

С. Торайғыров атындағы Павлодар мемлекеттік университетінің  
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ  
Павлодарского государственного университета имени С. Торайгырова

---

## ПМУ ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы  
1997 жылдан бастап шығады



## ВЕСТНИК ПГУ

Энергетическая серия  
Издается с 1997 года

№ 2 (2016)

---

Павлодар

## НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

Павлодарского государственного университета имени С. Торайгырова

Энергетическая серия

выходит 4 раза в год

---

### СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на учет средства массовой информации

№ 14310-Ж

выдано

Министерством культуры, информации и общественного согласия  
Республики Казахстан

---

Бас редакторы – главный редактор

Кислов А. П.

*к.т.н., доцент*

Заместитель главного редактора

Левьков Ю. А., *к.т.н., доцент*

Ответственный секретарь

Акаев А. М.

### Редакция алкасы – Редакционная коллегия

Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Россия)</i>
Боровиков Ю. С.,	<i>к.т.н., профессор (Россия)</i>
Новожиллов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Горюнов В. Н.,	<i>д.т.н., профессор (Россия)</i>
Говорун В. Ф.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Захаров И. В.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Клепаль М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Гастенов А. Д.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Хацевский В. Ф.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Нургожина Б. В.	<i>технический редактор</i>

---

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели.

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник ПГУ» обязательна

## СОДЕРЖАНИЕ

<i>Азимов А. М., Жантасов К. Т., Сатаев М. И., Ортаев А. Е., Калдыккозов Г. А.</i>	
Особенности и закономерности механизма селективного извлечения ионов солей из воды полиамидными мембранами .....	9
<i>Антонцев А. В., Жумажанов С. К., Амренова Д. Т., Исабеков Д. Д.</i>	
Применение методов теории распознавания образов к проектированию систем автоматического управления .....	10
<i>Герасименко Т. С.</i>	
Структура распределения потерь электроэнергии в электрических сетях и трансформаторах с разработкой комплекса мероприятий по их снижению .....	23
<i>Жалмагамбетова У. К., Нуканов К. К.</i>	
Автоматизированный приводной трубный ключ обеспечивает безопасную и более эффективную работу .....	33
<i>Жаптаргазинова К. Х., Торощина Д. А.</i>	
Исследование модифицированных водорастворимых полимеров в качестве флокулянтов для очистки сточной воды .....	37
<i>Исабеков Ж. Б.</i>	
Анализ методов расчетов токов при однофазных замыканиях на землю в кабельных сетях 3-10 кВ .....	46
<i>Кайдар А. Б., Шапкенов Б. К., Кислов А. П., Марковский В. П., Антонцев А. В.</i>	
Транзисторные инверторы с широтно-импульсной модуляцией базовых векторов .....	54
<i>Кислов А. П., Шапкенов Б. К., Кайдар А. Б., Шокбаев Д. Т., Кайдар М. Б., Марковский В. П., Шарипиденов Д. С.</i>	
Симметрирование трехфазных систем .....	62
<i>Кислов А. П., Шапкенов Б. К., Кайдар А. Б., Шокбаев Д. Т., Кайдар М. Б., Марковский В. П., Шарипиденов Д. С.</i>	
Исследования качества и дополнительных потерь электрической энергии в распределительных сетях 0,38 кВ .....	72
<i>Копырин В. С., Марковский В. П., Шапкенов Б. К., Кайдар А. Б., Шажман Е. Т.</i>	
Особенности дифференциальной защиты электрической печи сопротивления .....	83
<i>Лукутин В. В., Мустафина Р. М., Сарсимеев Е. Ж., Сурнов М. А.</i>	
Определение оптимального соотношения установленных мощностей ветро- и дизель-генераторов в автономных ветродизельных комплексах электроснабжения .....	88

<i>Мендыбаев С. А., Байкенова Н. Б., Кривко Л. И., Садвакасова Г. М., Рахимбердинова Д. М.</i>	
Анализ основных структур и характеристик телекоммуникационных сетей .....	95
<i>Мендыбаев С. А., Байкенова Н. Б., Кривко Л. И., Садвакасова Г. М., Рахимбердинова Д. М.</i>	
Импульсно кодовый модулятор систем телекоммуникаций .....	102
<i>Нефтисов А. В., Садуакасова А. Д.</i>	
Анализ технического и программного обеспечения ТЭЦ-3 для реализации автоматизированной системы расчета техничо-экономических показателей .....	108
<i>Никифоров А. С., Приходько Е. В., Кинжибекова А. К., Карманов А. Е.</i>	
Методы повышения энергоэффективности на котлах малой мощности ..	113
<i>Никифоров А. С., Приходько Е. В., Кинжибекова А. К., Григорьев О. О.</i>	
Физическое моделирование котла с кипящим слоем при работе на топливных брикетах .....	121
<i>Парамонов Д. Ф., Масакбаева С. Р., Парамонов Ф. П.</i>	
Оценка приема разбавления при использовании рентгенофлуоресцентного метода анализа (сообщение 1) .....	128
<i>Парамонов Д. Ф., Масакбаева С. Р., Парамонов Ф. П.</i>	
Использование разбавителя с известными массовыми коэффициентами поглощения при полихроматическом рентгенофлуоресцентном анализе (сообщение 2) .....	137
<i>Парамонов Д. Ф., Ковтарева С. Ю., Парамонов Ф. П.</i>	
Использование поваренной соли в качестве разбавителя при анализе чёрных шлаков металлургического производства (сообщение 3) .....	144
<i>Рындин В. В., Абитова Д. М.</i>	
Расчёт магистрального нефтепровода по четырём вариантам в системе MATHCAD .....	153
<i>Тажибай Е. Р., Искаков Е. А., Магаз А. А., Достоева А. М.</i>	
Сравнительный анализ легирующих добавок применительно к изготовлению термостойких проводов на основе алюминия .....	163
<i>Хисматуллин А. С., Хасанов Д. С.</i>	
Исследование теплопереноса в промышленных силовых трансформаторах с элегазовым охлаждением .....	174
Правила для авторов .....	182

УДК 621.184

**А. С. Никифоров<sup>1</sup>, Е. В. Приходько<sup>2</sup>, А. К. Кинжибекова<sup>3</sup>,  
О. О. Григорьев<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теплоэнергетика»; <sup>2</sup>в.т.н., профессор, кафедра «Теплоэнергетика», Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова, г. Павлодар; <sup>3</sup>к.т.н., директор, департамент энергетики, металлургии и информационных технологий, Инновационный Евразийский университет, г. Павлодар; <sup>4</sup>магистрант, Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова, г. Павлодар

## **ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОТЛА С КИПЯЩИМ СЛОЕМ ПРИ РАБОТЕ НА ТОПЛИВНЫХ БРИКЕТАХ**

*В статье приводятся результаты физического моделирования азродинамических процессов в топочной камере с кипящим слоем.*

*Ключевые слова: топливные брикеты, энергоэффективность, возобновляемые источники энергии*

### **ВВЕДЕНИЕ**

Одним из главных преимуществ использования топок кипящего слоя при сжигании угля связано с возможностью организации устойчивого горения при температуре кипящего слоя, находящегося в пределах от 750 до 950 °С, и при условии однородности по классу крупности твердого топлива, подаваемого в кипящий слой. При данном уровне температур предотвращает образование топливных оксидов азота в сравнении с факельным сжиганием. Котлы с топками кипящего слоя обладают уникальной «всеядностью» к топливам, отличными показателями по выбросам оксидов серы и азота, высоким коэффициентом полезного действия и особенно перспективны при переходе на сжигание высокозольных переувлажненных углей, а также древесных и других горючих отходов.

### **ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ**

Если рассматривать сжигание твёрдого топлива в котлах с кипящим слоем небольшой производительности (как правило, водогрейных), то можно сделать вывод о том, что наименее затратным и наиболее простым способом будет являться сжигание биомассы.

Технологии сжигания твердого биотоплива в виде древесных отходов можно разделить на сжигание сухого биотоплива (влажностью до 30 %) и сжигание влажного биотоплива (влажностью до 50-65 %).

Можно выделить основные преимущества сжигания биотоплива в кипящем слое. Во-первых, он позволяет повышать эффективность сжигания низкокачественных или нетрадиционных видов топлива при незначительных затратах на топливоподготовку. Второе преимущество – экологичность, в частности, количество выбросов токсичных оксидов серы в атмосферу может быть снижена больше чем на 90 %. Третье преимущество – высокая эффективность сжигания и теплообмена.

Теория кипящего слоя начала разрабатываться достаточно давно, но при этом и сегодня существует множество вопросов, связанных с оптимизацией конструкций таких топок, а также оптимизацией режимов их работы. Однако в настоящее время теоретическая база для решения этих проблем явно слаба. Этому есть множество причин. Так, созданные теории, достаточно точно описывают поведение материала при псевдоожигении с гладкими, сухими и одинакового размера шарами. При реальных условиях – наличии частиц неправильной формы, переменной плотности по объёму, теории дают значительную погрешность. Таким образом, одним из решений проблем моделирования кипящего слоя является создание физических моделей.

Для исследования аэродинамики топочной камеры при работе на топливных брикетах с кипящим слоем авторами была изготовлена физическая модель топочной камеры котла.

В качестве котельного агрегата для физического моделирования топки с кипящим слоем был выбран водогрейный котёл с форсированным низкотемпературным кипящим слоем [1].

Автор [2] приводит значения скоростей начала псевдоожигения и параметры воздухораспределительных решёток при исследовании кипящего слоя на физической модели (таблица 1 и 2).

Таблица 1 – Параметры воздухораспределительных решёток

Решётка	Диаметр отверстий, мм	Число отверстий, шт	Живое сечение решётки	
			м <sup>2</sup>	%
1	2,5	722	0,0035	18,2
2	4,5	324	0,0052	26,4

Таблица 2 – Аэродинамические сопротивления воздухоораспределительных решёток

Метод полученных данных	Аэродинамическое сопротивление, $\Delta P$ , Па	
	$d_{отв} = 2,5$ мм	$d_{отв} = 4,5$ мм
Расчёт	1005	455
Эксперимент	220	70

Таким образом, используя данные лабораторных исследований, размеры физической модели реального котла можно определить все технические характеристики разрабатываемой модели. При этом используем следующие формулы.

Расход воздуха на горение,  $V_B$ :

$$V_B = V^0 \cdot \alpha_T \cdot B \cdot (1 - q_4),$$

где  $V^0$  – теоретически необходимое количество воздуха,  $\text{м}^3/\text{кг}$ ;

$\alpha_T$  – коэффициент избытка воздуха в топке;

$B$  – расход топлива,  $\text{кг}/\text{с}$ ;

$q_4$  – механический недожог, %.

Диаметр выходных колпачков воздухоораспределительной решетки:

$$d_{отв} = \sqrt{\frac{V_B}{W_B \cdot n \cdot \pi}},$$

где  $W_B$  – скорость воздуха,  $\text{м}/\text{с}$ ;

$n$  – количество колпачков.

С учётом имеющихся чертежей котла решено было изготовлять модель в масштабе 1:14. Таким образом, физическая модель топочной камеры должна быть квадратной, со стороной 200 мм. Диаметр отверстия примыкаем равным 5 мм, живое сечение решётки  $0,007 \text{ м}^2$  (17,5 %). Скорость воздуха можно изменять от 3 до 10  $\text{м}/\text{с}$ .

Процессы, связанные с гидродинамикой «кипящего» слоя при использовании его на котлах малой и средней производительности, можно рассматривать как случайные и анализировать их с помощью вероятностных методов. Для эффективного анализа работы этих агрегатов необходимо выявить взаимосвязи между факторами, определяющими ход процесса и выходом данного процесса, а также представить их в количественной форме – в виде математической модели:

$$l = l(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

где  $l$  – высота «кипящего» слоя в топочной камере;

$x_1, x_2, \dots, x_n$  – факторы, оказывающие влияние на ход этого процесса.

Необходимо получить не только вид данной зависимости, опираясь на данные эксперимента, но и оценить влияние каждого фактора на величину высоты слоя.

Для определения основных факторов, влияющих на высоту «кипящего» слоя были проведены замеры на физической модели топочной камеры котельного агрегата.

В физической модели использовались следующие материалы:

– пластик, плотностью  $345 \text{ кг/м}^3$ , правильной цилиндрической формы ( $h=5 \text{ мм}$ ;  $\varnothing=5 \text{ мм}$ );

– пластик, плотностью  $345 \text{ кг/м}^3$ , правильной цилиндрической формы ( $h=8 \text{ мм}$ ;  $\varnothing=7,5 \text{ мм}$ );

– пластик, плотностью  $550 \text{ кг/м}^3$ , правильной цилиндрической формы ( $h=5 \text{ мм}$ ;  $\varnothing=5 \text{ мм}$ );

– силикагель, плотностью  $7077 \text{ кг/м}^3$ , шарообразной неправильной формы (эквивалентный диаметр  $\varnothing_{\text{экв}}=5 \text{ мм}$ );

– силикагель, плотностью  $7077 \text{ кг/м}^3$ , шарообразной неправильной формы (эквивалентный диаметр  $\varnothing_{\text{экв}}=8 \text{ мм}$ )

Исходя из анализа оценки влияния различных факторов на высоту «кипящего» слоя при сжигании топлива, в качестве факторов эксперимента выбираем:

$x_1$  – размер частиц, м;

$x_2$  – плотность частиц,  $\text{кг/м}^3$ ;

$x_3$  – скорость воздуха в модели топочной камеры, м/с;

$x_4$  – высота покоящегося слоя, м.

Из физических соображений можно предположить, что взаимосвязь различных факторов на высоту «кипящего» слоя при сжигании топлива имеет следующий вид:

$$y(b, x) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{l=1}^n \sum_{k=l+1}^n b_{lk} x_l x_k + \sum_{l=1}^n \sum_{k=l+1}^n \sum_{i=k+1}^n b_{lki} x_l x_k x_i + \dots + b_{12\dots n} x_1 x_2 \dots x_n,$$

где  $b_0$  – свободный член, равный выходу при  $x=0$ ;

$b_i$  – коэффициент регрессии, указывающий на влияние фактора на процесс;



$b_j$  – коэффициенты регрессии, определяющие степень воздействия на процесс взаимодействия факторов.

Определив коэффициенты регрессии этого уравнения, получим представление о влиянии изучаемых факторов на величину тепловых потерь. Расчет коэффициентов регрессии ведется по следующим формулам:

$$b_j = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{q}_j x_j^j, j = 1, \dots, n,$$

$$b_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \bar{q}_j x_j^i \dots x_j^j, i, j = 1, 2, \dots, n,$$

где  $\bar{q}_j$  – значение среднего выхода процесса в j-ом варианте;

$x_j^i$  – значение фактора в j-ом варианте.

Необходимое число экспериментов для нашего исследования составляет величину:  $N=2^n$ , где n – количество исследуемых факторов. Для получения оценок коэффициентов данной модели в принципе можно использовать полные факторные планы. Однако, как правило, модель включает не все, а лишь некоторые взаимодействия первого порядка (парные взаимодействия), редко взаимодействия второго порядка и почти никогда не содержит взаимодействий выше третьего порядка.

Для упрощения задачи будем рассматривать только линейную модель процесса без учета парных взаимодействий. Постановка задачи формулируется следующим образом: требуется экспериментальным путем найти интерполяционную формулу, с помощью которой можно было бы описать зависимость высоты «кипящего» слоя от перечисленных факторов:

$$y(b, x) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_4 x_4.$$

В каждой экспериментальной точке поставим по два эксперимента. Для расчета оценок коэффициентов будем использовать среднее арифметическое

этих наблюдений для каждой точки  $\bar{y}^j = \frac{y^{j1} + y^{j2}}{2}$ . Далее, базирясь на данные экспериментов, рассчитываем оценки коэффициентов, получаем вид интерполяционной формулы.

Как было уже сказано выше, количество основных факторов, влияющих на величину высоты «кипящего» слоя, равно 4. Поэтому количество взаимодействий  $N=2^n=2^4=16$ . Таким же будет минимальное количество необходимых опытов. Так как наша цель состоит в том, чтобы, пользуясь по возможности малым числом опытов, извлечь необходимую информацию об исследуемом объекте, оказывается целесообразным для построения модели применить дробный факторный план.

Дробные планы типа  $2^{n-p}$  строятся так же, как и для линейных моделей, т.е. матрицу полного факторного плана для  $(n-p)$  основных факторов дополняют столбцами, элементы которых представляют произведения элементов определённых столбцов основных факторов. Обычно предполагается, что только некоторые парные взаимодействия и взаимодействия высших порядков являются значимыми. При этом значимые взаимодействия рассматриваются как самостоятельные факторы, а незначимые приравниваются к факторам, не вошедшим в число основных. Для определения способа образования каждого из  $p$  столбцов дробного факторного плана вводится понятие генератора плана. Генератор представляет собой произведение основных факторов, определяющее значение элементов каждого из дополнительных  $p$  столбцов матрицы плана.

Опираясь на порядок оценивания коэффициентов при использовании данного плана, можно, составив план эксперимента, получить матрицу планирования эксперимента (Таблица 3).

Таблица 3 – Матрица планирования эксперимента

№	Планирование					Выход процесса
	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	Высота слоя, м
1	+	+	+	+	+	0,085
2	+	-	+	+	-	0,030
3	+	+	-	+	-	0,065
4	+	-	-	+	+	0,160
5	+	+	+	-	+	0,060
6	+	-	+	-	-	0,015
7	+	+	-	-	-	0,012
8	+	-	-	-	+	0,050

Таким образом интерполяционная формула будет иметь следующий вид:

$$\hat{y} = 0,06 - 0,004 x_1 - 0,012 x_2 + 0,025 x_3 + 0,029 x_4.$$

### ВЫВОДЫ

Проведенный анализ полученной зависимости показывает, что наибольшее влияние на величину высоты «кипящего» слоя, оказывает фактор  $x_4$  (высота покоящегося слоя) и в меньшей степени, но практически с одинаковым влиянием – скорость воздуха в модели топочной камеры; менее значительное влияние - плотности частиц и их размера.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Сидоров, А. М., Скрябин, А. А., Медведев, А. И., Щербаков, Ф. В. Опыт внедрения котлов малой мощности с топками форсированного низкотемпературного кипящего слоя // Новости теплоснабжения. – № 1. – 2009. – С. 57-66.

2 Семенов, С. А. Модельные исследования гидродинамики аппаратов с кипящим слоем // Системы. Методы. Технологии. – № 2. – 2009. – С. 82-86.

Материал поступил в редакцию 10.05.16.

*А. С. Никифоров<sup>1</sup>, Е. В. Приходько<sup>1</sup>, А. К. Киржибекова<sup>2</sup>, О. О. Григорьев<sup>1</sup>*

*Отындық брикеттерде жұмыс істеу кезінде қайнап тұратын қабатпен қазанды физикалық модельдеу*

<sup>1</sup>С. Торайғыров атындағы

Павлодар мемлекеттік университеті, Павлодар қ.;

<sup>2</sup>Иновациялық Еуразия университеті, Павлодар қ.

Материал 10.05.16 баспаға түсті.

*A. S. Nikiforov, E. V. Prikhodko, A. K. Kirzhibekova, O. O. Grigoryev*

*Physical modeling of fluidized bed boilers at work on fuel briquettes*

<sup>1</sup>S. Toraihyrov Pavlodar State University, Pavlodar;

<sup>2</sup>Innovative University of Eurasia, Pavlodar.

Material received on 10.05.16.

*Мақалада қайнап тұратын қабатпен оттық камерадағы аэродинамикалық процестердің физикалық модельдеуінің нәтижелері келтіріледі.*

*The article presents the results of physical modeling of aerodynamic processes in the combustion chamber with a fluidized bed.*