

Теплотехника Heat engineering

Научная статья

УДК 621.18

DOI: 10.14529/power220209

ОПЫТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРО- И ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ СИСТЕМ ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛА НА ЛАБОРАТОРНОМ СТЕНДЕ ПУТЕМ ВНЕДРЕНИЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ УСТРОЙСТВАМИ И СБОРА ДАННЫХ

К.В. Осинцев, osintsev2008@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0791-2980>

С.И. Кускарбекова, sulpan.kuskarbekova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7171-6661>

Н.В. Савостеенко, nikita.epa@gmail.com

Н.М. Максимов, maksimov.nik275@gmail.com

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. Существует мало лабораторных стендов, которые имитируют работу прямоточных котлов, в то время как процессы, происходящие в таких устройствах, относятся к сложным в гидравлическом и теплофизическом аспектах. Изучив гидродинамику теплоносителя в цилиндрическом сложном змеевике, можно повлиять на производительность котла. Движение воздуха через подобный змеевик также представляет интерес для интенсификации процесса теплообмена в паровых прямоточных котлах. Современные приборы автоматизации могут позволить снять показания теплоносителя и воздуха с высокой точностью, а также передать экспериментальные значения на персональный компьютер для сохранения и последующего анализа данных. В статье представлены результаты по проектированию и сборке лабораторного стенда, который предназначен для опытного исследования аэро- и гидравлической систем прямоточного котла с помощью автоматического управления устройствами и сбора данных. Отображены результаты моделирования и экспериментальных данных.

Ключевые слова: прямоточный котел, лабораторный стенд, число Рейнольдса, коаксиальный змеевик

Для цитирования: Опытное исследование аэро- и гидравлической систем прямоточного котла на лабораторном стенде путем внедрения автоматического управления устройствами и сбора данных / К.В. Осинцев, С.И. Кускарбекова, Н.В. Савостеенко, Н.М. Максимов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 2. С. 92–103. DOI: 10.14529/power220209

Original article

DOI: 10.14529/power220209

EXPERIMENTAL STUDY OF AERO- AND HYDRAULIC SYSTEMS IN A DIRECT-FLOW BOILER ON A LABORATORY STAND WITH THE INTRODUCTION OF AUTOMATIC CONTROL OF DEVICES AND DATA COLLECTION

K.V. Osintsev, osintsev2008@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0791-2980>

S.I. Kuskarbekova, sulpan.kuskarbekova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7171-6661>

N.V. Savosteenko, nikita.epa@gmail.com

N.M. Maksimov, maksimov.nik275@gmail.com

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Few laboratory stands can simulate the operation of direct-flow boilers. The processes occurring therein are complex both hydraulically and thermophysically. A study of the fluid dynamics of the coolant in a cylindrical composite coil shows that it is possible to influence boiler performance. The movement of air through coils is also of interest for the intensification of the heat exchange process in direct-flow steam boilers. Modern automation devices can make allow for readings to be taken of the coolant and air with high accuracy. They can also transfer experimental values to a personal computer for data storage and subsequent analysis. The article presents the results of the design and assembly of a laboratory stand, designed for experimental research of aero- and hydraulic systems

© Осинцев К.В., Кускарбекова С.И., Савостеенко Н.В., Максимов Н.М., 2022

of a direct-flow boiler using automatic device control and data collection. The results of modeling and experimental data are presented herein.

Keywords: direct-flow boiler, laboratory stand, Reynolds number, coaxial coil

For citation: Osintcev K.V., Kuskarbekova S.I., Savosteenko N.V., Maksimov N.M. Experimental study of aero- and hydraulic systems in a direct-flow boiler on a laboratory stand with the introduction of automatic control of devices and data collection. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2022;22(2):92–103. (In Russ.) DOI: 10.14529/power220209

Введение

Прямоточные паровые котлы змеевикового типа применяются в промышленности, в жилищной сфере, в строительстве с XX века. Ярким примером служит парогенераторная установка КПА-500Ж. Модельный ряд котлов змеевикового типа претерпел ряд качественных изменений: расширилась линейка за счет увеличения площади теплообмена – увеличения диаметра и количества витков, сложность навивки труб. Условия обслуживания змеевиков остаются затрудненными, при ремонте змеевик необходимо менять полностью, так как частичная замена не всегда возможна и нерентабельна. Уровень аккумулятивной способности подобных котлов близок к нулю из-за конструктивных особенностей: теплоноситель совершает в змеевике один ход и далее поступает потребителю. Однако за короткое время теплоноситель совершает фазовое превращение из воды в пар, тем самым представляя научный интерес, как и перспектива интенсификации парообразования в паровых прямоточных котлах с улучшением работоспособности и обслуживания данных устройств [1].

Постановка задачи

На лабораторном стенде необходимо выполнить симуляцию гидравлического процесса движения теплоносителя по змеевику прямоточного котла. При конструировании необходимо принять упрощенную версию змеевика в виде цилиндрической формы, который является геометрически подобным внешнему змеевику сравниваемого котла модели КПА-500Ж [2].

Моделирование аэродинамической системы стенда заключается в наблюдении и фиксации значений скорости воздуха, протекающего между витками змеевика, который помещен в цилиндр. Данная модель имитирует движение дымовых газов между змеевиками в прямоточном котле.

Для конструирования и сборки лабораторного стенда, который повторяет работу прямоточного котла змеевикового типа в режиме холостого хода без нагрева теплоносителя, необходимо выполнить следующие задачи.

1. Лабораторный стенд должен включать две системы: гидравлическую и аэродинамическую. Итоговыми опытными данными должны быть:

– расход теплоносителя ($\text{м}^3/\text{ч}$) при известных значениях скорости насоса ($\text{об}/\text{мин}$) и давления в змеевике (МПа);

– объемный расход воздуха ($\text{м}^3/\text{ч}$) на трех этапах прохождения по длине цилиндра (вход, середина и выход).

2. Алгоритм работы обеих систем стенда должен быть простым и интуитивно понятным для работы как в научных, так и в образовательных целях для студентов.

3. Проектирование электрической схемы.

4. Проектирование тепломеханической схемы.

5. Подбор гидравлического и электрического оборудования, а также проектирование по металлоконструкции должны быть выполнены с учетом выполнения условий подобия.

6. Монтаж и наладка оборудования.

7. Сбор и анализ данных.

Теоретическая часть

Математическая модель

В лабораторном стенде применяются трубы, изогнутые по винтовой линии, – змеевик. На каждую частицу жидкости, которая движется по изогнутой трубе, действует центробежная сила. Эта сила тем больше, чем больше скорость частицы. Под действием сил частицы в центре трубы движутся к стенке, а частицы у стенки, вытесняемые частицами, проникшими из середины трубы, движутся к центру кривизны. По ранее проведенным теоретическим и экспериментальным исследованиям параметр K , введенный Дином, определяет влияние кривизны при ламинарном течении:

$$K = Re \sqrt{\frac{d}{D}}, \quad (1)$$

где $Re = \bar{\omega}d/\nu$ – число Рейнольдса;

$D = 2R$, R – радиус кривизны змеевика;

d – диаметр трубы (рис. 1).

При $K > 1,35$ кривизна трубы не оказывает влияние на характер движения жидкости. Следовательно, $Re_{кр} = 13,5 \sqrt{\frac{D}{d}}$. Однако это справедливо для малых соотношений d/D [3].

При $3 \leq R/d \leq 200$, $R = 0,5D$, величина критического значения числа Рейнольдса рассчитывается как [3, 4]:

$$Re_{кр} = 1500 \left(\frac{R}{d}\right)^{-0,3}. \quad (2)$$

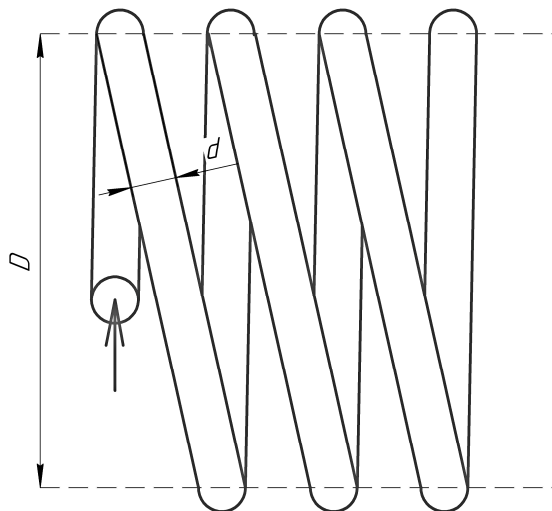


Рис. 1. Схема змеевика
Fig. 1. Coil diagram

При турбулентном течении в изогнутых трубах из-за закрутки потока за счет вторичных течений увеличивается перемешивание, коэффициент теплоотдачи выше, чем в прямых трубах. Переход ламинарного течения в турбулентное в змеевиках при [5, 6]:

$$Re_{кр} = 2 \cdot 10^4 \left(\frac{d}{D}\right)^{0,32}. \quad (3)$$

По моделируемому змеевику параметры D и d выполнены на пограничных условиях так, чтобы кривизна влияла на режим течения жидкости в трубе, но при этом можно принять, что в потоке отсутствует поперечная циркуляция и движение жидкости принято осесимметричным.

Принято, что движение несжимаемой жидкости имеет стационарный, изотермический и турбулентный характер. Плотность, теплоемкость и коэффициент теплопроводности при движении теплоносителя не изменяется.

С целью использования геометрической симметрии змеевиковых каналов и предполагая, что радиус изгиба змеевика много больше диаметра канала, используем специальную ортогональную систему координат, связанную с осевой винтовой линией с постоянной величиной радиуса изгиба, определяемой уравнением, учитывая отношение кручения к кривизне трубы [7]:

$$\vec{\rho}(\varphi) = a(\varphi)\vec{e}(\varphi) + K\rho\vec{k}. \quad (4)$$

В координатной форме уравнение (2) в следующем виде:

$$\begin{cases} x = a(\varphi) \cos \varphi; \\ y = a(\varphi) \sin \varphi; \\ z = \zeta K \varphi, \end{cases} \quad (5)$$

где $\vec{\rho}(\varphi)$ – радиус-вектор точки на осевой линии;

$\vec{e}(\varphi) = \vec{i} \cos \varphi + \vec{j} \sin \varphi$; $\vec{i}, \vec{j}, \vec{k}$ – орты декартовой системы координат;

\vec{k} – единичный вектор, направленный по оси z ;

φ – параметр винтовой линии;

ζ – введенный параметр, учитывающий угол подъема витка. Данный параметр в дальнейшем не учитывается для упрощения решения;

$K = \frac{S}{2\pi}$, S – шаг винтового канала;

$a(\varphi)$ – радиус изгиба оси винтовой линии (рис. 2).

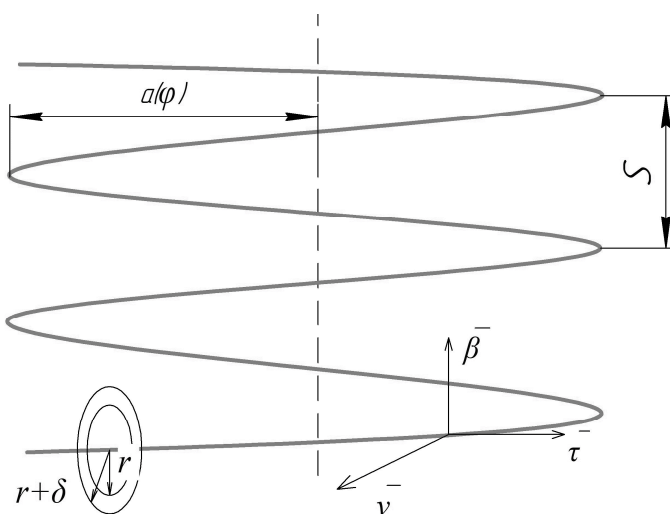


Рис. 2. Система координат: S – шаг, $a(\varphi)$ – радиус изгиба,
 r – радиус трубы, δ – толщина трубы
Fig. 2. Coordinate system: S – the pitch, $a(\varphi)$ – the bending radius,
 r – the radius of the pipe, δ – the thickness of the pipe

Определяя векторы сопровождающего репера для данной осевой линии змеевика и используя их в качестве базисных векторов $\vec{\tau}, \vec{\beta}, \vec{\gamma}$, получим новые переменные b, φ, ψ , которые связаны с переменными декартовой системы координат x, y, z , соотношениями [8–10]:

$$\begin{cases} x = a(\varphi) \cos \varphi + b(v_x(\varphi) \cos(\psi + \theta(\varphi)) + \beta_x(\varphi) \sin(\psi + \theta(\varphi))); \\ y = a(\varphi) \sin \varphi + b(v_y(\varphi) \cos(\psi + \theta(\varphi)) + \beta_y(\varphi) \sin(\psi + \theta(\varphi))); \\ z = K\varphi + b(v_z(\varphi) \cos(\psi + \theta(\varphi)) + \beta_z(\varphi) \sin(\psi + \theta(\varphi))), \end{cases} \quad (6)$$

из которых в случае постоянного радиуса изгиба канала $a(\varphi) = a_0$ получаются выражения для векторов сопровождающего репера:

$$\vec{\tau} = \frac{a_0 \vec{g}(\varphi) + K\vec{k}}{\sqrt{a_0^2 + K^2}}, \quad (7)$$

$$\vec{\beta} = \frac{-K\vec{g}(\varphi) + a_0\vec{k}}{\sqrt{K^2 + a_0^2}}, \quad (8)$$

$$\vec{\nu} = \vec{e}(\varphi); \quad (9)$$

$$\kappa(\varphi) = \frac{K}{K^2 + a_0^2} = \text{const}, \quad (10)$$

где $\vec{g}(\varphi) = -\vec{i} \sin \varphi + \vec{j} \cos \varphi$;

$\kappa(\varphi)$ – кручение осевой линии канала.

Для данной системы координат b, φ, ψ имеем следующие характеристики [11]:

1) коэффициент Ляме (при постоянном радиусе):

$$H_\varphi = \sqrt{a^2 + K^2} \cdot \left(1 - \frac{ab}{(a^2 + K^2)} \cdot \cos(\psi + \theta)\right); \quad (11)$$

2) ненулевые символы Кристоффеля:

$$\Gamma_{\varphi\varphi}^\varphi = \frac{1}{H_\varphi} \cdot \frac{\partial H_\varphi}{\partial \varphi}, \quad \Gamma_{\varphi\psi}^\varphi = \Gamma_{\psi\varphi}^\varphi = \frac{1}{H_\varphi} \cdot \frac{\partial H_\varphi}{\partial \psi}, \quad (12)$$

$$\Gamma_{\varphi b}^\varphi = \Gamma_{b\varphi}^\varphi = \frac{1}{H_\varphi} \cdot \frac{\partial H_\varphi}{\partial b}, \quad \Gamma_{\psi b}^\psi = \Gamma_{b\psi}^\psi = \frac{1}{b}; \quad (13)$$

$$\Gamma_{\varphi\varphi}^\psi = -\frac{H_\varphi}{b^2} \cdot \frac{\partial H_\varphi}{\partial \psi}, \quad \Gamma_{\varphi b}^\psi = -H_\varphi \cdot \frac{\partial H_\varphi}{\partial b}, \quad \Gamma_{\psi b}^\psi = -b. \quad (14)$$

Таким образом, в выбранной системе уравнение движения, неразрывности и переноса количества энергии записывается следующим образом [12]:

$$\begin{aligned} & \rho \left[\frac{1}{H_\varphi b} \cdot \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} (H_\varphi b V_{(\varphi)} V_{(\varphi)}) + \frac{\partial}{\partial \psi} (H_\varphi^2 b V_{(\psi)} V_{(\varphi)}) \right) \right] + \rho \left[\frac{1}{H_\varphi b} \left(\frac{\partial}{\partial b} (H_\varphi^2 b V_{(b)} V_{(\varphi)}) \right) - V_{(\varphi)} V_{(\varphi)} \frac{1}{H_\varphi} \frac{\partial H_\varphi}{\partial \varphi} \right] = \\ & = -\frac{\partial P}{\partial \varphi} + \frac{1}{H_\varphi b} \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} (H_\varphi b T_{(\varphi\varphi)}) + \frac{\partial}{\partial \psi} (H_\varphi^2 T_{(\varphi\varphi)}) \right) + \frac{1}{H_\varphi b} \left(\frac{\partial}{\partial b} (b H_\varphi^2 T_{(b\varphi)}) \right) - T_{(\varphi\varphi)} \frac{1}{H_\varphi} \frac{\partial H_\varphi}{\partial \varphi}; \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left[\frac{1}{H_\varphi b} \cdot \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} (b^2 V_{(\varphi)} V_{(\psi)}) + \frac{\partial}{\partial \psi} (H_\varphi b V_{(\psi)} V_{(\psi)}) \right) \right] + \rho \left[\frac{1}{H_\varphi b} \left(\frac{\partial}{\partial b} (H_\varphi b^2 V_{(b)} V_{(\psi)}) \right) - V_{(\varphi)} V_{(\varphi)} \frac{1}{H_\varphi} \frac{\partial H_\varphi}{\partial \psi} \right] = \\ & = -\frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{1}{H_\varphi b} \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} (b^2 T_{(\varphi\psi)}) + \frac{\partial}{\partial \psi} (H_\varphi b T_{(\psi\psi)}) \right) + \frac{1}{H_\varphi b} \left(\frac{\partial}{\partial b} (b^2 H_\varphi T_{(b\psi)}) \right) - T_{(\varphi\psi)} \frac{1}{H_\varphi} \frac{\partial H_\varphi}{\partial \psi}; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left[\frac{1}{H_\varphi b} \cdot \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} (b V_{(\varphi)} V_{(b)}) + \frac{\partial}{\partial \psi} (H_\varphi V_{(\psi)} V_{(b)}) \right) \right] + \rho \left[\frac{1}{H_\varphi b} \left(\frac{\partial}{\partial b} (H_\varphi b V_{(b)} V_{(b)}) \right) - V_{(\varphi)} V_{(\varphi)} \frac{1}{H_\varphi} \frac{\partial H_\varphi}{\partial b} - V_{(\psi)} V_{(\psi)} \frac{1}{b} \right] = \\ & = -\frac{\partial P}{\partial b} + \frac{1}{H_\varphi b} \left(\frac{\partial}{\partial \varphi} (b T_{(\varphi b)}) + \frac{\partial}{\partial \psi} (H_\varphi T_{(\psi b)}) \right) + \frac{1}{H_\varphi b} \left(\frac{\partial}{\partial b} (b H_\varphi T_{(bb)}) \right) - T_{(\varphi\varphi)} \frac{1}{H_\varphi} \frac{\partial H_\varphi}{\partial b} - T_{(\varphi\psi)} \frac{1}{b}; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} (\rho V_\varphi b) + \frac{\partial}{\partial \psi} (\rho V_\psi H_\varphi) + \frac{\partial}{\partial b} (\rho V_b H_\varphi b) = 0, \quad (18)$$

где $T_{(ij)} = 2\mu D_{(ij)}$, ($i = b, \varphi, \psi$; $j = b, \varphi, \psi$) – физические компоненты девиатора тензора напряжений; μ – вязкость с учетом турбулентности;

$V_{(i)}$, ($i = b, \varphi, \psi$) – физические компоненты вектора скорости;

$D_{(ij)} = \frac{1}{2} ((\nabla V)_{(ij)} + (\nabla V^T)_{(ij)})$, ($i = b, \varphi, \psi$; $j = b, \varphi, \psi$) – физические компоненты тензора скоростей деформаций; ∇V – тензор градиента скоростей; ∇V^T – транспонированный тензор градиента скоростей.

В качестве модели турбулентности применялось прямое численное моделирование.

Разработанная математическая модель позволила смоделировать сложный гидродинамический процесс теплообмена в змеевике с неизменяющимся радиусом изгиба винтовой трубы (рис. 3).

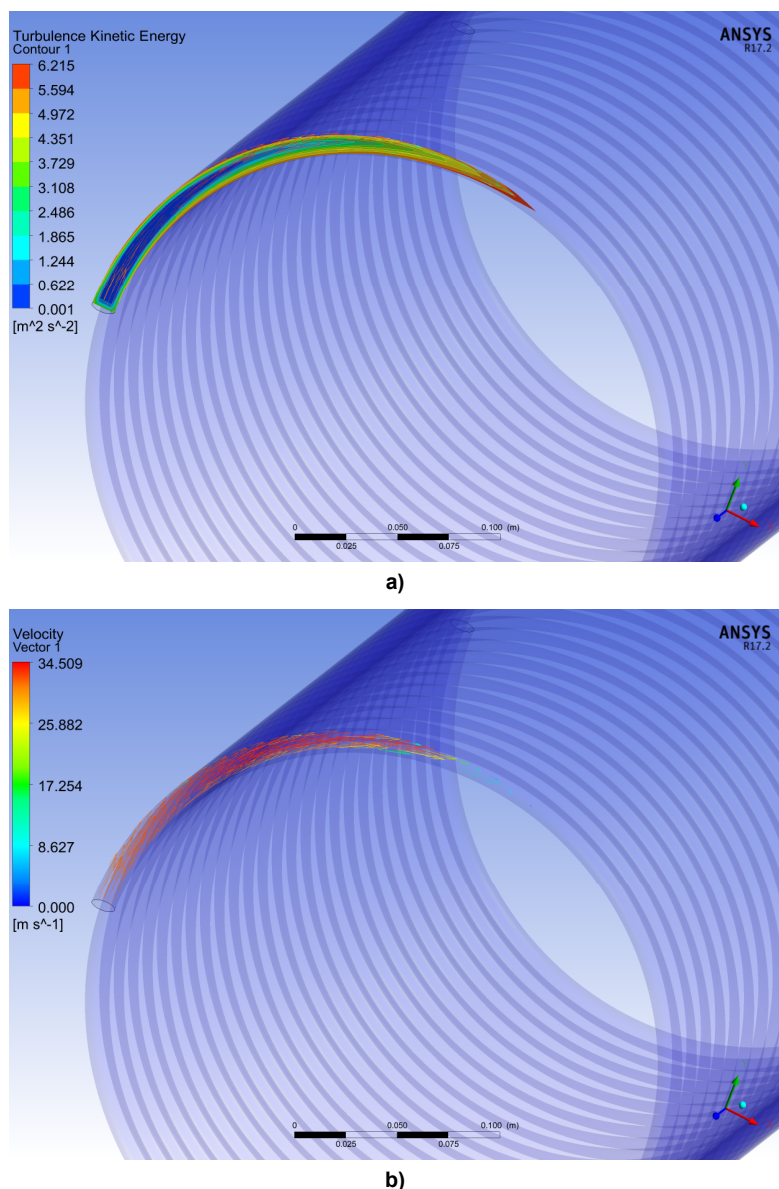


Рис. 3. Результаты моделирования гидравлического процесса в змеевике для лабораторного стенда: а – кинетическая энергия; б – векторы скорости движения теплоносителя
Fig. 3. The results of modeling hydraulic process in a coil for a laboratory stand: а – kinetic energy; б – vectors of the heat carrier velocity

По результатам моделирования видно, что при малых значениях числа Дина кривизна трубы еще не оказывает влияние на характер движения теплоносителя – вектора указывают на параллельное движение искривленной оси трубы, в потоке отсутствует поперечная циркуляция, а распределение скорости и закон сопротивления в изогнутых трубах оказывается таким же, как и в прямых.

Схемы гидравлической и аэродинамической систем стенда

Разработан специальный лабораторный практикум для проектируемого стенда, который, в соответствии с поставленными задачами должен охватывать следующие разделы обучения [13]:

- Исследование режимов течения жидкости и воздуха;
- Управление насосом и вентилятором;
- Исследование работы приборов для измерения скорости движения, объема и температуры воздуха и жидкости в системах.

Лабораторная работа № 1 «Исследование режимов течения жидкости в навитом змеевике» включает в себя следующие части моноблока (рис. 4): навитый змеевик, емкость с питательной водой, насос, расходомер, контрольно-измерительная и запорно-регулирующая арматура, шкаф управления.

Жидкость (вода) подается в навитый змеевик с помощью насоса из заполненной емкости питательной воды. Контур является замкнутым, вода

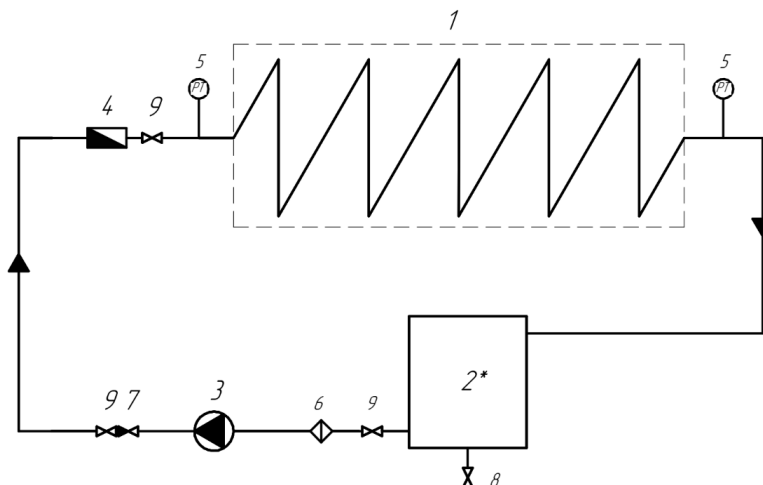


Рис. 4. Схема гидравлической системы лабораторного стенда: 1 – змеевик; 2 – емкость питательной воды; 3 – насос; 4 – расходомер; 5 – датчик давления; 6 – фильтр-грязевик; 7 – обратный клапан; 8 – кран шаровый (слив); 9 – кран шаровый
Fig. 4. Diagram of the hydraulic system of the laboratory stand: 1 – coil; 2 – feed water tank; 3 – pump; 4 – flow meter; 5 – pressure sensor; 6 – sump filter; 7 – check valve; 8 – ball valve (drain); 9 – ball valve

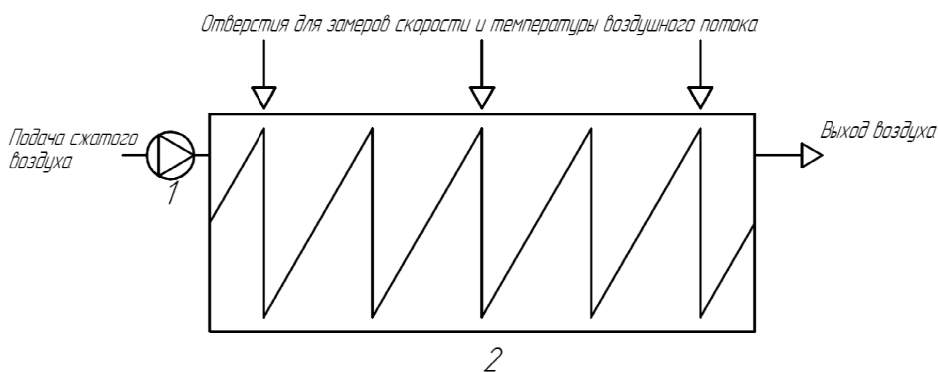


Рис. 5. Схема аэродинамической системы лабораторного стенда: 1 – вентилятор; 2 – цилиндр со змеевиком
Fig. 5. Diagram of the aerodynamic system of the laboratory stand: 1 – fan; 2 – cylinder with coil

возвращается в емкость. Измерительная часть стенда позволяет зафиксировать параметры расхода жидкости через табло на расходомере или с последующим выводом показателей на экран ПК при помощи программного обеспечения.

Лабораторная работа № 2 «Исследование режимов течения газов (воздуха) в цилиндрическом канале коаксиальной формы» включает в себя следующие части моноблока: металлический цилиндр, навитый змеевик, образующие канал коаксиальной формы, вентилятор, анемометр, запорная арматура, шкаф управления (рис. 5).

Подача сжатого воздуха осуществляется через канал в крышке цилиндра. Воздух проходит по каналу и выходит с другой стороны цилиндра через аналогичное отверстие во второй крышке цилиндра. Коаксиальный змеевик внутри цилиндра создает аэродинамическое сопротивление, формируя вихревой воздушный поток. Измерительная часть стенда позволяет измерять параметры скорости и температуры потока воздуха с помощью анемометра путем помещения телескопического

зонда в специальные отверстия в цилиндре по движению воздушного потока. Управление анемометром осуществляется с помощью смартфона, с последующей выгрузкой сводных таблиц с экспериментальными значениями на ПК.

Управление стендом

Управление лабораторным стендом осуществляется посредством управляющего устройства – контроллера. В качестве системы автоматического управления выбрано разомкнутое управление (рис. 6). Для простоты управления и считывания сигналов в системе управляющее устройство получает информацию о цели управления в виде меняющегося во времени задания $g(f)$ и формирует управляющее воздействие на объект таким образом, чтобы достигалась цель управления $x(t)$. Так как выходная величина x не измеряется, то фактическое состояние объекта не контролируется. Алгоритм управления, связывающий управляющее воздействие $u(t)$ с заданием $g(f)$, формируется на основе математической модели объекта, которая известна с высокой точностью [14].

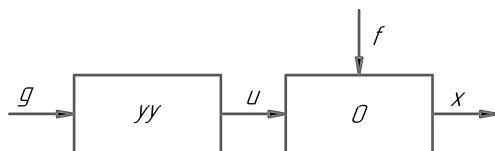


Рис. 6. Функциональная схема системы автоматического управления:
уу – управляющее устройство; О – объект управления
Fig. 6. Functional diagram of the automatic control system:
уу – control device; О – control object

Достоинством представленной схемы является простота в эксплуатации и возможность ее дальнейшей модернизации с учетом новых возможностей оборудования. Недостатком является условие, что на объект не должны действовать

внешние возмущения, что является трудновыполнимой задачей.

Алгоритм работы стенда

На рис. 7 представлена блок-схема алгоритма оценки работы стенда [15]. В качестве показателя

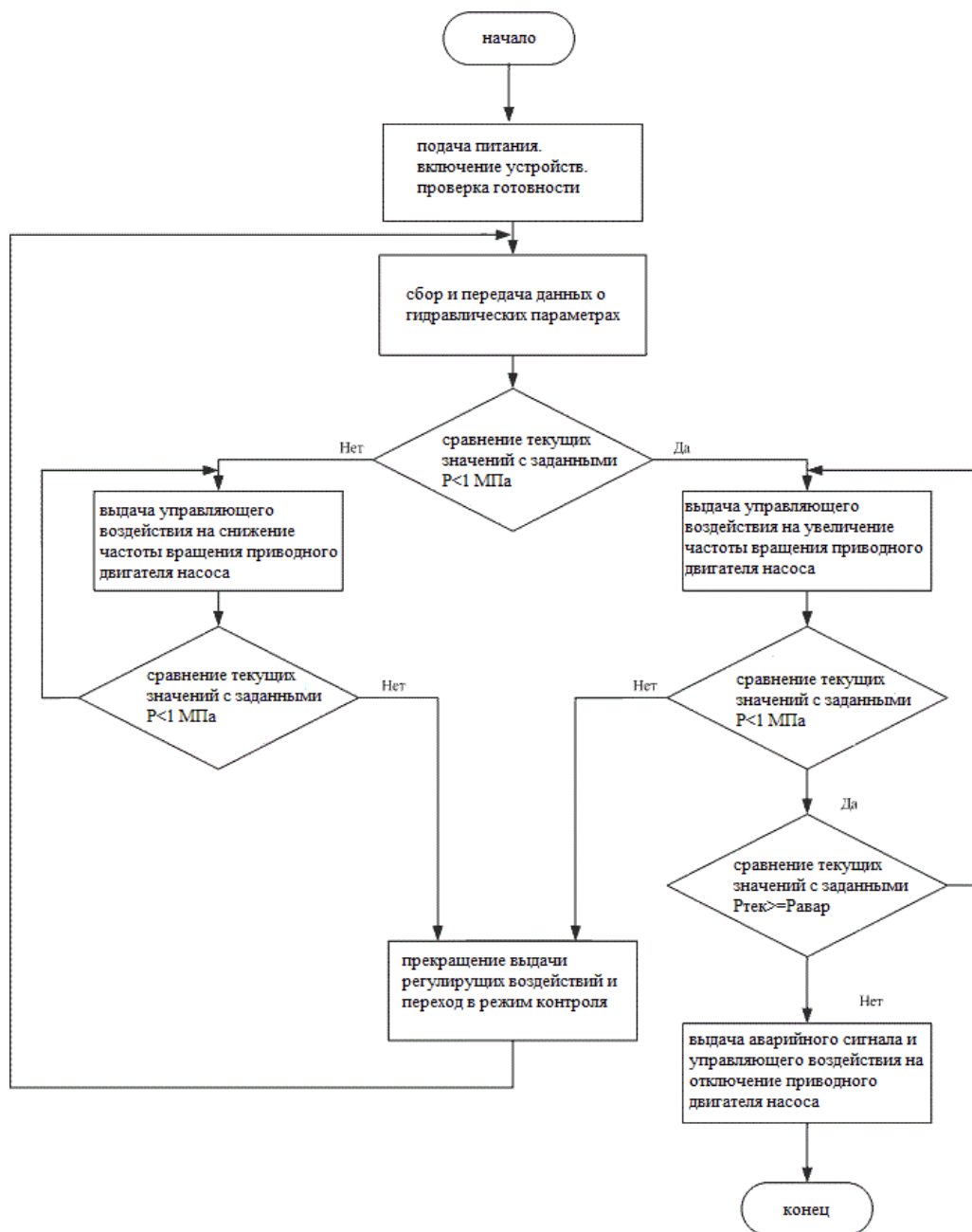


Рис. 7. Блок-схема алгоритма оценки работы лабораторного стенда
Fig. 7. Flowchart of the algorithm for evaluating the work of the laboratory stand

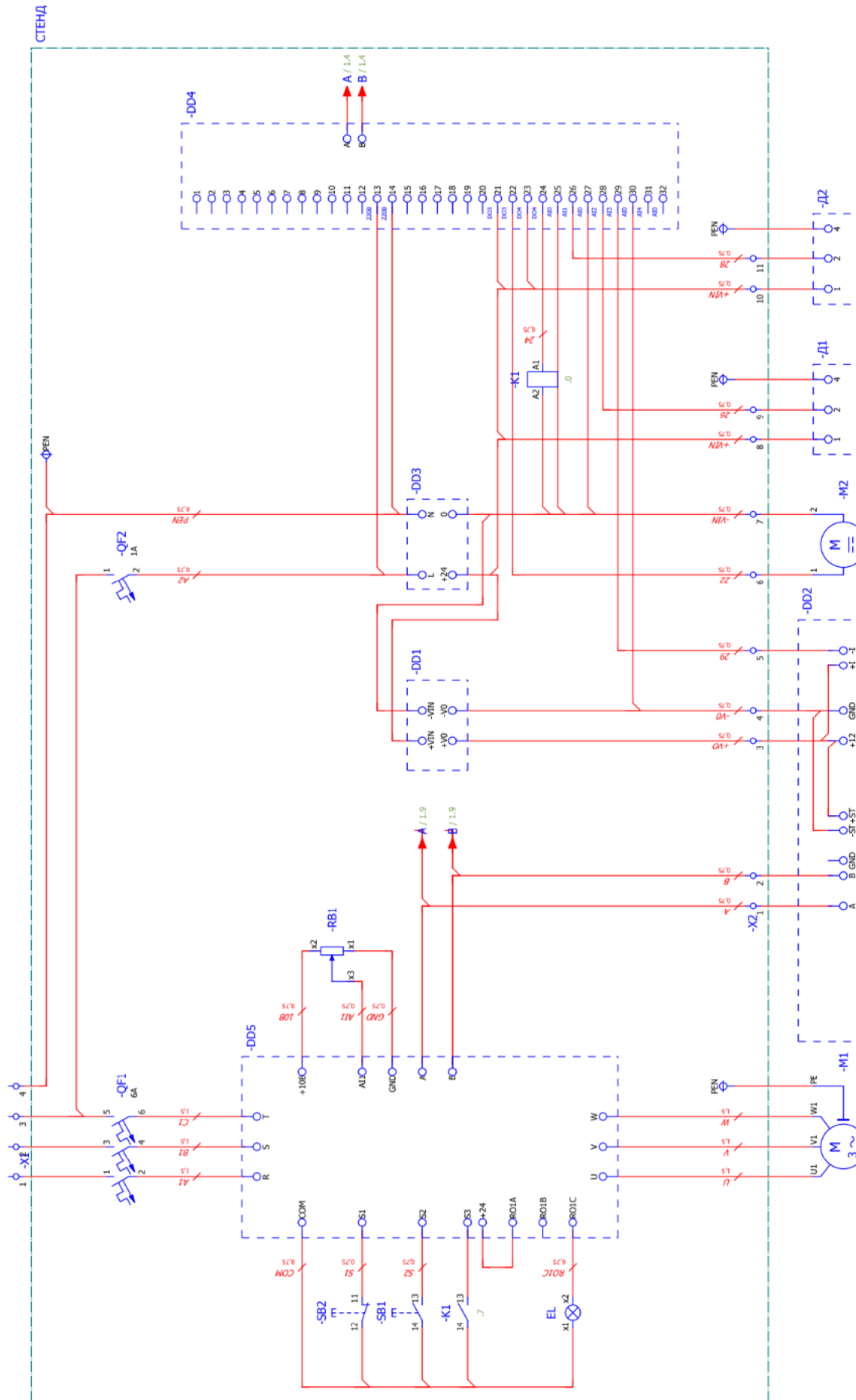


Рис. 8. Электрическая схема лабораторного стенда
Fig. 8. Electrical diagram of the laboratory stand



Рис. 9. Фото лабораторного стенда
Fig. 9. Photograph of the laboratory stand

безопасной работы гидравлической системы выбран параметр давления (p , МПа). Аэродинамическая система не нуждается в контроле по давлению, так как скорость потока воздуха от выбранного вентилятора мала (проведено тестирование на этапе сборки), соответственно, воздействия на металлический каркас стенда незначительны.

Электрическая схема и подбор оборудования

При проектировании электрической схемы (рис. 8) учитывалось, что учебный лабораторный стенд должен включать оборудование, необходимое для ручного управления и с последующей возможностью автоматического управления при помощи программного обеспечения на ПК (персональный компьютер) для создания человеко-машинного интерфейса (для визуализации процесса, его управления, а также отображения, архивирования и протоколирования сообщений от процесса).

Управляющим устройством выбран программируемый логический контроллер марки ОВЕН с CoDeSys V2.3 (интегрированная среда разработки (IDE) приложений для программируемых контроллеров). Для измерения расхода подобран электромагнитный преобразователь расхода марки МастерФлоу. В качестве гидравлического устройства выбран Вихревой поверхностный насос фирмы Pedrollo. Для контроля давления подобраны датчики давления ДДМ-1010. Для замера скорости воздуха приобретен анемометр смарт-зонд фирмы TESTO, который отправляет данные на смартфон, а полную информацию можно скачать на ПК. Для

автоматического регулирования частоты вращения электродвигателей переменного тока подобрано устройство фирмы МОМЕНТУМ – преобразователь частоты МТ-100 (далее по тексту – ПЧ).

Для размещения оборудования спроектирована общая рабочая зона – металлический стол с прикрепленными кронштейнами для моноблока, насоса, шкафа управления, расходомера и другого вспомогательного оборудования. Произведена сборка и наладка лабораторного стенда (рис. 9).

Практическая часть

Произведены испытания гидравлической системы стенда при разных скоростях двигателя насоса. Регулирование производилось с помощью ПК и контроллера через программу VinCC (рис. 10).

Рабочий стол виртуального управления предполагает запуск ПЧ (готовность к работе), задание скорости электродвигателя (обороты в минуту). Текущие значения на виртуальном управлении меняются в реальном времени, но с задержкой в пару секунд. На схеме отображена сигнальная лампа о включении насоса, фиксируются онлайн значения расхода (кубические метры в час) и давления на входе в змеевик (кПа). Запись и сохранение экспериментальных значений осуществляется в журнал в формате Excel на подключенном ПК. Результаты первого эксперимента (выборка без повторяющихся значений по скорости от времени) представлены в таблице.

При $D/d = 25$ (для стенда) из расчета по (3) число $Re_{кр} = 7139,85$, что является значительно

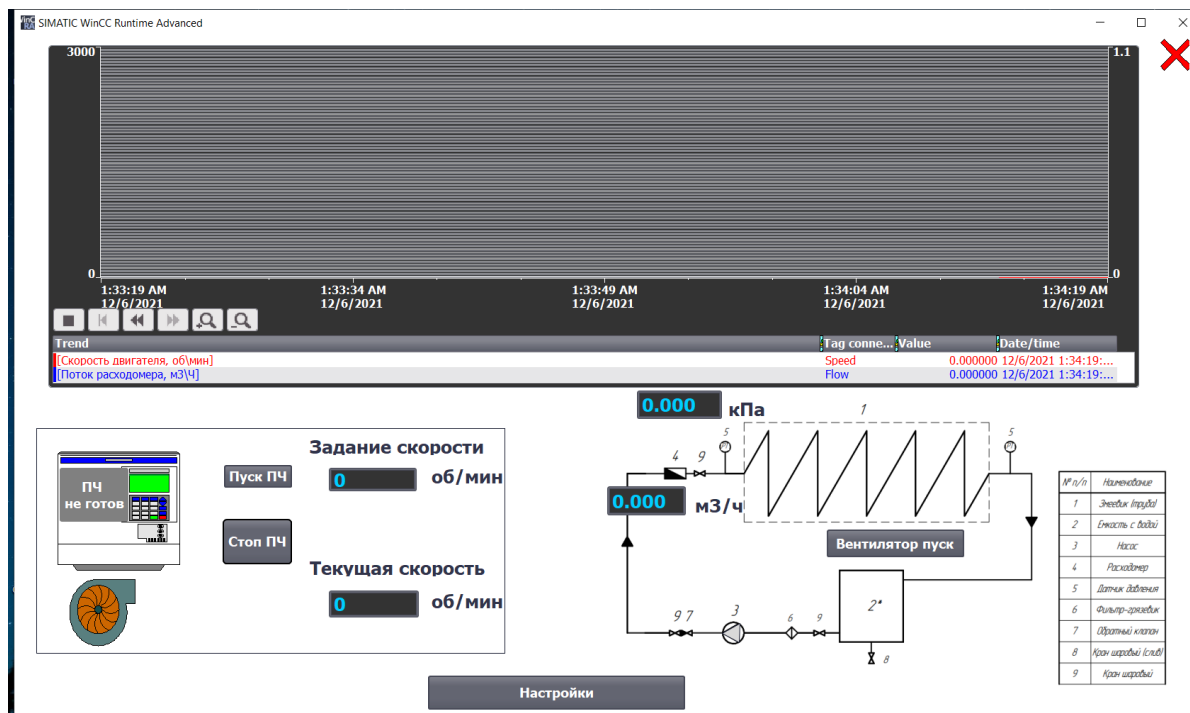


Рис. 10. Рабочий стол виртуального управления лабораторным стендом
Fig. 10. Virtual control desk of the laboratory stand

Результаты эксперимента
Results of the experiment

Скорость двигателя, об/мин	Давление, кПа	Расход, м ³ /ч	Число Re
2500,38	531,07	0,902	310 119,5
2354,8	493,966	0,88	292 063,4
2002,16	331,834	0,775	248 325,8
1885	175,057	0,7	233 794,6
1531,2	175,057	0,623	189 913,2
1296,88	72,817	0,623	160 850,7
999,92	71,888	0,52	124 019,0
881,6	71,888	0,314	109 343,9
764,44	54,738	0,314	94 812,7
619,44	54,129	0,313	76 828,5
592,76	54,128	0,262	73 519,4
499,96	28,609	0,262	62 009,5
269,12	6,969	0,047	33 378,7
151,96	3,363	0,024	18 847,4

больше, чем для прямых труб, так как связано со стабилизирующим влиянием центробежной силы и возбуждаемой ею поперечной циркуляцией на течение у стенки [16].

Исходя из полученных экспериментальных значений, можно сделать вывод, что движение турбулентное, и математическая модель требует корректировки на турбулентность, так как на данный момент больше описывает ламинарное движение в изогнутых трубах.

Заключение

1. Представлена математическая модель змеевика для прямоточного котла змеевикового типа с

постоянной величиной радиуса изгиба, которую можно использовать также и для моделирования процессов в теплообменных аппаратах.

2. Представлен проект учебного лабораторного стенда, имитирующего гидравлическую и аэродинамическую систему прямоточного котла змеевикового типа, с помощью которого возможно вычислить опытным путем скорость движения, давление теплоносителя и рассчитать значение числа Рейнольдса для изучаемой модели котла для дальнейшего изучения процесса интенсификации теплообмена в устройстве.

3. Представлены результаты первого испытания учебного лабораторного стенда.

Список литературы

1. Дудкин М.М., Осинцев К.В., Кускарбекова С.И. Опытное исследование работы парового котла змеевикового типа при эксплуатации на северном нефтяном месторождении // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2019. Т. 19, № 4. С. 14–25. DOI: 10.14529/power190402
2. Зыков А.К. Паровые и водогрейные котлы: справ. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: НПО ОБТ, 1995. 119 с.
3. Петухов Б.С. Теплообмен и сопротивление при ламинарном течении жидкости в трубах. М.: Энергия, 1967. 409 с.
4. Germano M. The Dean equations extended to a helical pipe flow // Journal of Fluid Mechanics. June 1989. Vol. 203. P. 289–305. DOI: 10.1017/S0022112089001473
5. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам: ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы / под общ. ред. П.Л. Кириллова. М.: Энергоатомиздат, 1984. 296 с.
6. Mori Y., Nakayama W. Study on Forced Convective Heat Transfer in Curved Pipes (1st Report, Laminar Region) // International Journal of Heat and Mass Transfer. 1965. Vol. 8 (1). P. 67–82. DOI: 10.1016/0017-9310(65)90098-0
7. Багоутдинова А.Г., Золотонос Я.Д. Змеевиковые теплообменники и их математическое описание // Известия вузов. Строительство. 2015. № 7. С. 44–52.
8. Сопряженная задача теплообмена при течении жидкостей в змеевиках с изменяющимся радиусом изгиба винтовой спирали / Е.К. Вачагина, А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотонос, И.А. Князева // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 16. С. 234–238.
9. Назмеев Ю.Г. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков реологически сложных сред. М.: Энергоиздат, 1966. 368 с.
10. Аронов И.З. О гидравлическом подобии при движении жидкости в изогнутых трубах-змеевиках // Известия вузов. Энергетика. 1962. № 4. С. 52–59.
11. Zargyanov Z., Christov Ch., Toshev E. Fully developed laminar flow and heat transfer in curved tubes // International Journal of Heat and Mass Transfer. June 1980. Vol. 23, iss. 6. P. 873–880.
12. Багоутдинова А.Г., Золотонос Я.Д. Математическая модель сопряженной задачи теплообмена при турбулентном течении в каналах сложной геометрии // Известия КГАСУ. 2013. № 2 (24). С. 157–167.
13. Дудкин М.М., Осинцев К.В., Кускарбекова С.И. Разработка методологических основ исследования процессов парообразования при движении многокомпонентной жидкости в прямоточных котлах змеевикового типа методами математического моделирования // Промышленная энергетика. 2020. № 11. С. 16–24. DOI: 10.34831/EP.2020.16.79.003
14. Булкин А.Е. Автоматическое регулирование энергоустановок: учеб. пособие. М.: МЭИ, 2016. 508 с.
15. Математика и информатика / Е.Н. Гусева, И.Ю. Ефимова, И.И. Боброва, И.Н. Мовчан. 2-е изд. М.: ФЛИНТА, 2015. 197 с.
16. Пат. 2694890 Российская Федерация. Электронагреватель жидкости / К.В. Осинцев, В.В. Осинцев, В.И. Богаткин, Е.В. Торопов, С.И. Кускарбекова; заявитель и патентообладатель ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет» (НИУ). № 2018143417; заявл. 06.12.2018; опубл. 18.07.2019. 8 с.

References

1. Dudkin M.M., Osintsev K.V., Kuskarbekova S.I. Experimental Investigation of Coil Type Steam Generator Performance when Used in North Oil Fields. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2019;19(4):14–25. (In Russ.) DOI: 10.14529/power190402
2. Zykov A.K. *Parovye i vodogreynye kotly: spravochnoe posobie* [Steam and hot water boilers: reference manual]. Moscow: NPO OBT Publ., 1995. 119 p. (In Russ.)
3. Petukhov B.S. *Teploobmen i soprotivlenie pri laminarnom techenii zhidkosti v trubakh* [Heat transfer and resistance during laminar fluid flow in pipes]. Moscow: Energiya Publ., 1967. 409 p. (In Russ.)
4. Germano M. The Dean equations extended to a helical pipe flow. *Journal of Fluid Mechanics*. June 1989; 203:289–305. DOI: 10.1017/S0022112089001473
5. Kirillov P.L., Yur'ev Yu.S., Bobkov V.P. *Spravochnik po teplogidravli-cheskim raschetam: yadernye reaktory, teploobmenniki, parogeneratory* [Handbook of thermohydraulic calculations: nuclear reactors, heat exchangers, steam generators]. Moscow: Energoatomizdat Publ., 1984. 296 p. (In Russ.)
6. Mori Y., Nakayama W. Study on Forced Convective Heat Transfer in Curved Pipes (1st Report, Laminar Region). *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1965;8(1):67–82. DOI: 10.1016/0017-9310(65)90098-0
7. Bagoutdinova A.G., Zolotonosov Ya.D. [Coil heat exchangers and their mathematical description]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of universities. Construction]. 2015;(7):44–52. (In Russ.)

8. Vachagina E. K., Bagoutdinova A. G., Zolotonosov Ya. D., Knyazeva I. A. [The conjugate problem of heat exchange during the flow of liquids in coils with a varying bending radius of a helical spiral]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of the Technological University]. 2015;18(16):234–238. (In Russ.)
9. Nazmeev Yu.G. [Hydrodynamics and heat exchange of swirling flows of rheologically complex media]. Moscow: Energoizdat Publ., 1966. 368 p. (In Russ.)
10. Aronov I.Z. [About hydraulic similarity in fluid motion in curved coil pipes]. *Izvestiya vuzov. Energetika* [News of Universities. Energy]. 1962;(4):52–59. (In Russ.)
11. Zapryanov Z., Christov Ch., Toshev E. Fully developed laminar flow and heat transfer in curved tubes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. June 1980;23(6):873–880.
12. Bagoutdinova A.G., Zolotonosov Ya.D. [Mathematical model of the dual problem of heat transfer in turbulent flow in channels of complex geometry]. *Izvestiya KGASU* [News of KGASU]. 2013;2(24):157–167. (In Russ.)
13. Dudkin M.M., Osintsev K.V., Kuskarbekova S.I. [Development of methodological foundations for the study of vaporization processes during the movement of a multicomponent liquid in direct-flow coil-type boilers by mathematical modeling methods]. *Promyshlennaya energetika* [Industrial Energy]. 2020;(11):16–24. DOI: 10.34831/EP.2020.16.79.003 (In Russ.)
14. Bulkin, A.E. *Avtomaticheskoe regulirovanie energoustanovok: uchebnoe posobie* [Automatic regulation of power plants: textbook]. Moscow: MEI Publ., 2016. 508 p. (In Russ.)
15. Guseva E.N., Efimova I.Yu., Bobrova I.I., Movchan I.N. *Matematika i informatika* [Mathematics and Computer Science]. Moscow: FLINTA Publ., 2015. 197 p. (In Russ.)
16. Osintsev K.V., Osintsev V.V., Bogatkin V.I., Toropov E.V., Kuskarbekova S.I. *Elektronagrevatel' zhidkosti* [Electric liquid heater]. Patent RF, no. 2694890, 2019. (In Russ.)

Информация об авторах

Осинцев Константин Владимирович, канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой «Промышленная теплоэнергетика», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; osintsev2008@yandex.ru.

Кускарбекова Сулпан Ирикевна, аспирант кафедры «Промышленная теплоэнергетика», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; sulpan.kuskarbekova@mail.ru.

Савостеенко Никита Вадимович, старший преподаватель кафедры «Электропривод и мехатроника», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; nikita.epa@gmail.com.

Максимов Никита Максимович, магистрант кафедры «Электропривод и мехатроника», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; maksimov.nik275@gmail.com.

Information about the authors

Konstantin V. Osintsev, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Head of the Department of Industrial Heat Power Engineering South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; osintsev2008@yandex.ru.

Sulpan I. Kuskarbekova, Postgraduate Student of the Department of Industrial Heat Power Engineering, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; sulpan.kuskarbekova@mail.ru.

Nikita V. Savosteenko, Senior Lecturer of the Department of Electric Drive and Mechatronics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; nikita.epa@gmail.com.

Nikita M. Maksimov, Master's Student of the Department of Electric Drive and Mechatronics, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; maksimov.nik275@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 20.03.2022; одобрена после рецензирования 12.04.2022; принята к публикации 12.04.2022.

The article was submitted 20.03.2022; approved after reviewing 12.04.2022; accepted for publication 12.04.2022.