение 15 минут) (рисунок 7а), то температура слоя при изменении расхода шихты выходит на новое стационарное состояние чрезвычайно медленно, в течение 3,5 часов (рисунок 7б).

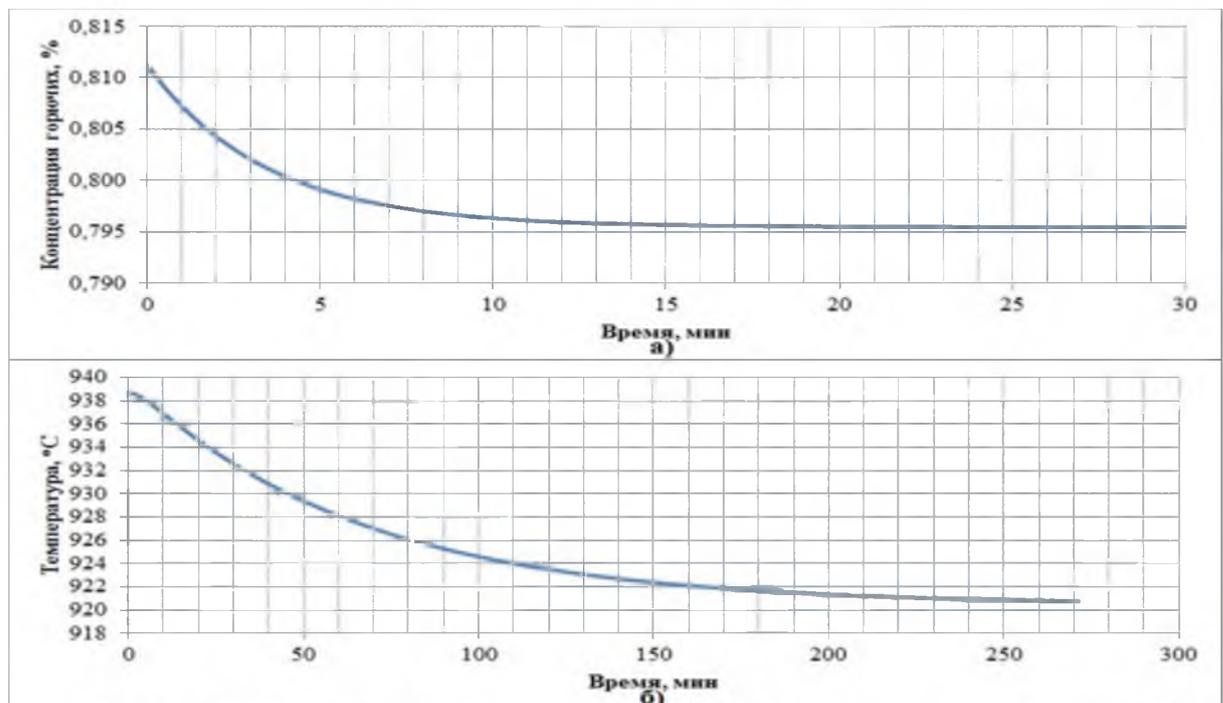


Рисунок 7. Изменение концентрации горючих в слое (а) и температуры слоя (б) с течением времени

На рисунке 8 приведено сопоставление расчетных и экспериментальных данных на отрезке времени со 170 по 210 минуту от начала смены.

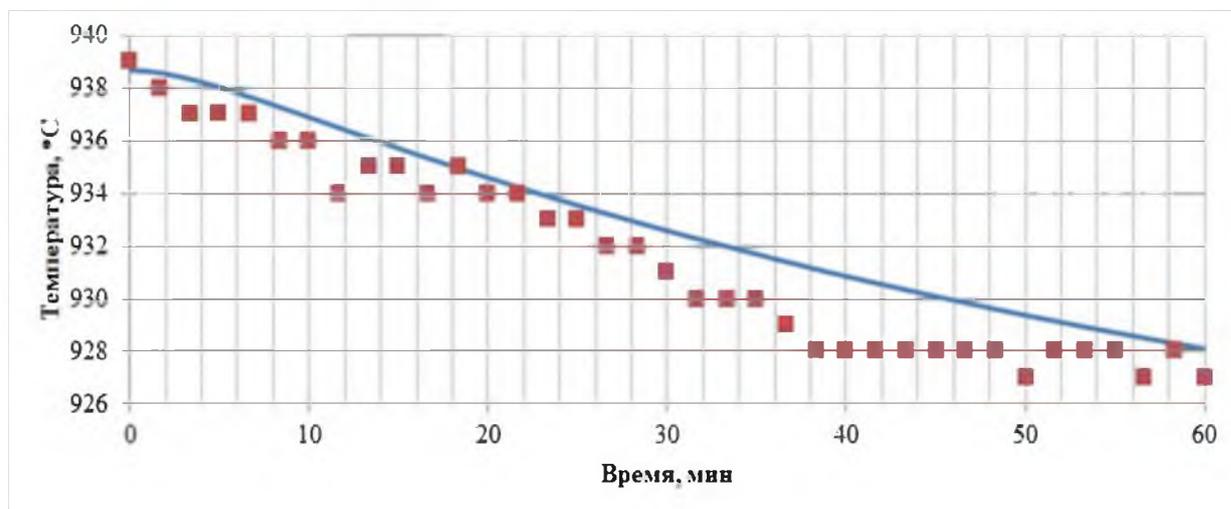


Рисунок 8. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по изменению температуры слоя с течением времени при ступенчатом изменении расхода шихты: линия – расчет, точки – эксперимент

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов Ю. М. Гидрометаллургия цинка: Учеб. пособие / Ленингр. горн. ин-т им. Г.В. Плеханова. — Л. : ЛГИ, 1978. - 95 с.
2. Романтеев Ю.П. Metallургия тяжелых цветных металлов. Свинец. Цинк. Кадмий / Ю.П. Романтеев, В. П. Быстров; Нац. исслед.технол. ин-т "МИСиС".— Москва: МИСиС, 2010. - 575 с.
3. Термические константы веществ. /Под ред. В.П. Глушко, ВИНТИ. - М., 1965-1981. Вып. I-X.
4. Плетнев Г.П. Автоматическое регулирование и защита теплоэнергетических установок. Учебник для энергетических и энергостроительных техникумов. Изд. 2-е, перераб. И доп. - М., Энергия, 1976. - 424 с. с ил.
5. Добкин В.М., Дулеев Е.М., Фельдман Е.П. Автоматическое регулирование тепловых процессов на электростанциях. – М.: Госэнергоиздат, 1959. – 399 с.
6. Ким Д.П. Теория автоматического управления. – М.: Физматлит, 2003. – 288 с.

#### FLUIDIZED BED ROASTED FURNACE AS AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM SUBJECT

V.A. Munts, S.A. Ivakina, Yu.G. Munts, N.S. Vasilevskyi

Ural Federal University named by the First President of Russia B.N. Yeltsin,  
Ekaterinburg, Russia

**Annotation.** The relevance of the research is proved by continuous increase of zinc usage in the world. Obtaining zinc is an expensive process, and one of the stages is roasting of sulphide of zinc concentrates (blend) in a fluidized bed furnace with oxygen-enriched air blast. Experimental data are shown on kinetics of sphalerite and pyrite oxidation and actually charge when their air oxidation and oxygen-enriched air. Presented model describes transient processes in fluidized bed when changing batch

flow. Time constants of transient processes were defined by means of experiments and calculation. A huge mass in fluidized bed in furnaces resulted in big bed inertia, that leads to necessity of automatic control system usage.

**Key words:** zinc concentrated; fluidized bed; automatic control system; time constant; reaction rate constant

#### REFERENCES

1. Smirnov Yu.M. Hydrometallurgy of zinc: Study guide / Leningr. maining institute named after G.V. Plehanov. L. : LGI, 1978. 95 h.

2. Romanteev Yu. P. Iron and steel making industry. Plumb. Zinc. Cadmium. / Yu.P. Romanteev, V.P. Bystrov; Moscow. Moscow Institute of Steel and Alloys, 2010. 575 p.

3. Thermal constants of materials. /Ed. by. V.P. Glushko, All-Union Institute of Scientific and Technical Information. -M.; 1965-1981. Issue I-X.

4. Pletnev G.P. Avtomaticheskoe regulirovanie i zashchita teploenergeticheskikh ustanovok. [Automatic control and protection of thermal power plants]. Uchebnik dlya energeticheskikh i energostroitel'nykh tekhnikumov. Izd. 2-e, pererab. I dop. [Tutorial for energy and energy building technical schools. Second edition, revised and supplemented]. Moscow: Energiya Publ., 1976, 424 p.

Dobkin V.M., Duleev E.M., Fel'dman E.P. Avtomaticheskoe regulirovanie teplovykh protsessov na elektrostantsiyakh [Automatic control of thermal processes in power plants]. Moscow: Gosenergoizdat Publ., 1959, 399 p.