

**И.В. Брейдо, Н.И. Карасев,  
А.А. Калинин**

**УДК 621.3.036.663**

*Карагандинский государственный  
технический университет*

## **ВЫБОР ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРЕВАТЕЛЕЙ**

*Мақалада электрэнергиясын жылуэнергиясына түрлендіретін құбырлы реактормен гидродинамикалық жылыту тиімді параметрлерін анықтау жұмысына сипаттама берілген.*

*The article describes the work to define the optimal parameters of hydrodynamic heaters with tubular reactors that convert electrical energy into heat.*

Гидродинамические нагреватели (ГДН) принцип действия которых основан на извлечении внутренней энергии из жидкой среды в процессе активации с помощью механического воздействия зарекомендовали себя эффективными источниками теплоэнергии. Это перспективное направление развития нетрадиционной энергетики.

Конструктивные узлы ГДН должны обеспечивать вихревое движение рабочей жидкости в трубном реакторе, формирование непрерывного кавитационного процесса в объеме трубного реактора, циркуляцию рабочей жидкости в замкнутом теплоэнергетизирующем контуре, что в совокупности и ведет к выделению из рабочей жидкости внутренней энергии в форме тепла.

В то же время не в полной мере исследованы процессы преобразования электрической энергии в механическую, с последующим преобразованием механической в тепловую и отсутствуют исследования устанавливающие взаимосвязи теплопроизводительности и коэффициента преобразования энергии с конструктивно-эксплуатационными параметрами ГДН с реактором трубного типа.

Также не разработаны методы проектирования реактора ГДН и не определены методы установления оптимальных параметров ГДН, обеспечивающих максимум теплопроизводительности и коэффициента преобразования энергии.

Для решения указанных проблем выполнен комплекс работ, включающий:

- разработку и изготовление установки для изучения энергетических характеристик ГДН жидких сред;
- создание автоматизированной системы научных исследований ГДН (АСНИ-ГДН);
- разработку методов проведения экспериментов;
- выполнение экспериментальных исследований;
- определение оптимальных параметров ГДН;
- разработку методики проектирования реактора ГДН.

Работы проводились на испытательном стенде СГДН-05 [1]. Стенд создан для исследования энергетических характеристик экспериментальной серии гидродинамичес-

кого нагревателя, что позволило выполнять весь комплекс задач планирования, сбора и обработки измерений электрических, гидродинамических и теплофизических процессов на испытуемых образцах ГДН. Основные геометрические параметры экспериментальной серии ГДН приведены в таблице 1.

Была разработана информационная система АСНИ-ГДН для измерения и регистрации переменных состояния объектов гидродинамического стенда и управления режимом работы циркуляционного насоса в реальном времени. Информационно-измерительная среда стенда обеспечивает сбор, нормализацию и передачу данных о текущих значениях всех физических величин в информационную сеть для обмена с функциональными блоками управления, регулирования и моделирования, используемых для изучения механизма действия вихревых теплогенераторов с трубным реактором [2].

Таблица 1

Основные геометрические параметры экспериментальной серии ГДН

Номер экземпляра	Длина трубного реактора, мм	Внутренний диаметр реактора, мм	Диаметр выходного сечения конфузора, мм	Диаметр тормозного дросселя кавитатора, мм
1	714	51	18	41,82
2	1200	100	30	82
3	1500	150	48	105
4	714	100	30	82
5	1200	150	48	105
6	1500	51	18	41.82
7	714	150	48	105
8	1200	51	18	41.82
9	1500	100	30	82

Переменные состояния процесса вихревого движения рабочей жидкости, измеряемые в дискретные промежутки реального времени и накапливаемые в базе данных автоматизированной системы АСНИ-ГДН:

- 1) температура рабочей жидкости на входе в спиральный подвод,
- 2) температура рабочей жидкости на выходе кавитатора,
- 3) давление рабочей жидкости на входе в спиральный подвод,
- 4) давление рабочей жидкости на выходе из кавитатора,
- 5) мощность, потребляемая электродвигателем циркуляционного насоса из сети,
- 6) время работы циркуляционного насоса,
- 7) средняя температура рабочей жидкости в аккумулирующей емкости.

Главной целевой функцией при исследовании физического механизма действия ГДН является теплопроизводительность. При этом цель экспериментального исследования сводится к получению таких значений параметров конструктивных компонентов ГДН, которые обеспечат максимальную теплопроизводительность при фиксированном типе циркуляционного насоса и мощности его электропривода.

Для косвенного измерения теплопроизводительности ГДН в *i*-ом эксперименте использовалось выражение [3]:

$$Q_i = k G c_p \left( \frac{\partial t}{\partial \tau} \right)_i, \quad (1)$$

где  $Q_i$  – теплопроизводительность ГДН, кВт;

$k = 0.001163$  - коэффициент преобразования размерности теплового потока из ккал/ч в кВт;

$G$  – масса рабочей жидкости в объеме циркуляционного контура, кг;  
 $c_p$  – удельная теплоемкость рабочей жидкости, ккал/кг $^{\circ}$ С. Принимаем расчетную температуру рабочей жидкости  $t=70^{\circ}$ С. Тогда расчетное значение удельной теплоемкости принимаем равным  $c_p = 1$  ккал/кг $^{\circ}$ С;

$(\frac{\partial t}{\partial \tau})_i$  – темп нагрева рабочей жидкости в реакторе ГДН в  $i$ -ом эксперименте:

$$(\frac{\partial t}{\partial \tau})_i = (t_{кци} - t_{нци}) / (\tau_{ки} - \tau_{ни}), \text{ } ^{\circ}\text{С/ч} \quad (2)$$

где  $t_{кци}$ ,  $t_{нци}$  – соответственно, средняя температура рабочей жидкости в циркуляционном контуре в конце и начале интервала измерения в  $i$ -ом эксперименте,  $^{\circ}$ С;

$\tau_{ки}$ ,  $\tau_{ни}$  – интервал работы циркуляционного насоса, в  $i$ -ом эксперименте на текущей строке матрицы планирования, ч.

В качестве варьируемых факторов или независимых переменных были выбраны следующие измеряемые свойства ГДН:

- 1) X1 – длина трубного реактора ( $L$ ),
- 2) X2 – внутренний диаметр трубного реактора ( $d$ ),
- 3) X3 – давление рабочей жидкости на входе спирального подвода ( $P$ ),
- 4) X4 – время работы циркуляционного насоса ( $t$ ).

Для решения таких задач эффективным является применение методов планирования экспериментов, опирающихся на объединение детерминированного и вероятностного подходов на основе латинских квадратов и многофакторных уравнений Протодьяконова-Тедера. Экспериментальное исследование процессов механоактивации в ГДН с трубным реактором сопряжено с изготовлением физических образцов генераторов, оснащенных соответствующим набором измерительных датчиков, а поэтому минимизация затрат на экспериментальные исследования имеет существенное значение. Исходя из этого требования, выбран такой план исследований, разрешающая способность которого обеспечивается при минимальном числе экспериментов.

Каждая строка этого плана представляет конкретные условия эксперимента. В эту же строку записывается и результат. Из результатов формируются выборки для трехточечных частных зависимостей теплопроизводительности от каждого из факторов:  $q_1(X_1)$ ,  $q_2(X_2)$ ,  $q_3(X_3)$ ,  $q_4(X_4)$ . Так как нулевому значению частных зависимостей по физическим соображениям может соответствовать нулевое значение обобщающей многофакторной зависимости, то ее следует формировать как произведение частных зависимостей  $q_i(X_i)$  в виде:

$$Q_g = \frac{\prod_{i=1}^k q_i(X_i)}{q_{cp}^{k-1}}, \quad (3)$$

где  $Q_g$  – многофакторная функция Протодьяконова;

$q_i(X_i)$  – частные функции одного аргумента для каждого из изучаемых факторов;

$k$  – число частных функций (факторов);

$q_{cp}$  – среднее значение всех учитываемых результатов эксперимента, по которому выполняется нормирование частных функций.

Для представления теплопроизводительности ГДН в форме целевой П-функции  $Q_i(L, d, P, t)$  выбраны следующие четыре частные функции теплопроизводительности одного аргумента:

$q_1(L)$  – зависимость теплопроизводительности от длины трубного реактора;

$q_2(d)$  – зависимость теплопроизводительности от внутреннего диаметра реактора;

$q_3(P)$  – зависимость теплопроизводительности от давления на входе спирального подвода;

$q_4(t)$  – зависимость теплопроизводительности от времени работы насоса.

Для проверки адекватности любых зависимостей использован коэффициент нелинейной множественной корреляции:

$$R = \sqrt{1 - \frac{(n-1) \sum_{i=1}^n (q_{zi} - q_{ti})^2}{(n-k-1) \sum_{i=1}^n (q_{zi} - q_{cp})^2}}, \quad (4)$$

где n – число описываемых точек (для принятого плана эксперимента n=3); k – число действующих факторов: для частных аппроксимирующих функций k=1, а для обобщающей функции k=4);  $q_{zi}$  – экспериментальное значение результата, в нашем случае теплопроизводительности;  $q_{ti}$  – теоретическое (расчетное) значение результата;  $q_{cp}$  – среднее экспериментальное значение.

Теоретические расчеты проводились в среде информационно-графической системы ГИД-99w на том же наборе факторов, что и в экспериментальных исследованиях ГДН.

Значимость коэффициента корреляции и вместе с ним и проверяемой аппроксимирующей функции для 95% уровня достоверности определяется неравенством:

$$t_r = \frac{R\sqrt{n-k-1}}{1-R^2} > 2, \quad (5)$$

Адекватность частных функций теплопроизводительности выполнена с помощью коэффициента R нелинейной множественной корреляции по критерию значимости tR (5) с 95 % уровнем достоверности. Результаты оценок адекватности приведены в таблице 2.

Таблица 2

Оценка значимости частных функций теплопроизводительности  $q_i$

$q_i$	R	Значимость по R	tR (tR > 2)	Значимость по tR > 2
q1(L)	0.729919874	Значима	1.562271727	Не значима
q2(d)	1	Значима	$\infty$	Значима
q3(P)	0.999999876	Значима	4018579.401	Значима
q4(t)	0.999999998	Значима	210614020.5	Значима

Результирующая аппроксимирующая функция теплопроизводительности ГДН с реактором трубного типа сформированная по структуре многофакторной функции Протодяконова получила следующее выражение:

$$Q_{т}(L,d,P,t) = (5E - 06L^2 - 0,0114L + 12,035)(-0,0002d^2 + 0,0304d + 4,9627) * (-67,94P^2 + 87,376P - 21,631)(-2,7269t^2 + 6,8838t + 2,1474)/5,883^3, \quad (6)$$

При этом функция оказалась значимой (R=0,9974779: tR =197,99783 >>2), что позволяет использовать ее в физически целесообразном диапазоне параметров (L,d,P,t). В таблице 3 приведены экспериментальные и расчетные значения теплопроизводительности ГДН, полученные по (6) и используемые для расчета критерия значимости.

Таблица 3

Экспериментальные  $Q_{э}$  и теоретические значения теплопроизводительности ГДН, предсказанные функцией  $Q_{т}(L,d,P,t)$

№ экс-та	L, мм	d, мм	P, мПа	t, ч	$Q_{э}$ , кВт	$Q_{т}$ , кВт	Относительная погрешность, %
1	714	51	0,70	1	7,310141	7,4634451	2,054066
2	1200	100	0,60	1	6,544449	6,5416125	0,043361
3	1500	150	0,50	1	5,0583	4,8784451	3,686726
4	714	100	0,50	1.5	6,316543	6,1068676	3,433436

5	1200	150	0,70	1.5	5,728096	5,4203673	5,677267
6	1500	51	0,60	1.5	6,968031	7,3099952	4,678036
7	714	150	0,60	2	5,495523	5,0436845	8,9585
8	1200	51	0,50	2	3,840409	4,1524173	7,513896
9	1500	100	0,70	2	5,686121	5,6987936	0,222373
среднее значение, $x_{\text{ср}}$					5,883	5,846	
максимальное значение, $x_{\text{max}}$					7,310	7,463	
минимальное значение, $x_{\text{min}}$					3,840	4,152	
размах вариации, $R=x_{\text{max}}-x_{\text{min}}$					3,469	3,311	
среднее линейное отклонение, $a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  x_i - \bar{x} $					0,8015	0,8972	
среднеквадратическое отклонение, $\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$					0,9436	0,9981	
коэффициент корреляции					0,969676319		

Численное исследование на экстремум функции (6) методом полного перебора пространства параметров (L,d,P,t) с малым шагом изменения, позволило установить оптимальные значения варьируемых факторов и экстремальное значение теплопроизводительности ГДН, приведенные в таблице 4.

Таблица 4

Экстремальные значения параметров теплопроизводительности

Qэ, кВт	Lэ, мм	dэ, мм	Pэ, мПа	tэ, ч
8,118142	714	76	0,65	1,25

Полученное экстремальное значение теплопроизводительности экспериментальной серии составило 8.118 кВт или 6980.22 ккал/ч. При этом тепловые потери через тепловую изоляцию циркуляционного контура составили 204.319 ккал/ч. Тогда полная теплопроизводительность ГДН с учетом тепловых потерь через изоляцию циркуляционного контура составила 7184.542 ккал/ч.

По аналогичной методике была получена результирующая аппроксимирующая функция коэффициента преобразования энергии. Коэффициент преобразования энергии представляет энергетическую эффективность ГДН и определяется из выражения:

$$K_{пэ} = Q_i / P_i * \eta_i, \quad (7)$$

где  $Q_i$ ,  $P_i$ ,  $\eta_i$  - соответственно, теплопроизводительность (тепловая мощность) ГДН, мощность, потребляемая насосным агрегатом и к.п.д. насосного агрегата в режиме i-го параллельного эксперимента на текущей строке матрицы планирования; коэффициент полезного действия установленного на стенде ГДН насосного агрегата мощностью 7.5 кВт равен в номинальном режиме работы (при максимальном КПД)  $\eta = 0.63$ .

$$K_{пэ}(L, d, P, t) = (-2E - 07L^2 + 0,0004L + 1,0773) * (3E - 06d^2 - 0,0033d + 1,5368) * (-5,6123P^2 + 6,9644P - 0,8747) * (-0,3069t^2 + 0,8619t + 0,6949) / 1,246144^3, \quad (8)$$

В таблице 5 приведены экспериментальные и расчетные значения коэффициента преобразования энергии, полученные по (8) и используемые для расчета критерия значимости.

Экстремальные значения параметров ГДН для функции коэффициента преобразования приведены в таблице 6.

Таблица 5

Экспериментальные  $K_{пэ}$  и теоретические  $K_{пт}$  значения коэффициента преобразования энергии, предсказанные функцией  $K_{пт}(L,d,P,t)$

№ экс-та	L, мм	d, мм	P, мПа	t, ч	$K_{пэ}$	$K_{пт}$	Относительная погрешность, %
1	714	51	0,70	1	1,390567	1,401561	0,784411
2	1200	100	0,60	1	1,298502	1,30147	0,22805
3	1500	150	0,50	1	1,06076	1,059132	0,153711
4	714	100	0,50	1.5	1,255804	1,259171	0,267398
5	1200	150	0,70	1.5	1,190674	1,180203	0,88722
6	1500	51	0,60	1.5	1,445389	1,453367	0,548932
7	714	150	0,60	2	1,106787	1,105063	0,156009
8	1200	51	0,50	2	1,296845	1,295095	0,135125
9	1500	100	0,70	2	1,169965	1,168225	0,148944
среднее значение, $x_{ср}$					1,246	1,247	
максимальное значение, $x_{max}$					1,445	1,453	
минимальное значение, $x_{min}$					1,061	1,059	
размах вариации, $R=x_{max}-x_{min}$					0,385	0,394	
среднее линейное отклонение, $a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  x_i - \bar{x} $					0,1014	0,1057	
среднеквадратическое отклонение, $\sigma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$					0,1134	0,1175	
коэффициент корреляции					0,999422927		

Таблица 6

Экстремальные значения параметров коэффициента преобразования энергии

$K_{пэ}$	$L_э$ , мм	$d_э$ , мм	$P_э$ , мПа	$t_э$ , ч
1,5158547	1000	51	0,6	1,4

В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

- разработана конструктивная и технологическая схема ГДН и опытный стенд для изучения энергетических характеристик ГДН жидких сред с автоматизированной системой научных исследований ГДН;
- создана система автоматического управления электрооборудованием стенда для выявления закономерности преобразования электрической энергии в механическую, с последующим преобразованием в тепловую;
- проведены, основанные на методах планирования многофакторного эксперимента, исследования в различных режимах работы ГДН;
- исследованы процессы преобразования электрической энергии в механическую, а механическую в тепловую с получением коэффициента преобразования энергии  $K_{п}$  в диапазоне от 1,061 до 1,445;
- определены методы установления оптимальных параметров ГДН, обеспечивающих максимум теплопроизводительности и коэффициента преобразования энергии, на основе многофакторного эксперимента;

- найдены математические зависимости, устанавливающие взаимосвязи теплопроизводительности и коэффициента преобразования энергии с конструктивно-эксплуатационными параметрами ГДН с реактором трубного типа;
- разработана методика проектирования реактора ГДН.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Калинин А.А. Автоматизированный стенд для исследования энергетических характеристик гидродинамических нагревателей с трубным ротором // Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях: труды 5-ой международ. науч.-практич. конф. (г. Алматы 21-22 сентября 2006 г.). - Алматы, 2006. - С.138-141.
2. Калинин А.А. Архитектура автоматизированной системы научных исследований энергетических характеристик ГДН с трубным ротором // Научные труды международ. симпозиума «Информационные и системные технологии в индустрии, образовании и науке» (21-22 сентября 2006 г.)/ Министерство образования и науки Республики Казахстан, Международная академия информатизации, КарГТУ. – Караганда: Изд-во КарГТУ, 2006. - С.110-112.
3. Карсев Н.И., Калинин А.А. Вероятностно-детерминированный подход при планировании экспериментов для изучения явлений механоактивации вихревого движения жидких сред // Materiały czwartej Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji “Nauka: teoria i praktyka -2007”. Tom 10. Techniczne nauki. Fizyczna kultura i sport.: Przemysł. Nauka i studia - 96 str. С.16-26.