

# Автоматизированные системы управления технологическими процессами

## Automated process control systems

Научная статья

УДК 681.5.011 + 532.5 + 533.6.011.12

DOI: 10.14529/ctcr220313

### РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ УЧЕБНОГО ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

**К.В. Осинцев**, [osintsev2008@yandex.ru](mailto:osintsev2008@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0791-2980>

**С.И. Кускарбекова**, [sulpan.kuskarbekova@mail.ru](mailto:sulpan.kuskarbekova@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7171-6661>

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

**Аннотация.** Учебный лабораторный стенд создан для имитации работы прямоточного котла с целью изучения гидравлических и теплофизических процессов, происходящих в таких устройствах. Изучив гидродинамику теплоносителя в цилиндрическом сложном змеевике, можно повлиять на паропроизводительность котла, улучшить его энергоэффективность. В учебных целях обучающийся может изучить режимы течения жидкости и воздуха, научиться управлять электрооборудованием, освоить работу запорно-регулирующей арматуры и проборов для измерения расхода, температуры и давления. **Цель работы** заключается в проектировании, создании и запуске учебного лабораторного стенда, который позволяет воспроизвести гидравлический и аэродинамический режимы работы прямоточного парового котла змеевикового типа без нагрева теплоносителя. **Материалы и методы.** Для проектирования была принята за основу модель реального парового котла змеевикового типа и адаптирована под условия эксплуатации для проведения лабораторных работ. **Результаты.** В качестве результата представлены тепломеханические схемы гидравлической и аэродинамической систем, алгоритм работы гидравлической системы, схема автоматизации, а также перечень подобранного оборудования и фото собранного лабораторного стенда. **Заключение.** 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. Учебный лабораторный стенд позволит провести углубленное изучение гидравлических и аэродинамических процессов в прямоточном паровом котле змеевикового типа, процессы изменения и возникновения ламинарного и турбулентного режимов, а также их влияние на повышение энергоэффективности рассматриваемых котлов, а в перспективе и на отдельное теплообменное оборудование.

**Ключевые слова:** прямоточный котел, лабораторный стенд, программируемый логический контроллер, автоматизация

**Для цитирования:** Осинцев К.В., Кускарбекова С.И. Разработка автоматизированной системы управления для учебного лабораторного стенда // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2022. Т. 22, № 3. С. 141–150. DOI: 10.14529/ctcr220313

Original article

DOI: 10.14529/ctcr220313

### DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED CONTROL SYSTEM FOR AN EDUCATIONAL LABORATORY STAND

**K.V. Osintcev**, [osintsev2008@yandex.ru](mailto:osintsev2008@yandex.ru), <https://orcid.org/0000-0002-0791-2980>

**S.I. Kuskarbekova**, [sulpan.kuskarbekova@mail.ru](mailto:sulpan.kuskarbekova@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0001-7171-6661>

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

**Abstract.** The training laboratory stand was created to simulate the operation of a direct-flow boiler, in order to study the hydraulic and thermophysical processes occurring in such devices. Having studied

© Осинцев К.В., Кускарбекова С.И., 2022

the hydrodynamics of the coolant in a cylindrical composite coil, it is possible to influence the steam capacity of the boiler, improve its energy efficiency. For educational purposes, the student can study the flow modes of liquid and air, learn how to control electrical equipment, master the operation of shut-off valves and parting devices for measuring flow, temperature and pressure. **The purpose** of the work is to design, create and launch an educational laboratory stand that allows you to reproduce the hydraulic and aerodynamic modes of operation of a direct-flow steam boiler of a coil type without heating the coolant. **Methods.** For the design, a model of a real coil-type steam boiler was taken as a basis and adapted to the operating conditions for laboratory work. **Results.** As a result, thermal mechanical schemes of hydraulic and aerodynamic systems, the algorithm of the hydraulic system, the automation scheme, as well as a list of selected equipment and photos of the assembled laboratory stand are presented. **Conclusion.** Modern automation devices can make it possible to take readings of the coolant and air with high accuracy, as well as transfer experimental values to a personal computer for data storage and subsequent analysis. The educational laboratory stand will allow for an in-depth study of hydraulic and aerodynamic processes in a direct-flow steam boiler of the coil type, the processes of change and occurrence of laminar and turbulent modes, as well as their impact on improving the energy efficiency of the boilers in question, and in the future on separate heat exchange equipment.

**Keywords:** direct-flow boiler, laboratory stand, programmable logic controller, automation

**For citation:** Osintcev K.V., Kuskarbekova S.I. Development of an automated control system for an educational laboratory stand. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics.* 2022;22(3):141–150. (In Russ.) DOI: 10.14529/ctcr220313

## **Введение**

Прямоточные паровые котлы змеевикового типа нашли широкое применение в промышленности, в жилищной сфере, в строительстве. Особенностью прямоточных котлов является факт превращения теплоносителя в пар за один ход. Данный фазовый переход представляет научный интерес, как и перспектива интенсификации парообразования в паровых прямоточных котлах с улучшением работоспособности и обслуживания данных устройств [1–3].

Для наблюдения с последующими возможными научными предложениями по улучшению работы прямоточного котла змеевикового типа был создан учебный лабораторный стенд. Лабораторный стенд имитирует движение жидкого теплоносителя по змеевику, а движение дымовых газов через змеевики симулирует вихревой поток воздуха, который нагнетается вентилятором. Таким образом, лабораторный стенд представляет собой упрощенную версию котла, объединяя в себе две системы: гидравлическую и аэродинамическую.

Разработанные лабораторные практикумы направлены на изучение следующих тем [4, 5]:

- 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.

## **1. Постановка задачи**

Необходимо спроектировать, подобрать оборудование, выполнить монтаж и наладку системы автоматического управления учебного лабораторного стенда, который повторяет работу прямоточного котла змеевикового типа в режиме холостого хода без нагрева теплоносителя.

Основная задача: подобрать устройство со встроенным аппаратным и программным обеспечением. Устройство должно быть предназначено для управления последовательными логическими процессами в реальном масштабе времени. Для подбора основного оборудования важную роль играет количество входных переменных  $X_1, X_2, \dots, X_n$ : давление воды, скорость двигателя, а также возможное подключение новых параметров, и в соответствии с требованиями процесса возможные изменения состояния выходов  $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ : регулирование давления гидравлической системы, изменение частоты вращения двигателя и др [6]. При выборе оборудования также необходимо учесть оптимальное соотношение «цена – производительность».

## **2. Теоретическая часть**

### **Описание схем гидравлической и аэродинамической систем стенда**

Гидравлическая система стенда представлена на рис. 1 [7, 8].

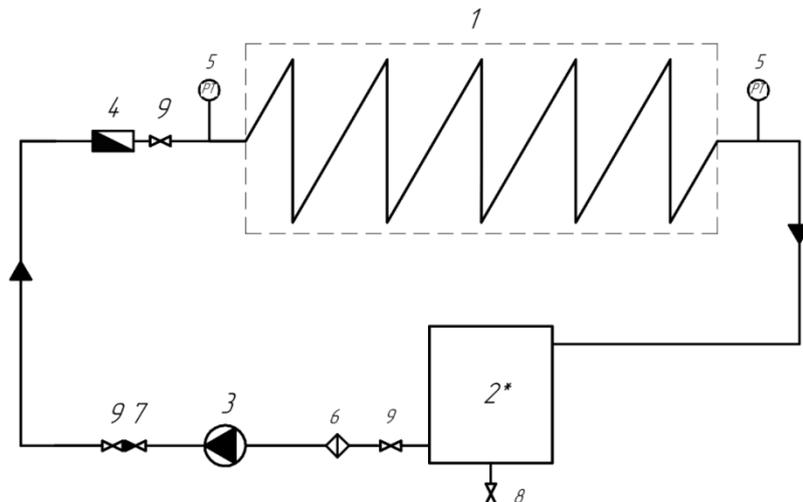


Рис. 1. Схема гидравлической системы лабораторного стенда: 1 – змеевик; 2 – емкость питательной воды; 3 – насос; 4 – расходомер; 5 – датчик давления; 6 – фильтр-грязевик; 7 – обратный клапан; 8 – кран шаровый (слив); 9 – кран шаровый  
 Fig. 1. Diagram of the hydraulic system of the laboratory stand: 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

Вода подается в навитый змеевик с помощью насоса из емкости питательной воды. Контур является замкнутым, вода возвращается в емкость после полного хода по змеевику. Для фиксирования параметров расхода жидкости предусмотрена установка расходомера при ручном управлении, но для автоматизации стенда необходимо выполнить вывод показателей на экран ПК при помощи программного обеспечения.

Схема аэродинамической системы изображена на рис. 2.

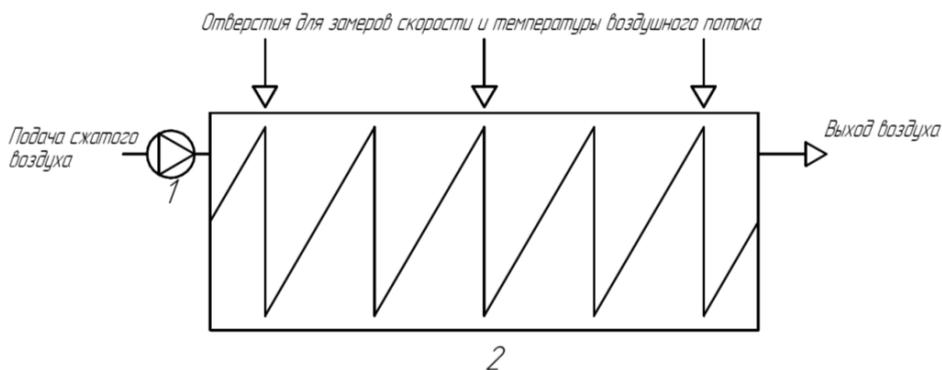


Рис. 2. Схема аэродинамической системы лабораторного стенда:  
 1 – вентилятор; 2 – цилиндр со змеевиком  
 Fig. 2. Diagram of the aerodynamic system of the laboratory stand:  
 1 – fan; 2 – cylinder with coil

Нагнетание воздуха осуществляется через канал в крышке цилиндра с помощью вентилятора. Воздух проходит между змеевиками и выходит с другой стороны цилиндра через предусмотренное отверстие во второй крышке цилиндра. Замер таких параметров, как скорость и температура потока воздуха, предусмотрен с помощью анемометра. Анемометр оснащен телескопическим зондом, который можно помещать в специальные отверстия в цилиндре, тем самым выполняя замеры в разных участках вихревого воздушного потока. Управление анемометром осуществляется с помощью смартфона. Современные функции программы прибора позволяют выполнить выгрузку сводных таблиц с экспериментальными значениями на ПК.

#### Алгоритм работы стенда

В качестве регулируемой переменной выбрана частота вращения двигателя насоса. Зависимыми переменными являются скорость движения и расход теплоносителя, давление в змее-

вике (1). Показателем безопасной работы гидравлической системы является параметр давления ( $p$ , МПа) [9–11].

$$\begin{cases} \omega = f(v)dt; \\ H = f(\omega)dt; \\ Q = f(\omega)dt. \end{cases} \quad (1)$$

В соответствии с поставленной задачей на рис. 3 представлена блок-схема работы лабораторного стенда по гидравлической системе [12, 13].

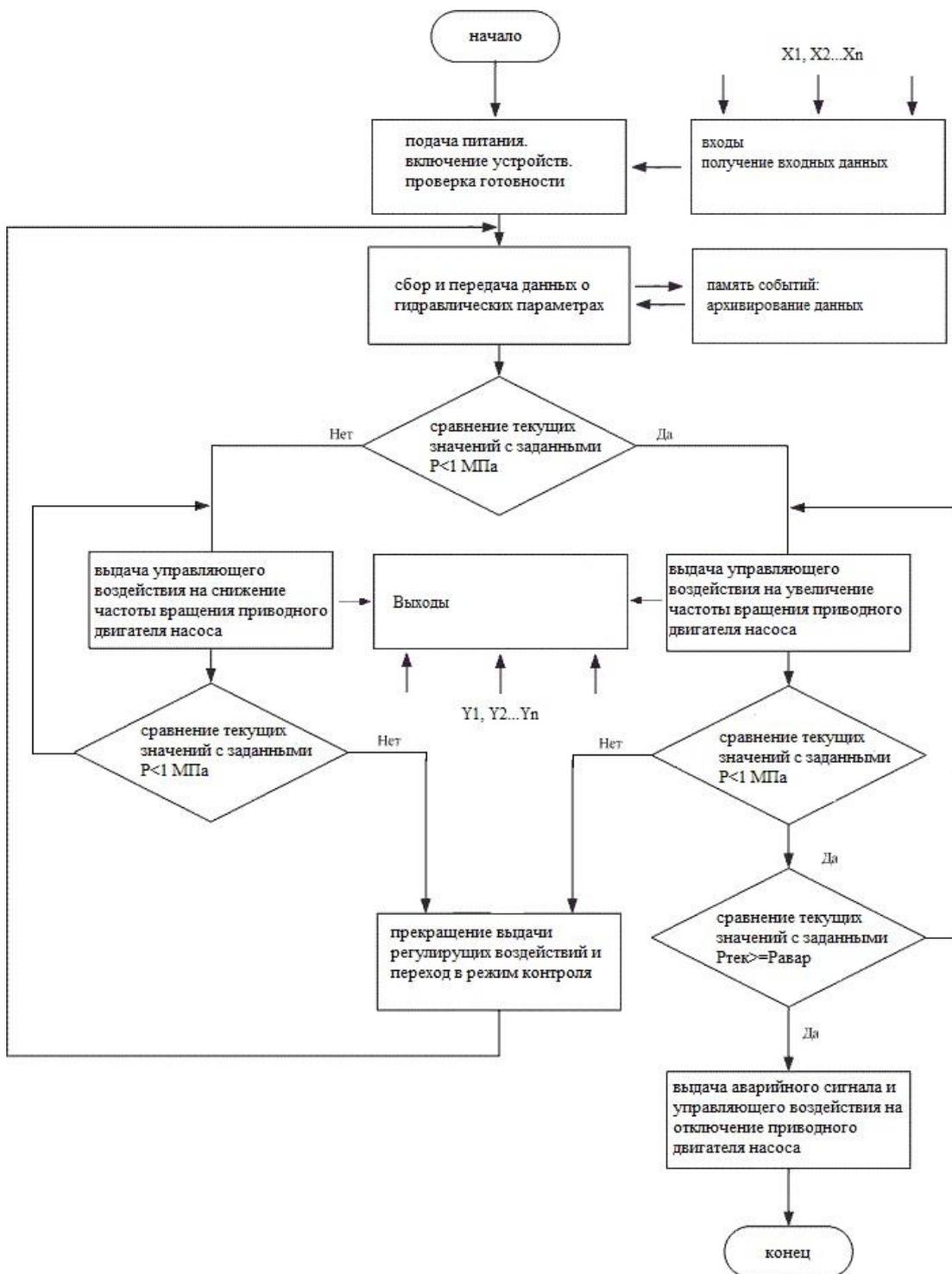


Рис. 3. Блок-схема алгоритма работы лабораторного стенда по гидравлической системе  
Fig. 3. Flowchart of the algorithm for the operation of the laboratory stand on the hydraulic system

Аэродинамическая система не нуждается в контроле по давлению, так как скорость потока воздуха от подобранного вентилятора мала (проведено тестирование металлоконструкции на этапе сборки), поэтому воздействия на стенки стенда несущественны и не требуют предупредительных сигналов со стороны системы управления.

По условиям поставленной задачи функциональную схему системы управления для гидравлической части лабораторного стенда можно изобразить, как на рис. 4 [14].



Рис. 4. Функциональная схема системы управления  
Fig. 4. Functional diagram of the control system

Расчеты по наблюдаемым параметрам переходного гидравлического процесса при включении двигателя до максимальных параметров представлены на графике (рис. 5) [15].

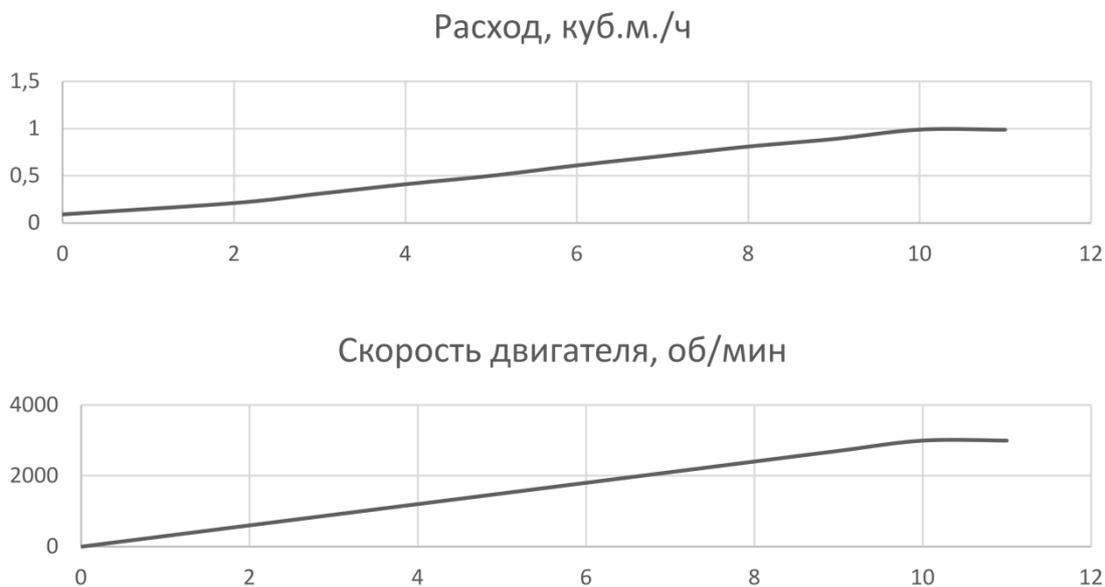


Рис. 5. Графики переходного гидравлического процесса  
Fig. 5. Graphs of the transient hydraulic process

#### Электрическая схема и подбор оборудования

При проектировании электрической схемы (рис. 6) учитывалось, что учебный лабораторный стенд должен включать оборудование, необходимое для автоматического управления при помощи программного обеспечения на ПК (персональный компьютер) для создания человеко-машинного интерфейса (для визуализации процесса, управления, а также отображения, архивирования и протоколирования сообщений от процесса), но также должно быть предусмотрено ручное управление [16].

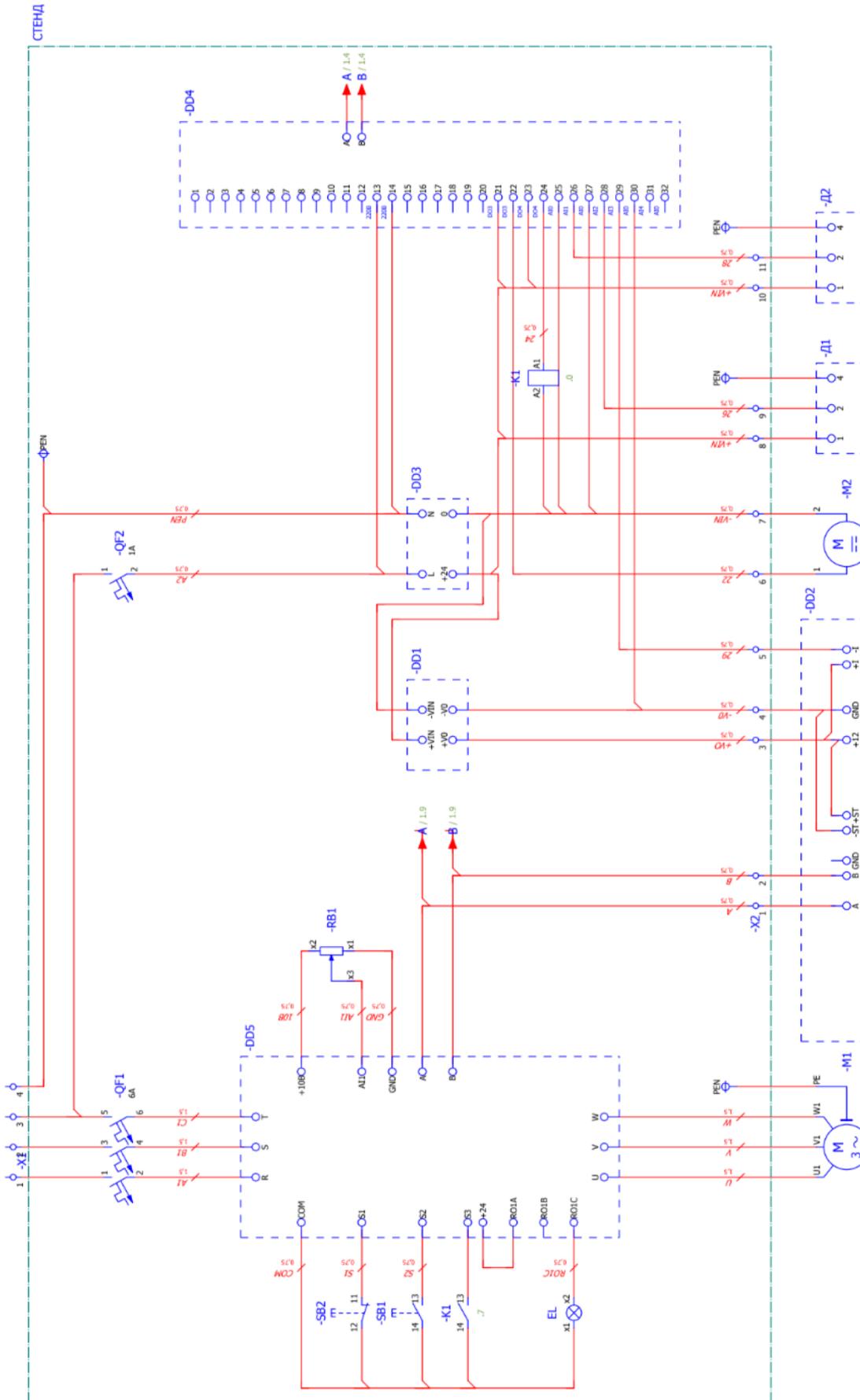


Рис. 6. Электрическая схема лабораторного стенда  
 Fig. 6. Electrical diagram of the laboratory stand

### 3. Практическая часть

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. 7).

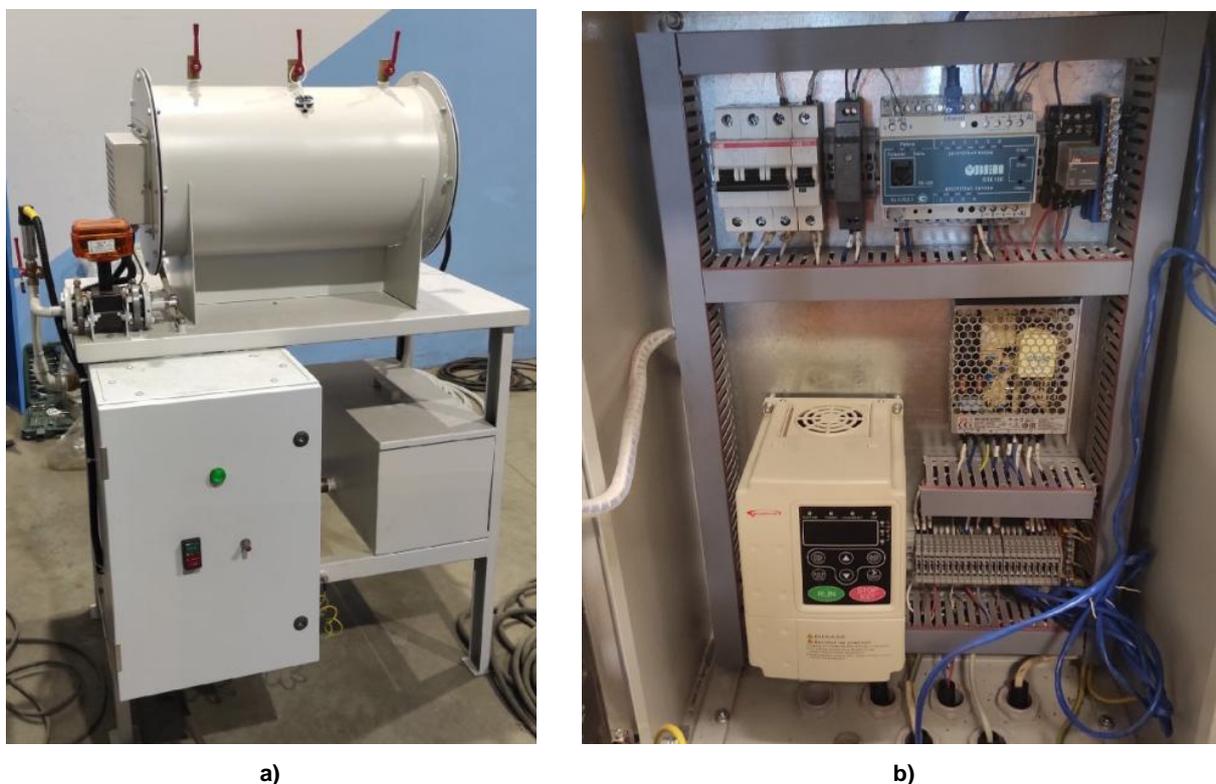


Рис. 7. Фото лабораторного стенда: а – лабораторный стенд (общий вид); б – фото шкафа управления  
Fig. 7. Photo of the laboratory stand: a – laboratory stand (general view); b – photo of the control cabinet

Произведены испытания гидравлической системы стенда при разных скоростях двигателя насоса. Регулирование производилось с помощью ПК и контроллера через программу VinCC. Рабочий стол на ПК (рис. 8) для автоматического регулирования отображает гидравлическую схему, основные параметры (1), кнопки «пуск ПЧ» и «стоп ПЧ», графики изменения процесса в соответствии с рис. 5.

Рабочий стол виртуального управления предполагает запуск ПЧ (готовность к работе), задание скорости электродвигателя (обороты в минуту). Текущие значения скорости на виртуальном рабочем столе 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.

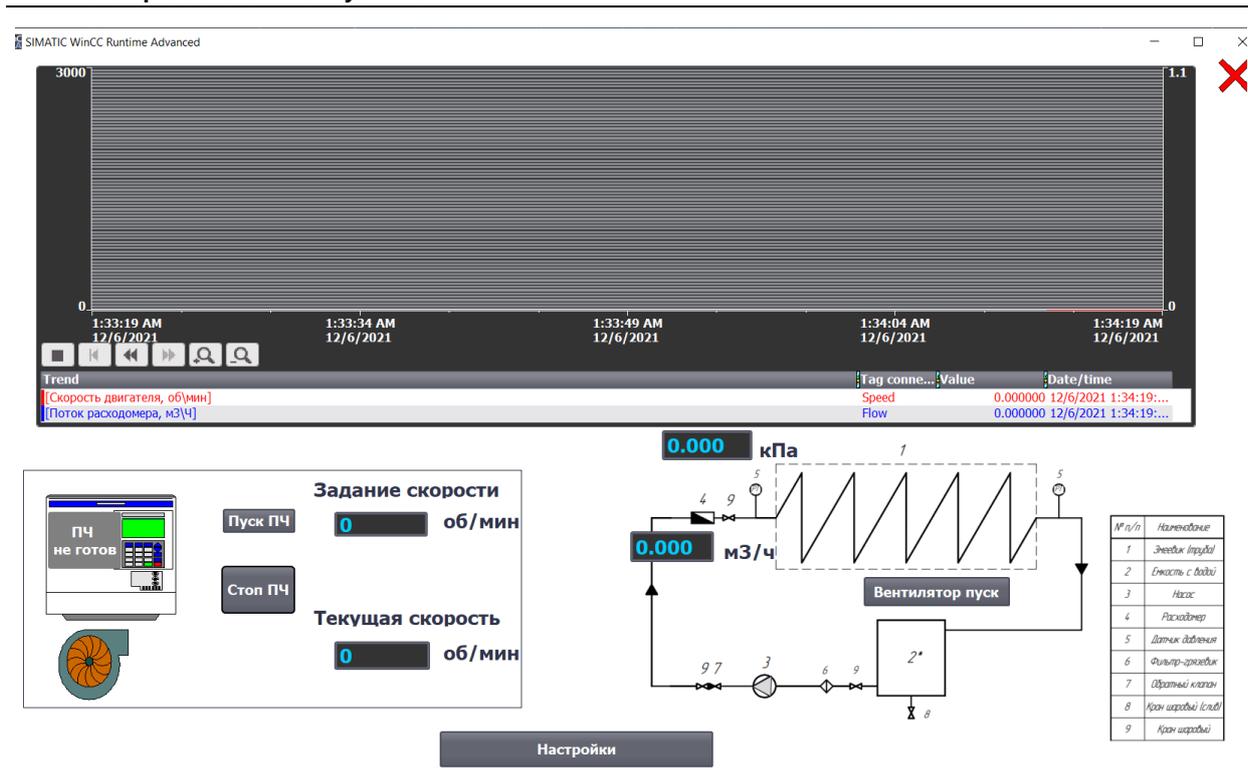


Рис. 8. Рабочий стол виртуального управления лабораторным стендом  
Fig. 8. Virtual control desk of the laboratory stand

### Заключение

Спроектированная и собранная система автоматического управления учебным лабораторным стендом, разработанная через программу WinCC для программируемого логического контроллера ОВЕН, согласно результатам наладки, готова к работе.

### 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. Свободно программируемые устройства в автоматизированных системах управления: учеб. пособие / И.Г. Минаев, В.В. Самойленко, Д.Г. Ушкур, И. В. Федоренко. Ставрополь: СтГАУ, 2016. 168 с.
7. Mori Y, Nakayama W. Study on Forced Convective Heat Transfer in Curved Pipes. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1965. Vol. 8. P. 67–82. DOI: 10.1016/0017-9310(65)90098-0
8. Багоутдинова А.Г., Золотоносов Я.Д. Змеевиковые теплообменники и их математическое описание // Известия вузов. Строительство. 2015. № 7. С. 44–52.
9. Сопряженная задача теплообмена при течении жидкостей в змеевиках с изменяющимся радиусом изгиба винтовой спирали / Е.К. Вачагина, А.Г. Багоутдинова, Я.Д. Золотоносов, И.А. Князева // Вестник технологического университета. 2015. Т. 18, № 16. С. 234–238.

10. Назмеев Ю.Г. Гидродинамика и теплообмен закрученных потоков реологически сложных сред. М.: Энергоиздат., 1966. 368 с.
11. Аронов И.З. О гидравлическом подобии при движении жидкости в изогнутых трубах-змеевиках // Известия вузов. Энергетика. 1962. № 4. С. 52–59.
12. 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
13. Булкин А.Е. Автоматическое регулирование энергоустановок: учеб. пособие. М.: МЭИ, 2016. 508 с.
14. Федотов А.В., Хомченко В.Г. Компьютерное управление в производственных системах: учеб. пособие для вузов. 2-е изд., стер. СПб.: Лань, 2021. 620 с.
15. 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.
16. Немченко В.И., Епифанова Г.Н. Проектирование функциональных и принципиальных электрических схем автоматизированных систем управления: учеб. пособие. 2-е изд. Самара: АСИ СамГТУ, 2017. 60 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 vodogreynnye 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. Minaev I.G., Samoylenko V.V., Ushkur D.G., Fedorenko I.V. *Svobodno programmiruemye ustroystva v avtomatizirovannykh sistemakh upravleniya* [Freely programmable devices in automated control systems]. Stavropol: StGAU Publ.; 2016. 168 p. (In Russ.)
7. Mori Y, Nakayama W. Study on Forced Convective Heat Transfer in Curved Pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1965;8:67–82. DOI: 10.1016/0017-9310(65)90098-0
8. 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.)
9. 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]. *Herald of Technological University*. 2015;18(16):234–238. (In Russ.)
10. Nazmееv Yu.G. *Gidrodinamika i teploobmen zakruchennykh potokov reologicheskii slozhnykh sred* [Hydrodynamics and heat exchange of swirling flows of rheologically complex media]. Moscow: Energoizdat Publ.; 1966. 368 p. (In Russ.)
11. 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.)
12. 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]. *Industrial Power Engineering*. 2020;(11):16–24. (In Russ.) DOI: 10.34831/EP.2020.16.79.003

13. Bulkin A.E. *Avtomaticheskoye regulirovaniye energoustanovok: uchebnoe posobiye* [Automatic regulation of power plants: textbook]. Moscow: MEI Publ.; 2016. 508 p. (In Russ.)
14. Fedotov A.V., Khomchenko V.G. *Komp'yuternoye upravleniye v proizvodstvennykh sistemakh: ucheb. posobiye dlya vuzov* [Computer control in production systems]. St. Petersburg: Lan' publ.; 2021. 620 p. (In Russ.)
15. 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.)
16. Nemchenko V.I., Epifanova G.N. *Proyektirovaniye funktsional'nykh i printsipial'nykh elektricheskikh skhem avtomatizirovannykh sistem upravleniya: ucheb. posobiye* [Design of functional and basic electrical circuits of automated control systems]. Samara: ASI SamGTU Publ.; 2017. 60 p. (In Russ.)

***Информация об авторах***

**Осинцев Константин Владимирович**, канд. техн. наук, доц., заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; osintsev2008@yandex.ru.

**Кускарбекова Сулпан Ириковна**, аспирант, кафедра промышленной теплоэнергетики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; sulpan.kuskarbekova@mail.ru.

***Information about the authors***

**Konstantin V. Osintsev**, Cand. Sci. (Econ), 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 Industrial Heat Power Engineering, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; sulpan.kuskarbekova@mail.ru.

***Статья поступила в редакцию 07.05.2022***

***The article was submitted 07.05.2022***