

Ромашкин, М. А. Разработка программного обеспечения для управления техническим обслуживанием оборудования теплоэлектростанций / М. А. Ромашкин, В. Г. Власов, Е. Р. Мошев // Прикладная математика и вопросы управления. – 2023. – № 3. – С. 95–108. DOI 10.15593/2499-9873/2023.3.07

Библиографическое описание согласно ГОСТ Р 7.0.100–2018

Ромашкин, М. А. Разработка программного обеспечения для управления техническим обслуживанием оборудования теплоэлектростанций / М. А. Ромашкин, В. Г. Власов, Е. Р. Мошев. – Текст : непосредственный. – DOI 10.15593/2499-9873/2023.3.07 // Прикладная математика и вопросы управления / Applied Mathematics and Control Sciences. – 2023. – № 3. – С. 95–108.



ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА
И ВОПРОСЫ УПРАВЛЕНИЯ
№ 3, 2023

<https://ered.pstu.ru/index.php/amcs>



Научная статья

DOI: 10.15593/2499-9873/2023.3.07

УДК 66.013.7:66.011:004.9



Разработка программного обеспечения для управления техническим обслуживанием оборудования теплоэлектростанций

М.А. Ромашкин¹, В.Г. Власов², Е.Р. Мошев¹

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

²УралПромБезопасность, Пермь, Российская Федерация

О СТАТЬЕ

Получена: 26 июня 2023
Одобрена: 13 сентября 2023
Принята к публикации:
18 сентября 2023

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов

равноценен.

Ключевые слова:

теплоэлектростанция, котельный агрегат, трубопровод, аппарат, котел, техническое обслуживание и ремонт, толщинометрия, информационная модель, цифровой двойник, программное обеспечение, интегрированная логистическая поддержка.

АННОТАЦИЯ

Выявлена актуальность применения именно теплоэлектростанций для выработки тепловой и электрической энергии на территории Российской Федерации с учетом ее географических и климатических особенностей.

Приведено обоснование важности процесса технического обслуживания и ремонта по отношению к котельным агрегатам, которые эксплуатируются на теплоэлектростанциях. Выявлены трудности, сопровождающие практическую реализацию этого процесса. Показано влияние выявленных трудностей на имеющиеся недостатки процесса технического обслуживания и ремонта котельного оборудования и соединяющих их технологических трубопроводов и трубопроводов пара и горячей воды.

Поставлена цель исследования, которая направлена на устранение выявленных объективных трудностей, и сформулированы задачи, решение которых будет способствовать достижению поставленной цели.

Обоснована необходимость разработки специализированного программного обеспечения для управления процессом технического обслуживания и ремонта оборудования и трубопроводов котельных агрегатов теплоэлектростанций.

Методология проведения работы основана на разработке цифровых моделей трубопроводов и аппаратов котельного оборудования, а также алгоритмов, направленных на обработку параметров цифровых моделей. Программная реализация разработанных моделей и алгоритмов выполнена средствами объектно-ориентированного программирования в форме клиент-серверного приложения для операционной системы Windows.

Дано описание результатов разработки программного обеспечения, направленного на решение поставленных задач. Приведены примеры некоторых диалоговых окон, сопровождающих функционирование разработанного программного обеспечения, а также примеры созданных цифровых моделей котельного оборудования и их отдельных элементов.

Практическое применение результатов исследования способствует повышению степени цифровизации промышленного производства в целом и энергетического производства в частности.

Результаты, полученные в рамках настоящей работы, в форме программного обеспечения могут быть применены для сопровождения процесса технического обслуживания и ремонта котельного оборудования теплоэлектростанций. При соответствующей адаптации полученные результаты также могут быть применены по отношению к котельному оборудованию, трубопроводам и аппаратам, которые применяются в химической, нефтехимической и нефтеперерабатывающей отраслях промышленного производства.

© ПНИПУ

© Ромашкин Макар Андреевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Оборудование и автоматизация химических производств», e-mail: t_romash_63@mail.ru, ORCID: 0009-0007-3800-9069.

Власов Василий Геннадьевич – руководитель отдела информационных технологий, e-mail: doublev@uralpb.ru, ORCID: 0009-0000-5711-1789.

Мошев Евгений Рудольфович – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой «Оборудование и автоматизация химических производств», e-mail: erm@pstu.ru, ORCID: 0009-0004-0991-4711.



Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

Perm Polytech Style: Romashkin M.A., Vlasov V.G., Moshev E.R. Development of software for the management of the maintenance of equipment of thermal power plants. *Applied Mathematics and Control Sciences*. 2023, no. 3, pp.95–108. DOI: 10.15593/2499-9873/2023.3.07

MDPI and ACS Style: Romashkin, M.A.; Vlasov, V.G.; Moshev E.R. Development of software for the management of the maintenance of equipment of thermal power plants. *Appl. Math. Control Sci.* **2023**, *3*, 95–108. <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2023.3.07>

Chicago/Turabian Style: Romashkin, M.A.; Vlasov, V.G.; Moshev E.R. 2023. “Development of software for the management of the maintenance of equipment of thermal power plants”. *Appl. Math. Control Sci.* no. 3: 95–108. <https://doi.org/10.15593/2499-9873/2023.3.07>



APPLIED MATHEMATICS
AND CONTROL SCIENCES
№ 3, 2023
<https://ered.pstu.ru/index.php/amcs>



Article

DOI: 10.15593/2499-9873/2023.3.07

UDC 66.013.7:66.011:004.9



Development of software for the management of the maintenance of equipment of thermal power plants

M.A. Romashkin¹, V.G. Vlasov², E.R. Moshev¹

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

²UralPromBezopasnost, Perm, Russian Federation

ARTICLE INFO

Received: 26 June 2023
Approved: 13 September 2023
Accepted for publication:
18 September 2023

Funding

This research received
no external funding.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict
of interest.

Author Contributions

equivalent.

Keywords:

combined heat and power plant,
boiler unit, pipeline, apparatus,
boiler, maintenance and repair,
thickness measurement, infor-
mation model, digital twin, software,
integrated logistics support.

ABSTRACT

The relevance of the use of thermal power plants for the generation of thermal and electric energy on the territory of the Russian Federation is revealed, taking into account its geographical and climatic features.

The substantiation of the importance of the process of maintenance and repair in relation to boiler units, which are operated at thermal power plants, is given. Difficulties accompanying the practical implementation of this process are identified. The influence of the identified difficulties on the existing shortcomings in the process of maintenance and repair of boiler equipment and the technological pipelines connecting them and pipelines of steam and hot water is shown.

The goal of the study is set, which is aimed at eliminating the identified objective difficulties and the tasks are formulated, the solution of which will contribute to the achievement of the goal.

The necessity of developing specialized software for managing the process of maintenance and repair of equipment and pipelines of boiler units of combined heat and power plants is substantiated.

The methodology of the work is based on the development of digital models of pipelines and boiler equipment, as well as algorithms aimed at processing the parameters of digital models. The software implementation of the developed models and algorithms is made by means of object-oriented programming in the form of a client-server application for the Windows operating system.

The description of the results of software development aimed at solving the set tasks is given. Examples of some dialog boxes accompanying the functioning of the developed software are given, as well as examples of created digital models of boiler equipment and their individual elements.

The practical application of the research results contributes to an increase in the degree of digitalization of industrial production in general and energy production in particular.

The results obtained in the framework of this work, in the form of software, can be used to accompany the process of maintenance and repair of boiler equipment of combined heat and power plants. With appropriate adaptation, the results obtained can also be applied to boiler equipment, pipelines and apparatus that are used in the chemical, petrochemical and oil refining industries.

© PNRPU

© Makar A. Romashkin – CSc of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Equipment and Automation of Chemical Production, Faculty of Chemical Technology, Industrial Ecology and Biotechnology, e-mail: t_romash_63@mail.ru, ORCID: 0009-0007-3800-9069.

Vasily G. Vlasov – Head of Information Technology Department, e-mail: doublev@uralpb.ru, ORCID: 0009-0000-5711-1789.

Evgeny R. Moshev – Doctor of Technical Sciences, Head of department, Department of Equipment and Automation of Chemical Production, Faculty of Chemical Technology, Industrial Ecology and Biotechnology, e-mail: erm@pstu.ru, ORCID: 0009-0004-0991-4711.



This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

Введение

Направление развития человечества в настоящее время характеризуется высоким уровнем потребления энергии, в том числе в электрической и тепловой формах ее проявления. При этом высока вероятность реализации прогноза неизбежного роста количества потребляемой электрической и тепловой энергии в будущем. Это связано с ростом населения планеты, развитием транспортной инфраструктуры с приоритетом на все более активное использование электротранспорта. Данная тенденция характерна не только для Российской Федерации, но и является общемировой.

Несмотря на то, что тепловую и электрическую энергию возможно генерировать различными способами, в том числе и на основе возобновляемых источников энергии, не все они могут быть применимы на территории РФ. Это обусловлено тем, что только для малой части ее субъектов наблюдается экономически целесообразное число дней в году с высокой солнечной активностью, малой облачностью или большим ветровым напором. Атомная энергетика, несмотря на высокую эффективность, также имеет ряд ограничений и недостатков. Для РФ с учетом ее климатических и географических условий одним из рентабельных источников электрической энергии являются теплоэлектроцентрали (ТЭЦ). При этом для ТЭЦ характерно, что выработка электрической и тепловой энергии осуществляется в них одновременно.

Все это делает затруднительным или невозможным полный отказ от теплоэлектроцентралей в краткосрочном и среднесрочном горизонте планирования.

Для минимизации негативного влияния работы ТЭЦ на окружающую среду и повышения эффективности функционирования ведется активная работа по их модернизации.

Фактическая генерация электроэнергии на ТЭЦ осуществляется турбоагрегатами, которые преобразуют потенциальную энергию вырабатываемого водяного пара в кинетическую энергию вращения вала паровой турбины. Выработка водяного пара и тепловой энергии осуществляется в котельных агрегатах (КА), которые состоят из котлов и вспомогательного оборудования, взаимосвязанных между собой системой технологических трубопроводов, а также трубопроводов пара и горячей воды. От надежной работы КА полностью зависят не только эффективность и промышленная безопасность эксплуатации самой ТЭЦ, но также инфраструктурная стабильность жилого фонда и расположенных рядом промышленных предприятий. Из приведенных выше положений следует, что КА являются одним из важнейших технологических и конструктивных узлов теплоэнергетических предприятий [1].

Теория

Для обеспечения эффективной и безопасной работы ТЭЦ на них организована система технического обслуживания и ремонта (ТОиР) трубопроводов и аппаратов, включая оборудование, входящее в состав котельных агрегатов. Так как работа КА направлена на генерацию водяного пара с высокой температурой и давлением, то к качеству ТОиР указанного теплотехнического оборудования предъявляются повышенные требования.

В соответствии с нормативно-технической документацией, регламентирующей процедуры ТОиР теплотехнического котельного оборудования, этот организационно-технологический процесс содержит большое количество инженерно-технических задач, решаемых как различными службами ТЭЦ, так и внешними экспертными организациями. Практическое решение задач ТОиР котельного оборудования и трубопроводов сопряжено со следующим рядом сложностей, затрудняющих управление этим процессом [1]:

- трудоемкость анализа большого количества нормативно-технической, паспортно-технической, эксплуатационной и ремонтной документации по КА;

- низкая степень оцифрованности технической документации по трубопроводам и аппаратам КА, что не позволяет автоматизировать обработку находящейся в ней информации;
- трудоемкость выполнения большого количества инженерно-технических расчетов;
- необходимость формирования большого количества отчетов по результатам ТОиР;
- сложность принятия инженерно-технических решений, в том числе интеллектуальных.

Все перечисленное выше характерно также для трубчатых печей, сосудов и трубопроводов химических производств [2–4]. Следствием существования сложностей, указанных выше, являются недостатки осуществления процесса ТОиР трубопроводов и оборудования теплоэнергетического комплекса. Среди них следует отметить [5]:

- многократное повторение операций поиска, ввода и обработки данных;
- многократное и трудоемкое создание формуляров и схем КА;
- низкая скорость обработки результатов неразрушающего контроля материала элементов трубопроводов и аппаратов КА;
- сложность обмена информацией между субъектами жизненного цикла КА;
- низкая скорость формирования технической документации по результатам ТОиР;
- сложность систематизации эксплуатационных данных по котельному оборудованию;
- сложность выполнения интеллектуальных процедур, включая процедуры формирования программ контроля металла трубопроводов и аппаратов КА.

Имеющиеся недостатки приводят к негативным последствиям, которые отрицательно влияют на экономическую эффективность и промышленную безопасность ТЭЦ в целом, а именно:

- значительно увеличивается длительность, трудоемкость и стоимость ТОиР трубопроводов и аппаратов, входящих в КА;
- низкая достоверность оценки технического состояния КА;
- низкое качество формируемой технической документации.

Устранить приведенные выше недостатки управления ТОиР можно с помощью специального программного обеспечения (ПО), реализующего принципы интегрированной логической поддержки (ИЛП). Однако анализ распространенного в РФ программного обеспечения, включая разработанное при участии авторов [2; 3], а также узкоспециального и предназначенного для решения схожих задач применительно к другим типам оборудования [6–16], показал, что оно не может быть использовано напрямую без существенных доработок. Реализация задач ТОиР котельного оборудования с минимальными затратами и изменениями самого ПО может быть осуществлена с помощью доработки ПО «Трубопровод» [2; 3].

Исходя из сказанного, целью настоящей работы являлось создание дополнительного программного обеспечения, или модуля, в составе автоматизированной системы «Трубопровод» [2–4], которое позволит автоматизировать выполнение организационно-технологических процедур ТОиР трубопроводов и аппаратов КА.

Данные и методы

Исходными данными для осуществления разработки цифровых моделей и алгоритмов, лежащих в основе функционирования программного обеспечения, являлись результаты анализа процесса и операций технического обслуживания и ремонта оборудования теплоэлектроцентралей (котлов, аппаратов, трубопроводов).

Моделирование процесса технического обслуживания и ремонта оборудования теплоэлектроцентралей выполнено в соответствии с методология Structured analysis and design technique (SADT) [17].

Формирование цифровых двойников котлов, аппаратов, трубопроводов, входящих в состав теплоэлектроцентралей, выполнено в виде фреймовых моделей [18; 19].

Алгоритмы обработки паспортных характеристик оборудования, анализа результатов осуществления неразрушающего контроля элементов котельного оборудования, планирования процесса технического обслуживания и ремонта выполнены с применением элементов теории искусственного интеллекта [21–23].

Модель

Разработка указанного модуля осуществлялась с помощью цифровых моделей трубопроводов и аппаратов котельного оборудования, а также моделей и алгоритмов, рассмотренных ранее в источниках [1–5].

Алгоритмы обработки данных, необходимые для работы программного обеспечения, соответствуют отраслевой нормативно-технической документации в области промышленной безопасности, правил эксплуатации, проведения технического обслуживания и ремонта.

Как и автоматизированная система «Трубопровод», модуль разрабатывался с помощью интегрированной среды разработки Microsoft Visual Studio в виде приложения для операционной системы Windows с диалоговым режимом работы.

Функционирование модуля осуществляется в соответствии с клиент-серверной архитектурой, имеющей отдельную инстанцию в СУБД Oracle. Доступ пользователей к базе данных осуществляется на основе системы с ролевым управлением доступа (Role Based Access Control).

Полученные результаты

Основные функции модуля по отношению к трубопроводам и аппаратам КА:

- ввод, хранение и обработка паспортных и эксплуатационных данных;
- создание и редактирование схем изометрических трубопроводов и отдельных конструктивных элементов котельного оборудования;
 - учет срока эксплуатации (наработки) функциональных узлов котельного оборудования;
 - формирование индивидуальных программ контроля металла конструктивных элементов котельного оборудования;
 - формирование заданий на контроль металла конструктивных элементов котельного оборудования;
 - ввод и обработка результатов неразрушающего контроля;
 - формирование технической документации на основе результатов ТОиР.

При этом следует отметить, что разработанный программный модуль направлен на информационную поддержку и управление процессом ТОиР, который является дискретным.

Хранение паспортно-технических и эксплуатационных сведений о КА предполагается в централизованной базе данных на сервере ТЭЦ. Структура базы данных разрабатывалась с помощью фреймовой модели представления знаний о КА, рассмотренной в источнике [1].

Ниже приведено описание нескольких диалоговых окон, иллюстрирующих примеры использования разработанного модуля для технологического оборудования КА одной из ТЭЦ, расположенной на территории Российской Федерации.

В основном диалоговом окне модуля, приведенном на рис. 1, представлены имеющиеся в базе данных: организационная структура ТЭЦ, приведенная в иерархической виде; пе-

речень трубопроводов и аппаратов, входящих в состав теплоэнергетического котельного оборудования; общая информация о ТЭЦ; список формуляров, входящих в состав котла с указанием регистрационного номера и марки.

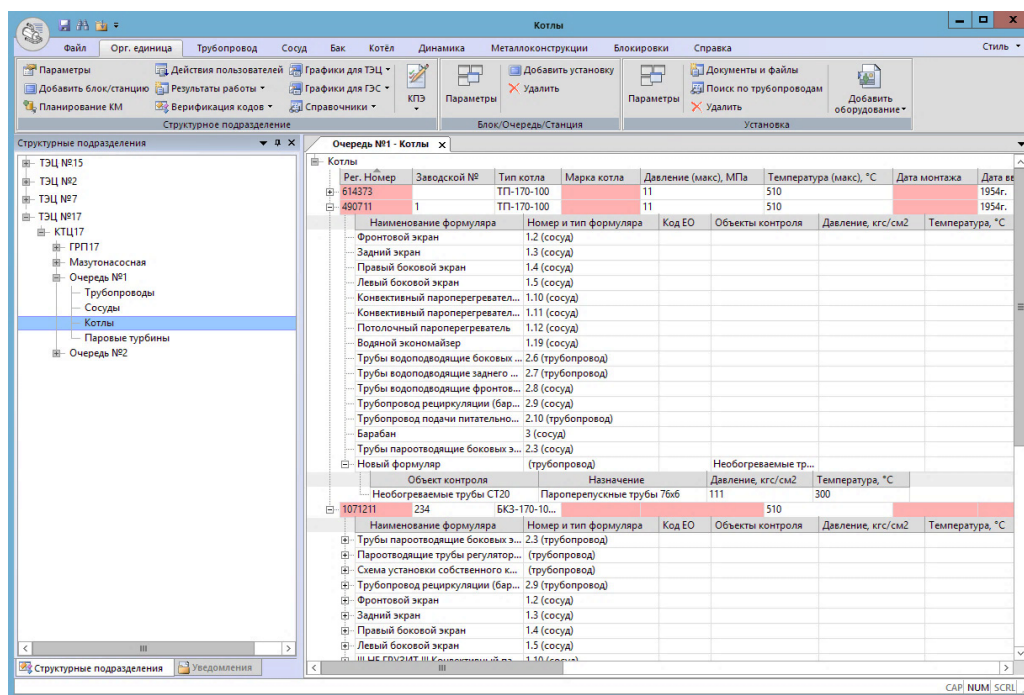


Рис. 1. Основное диалоговое окно модуля (авторские результаты)

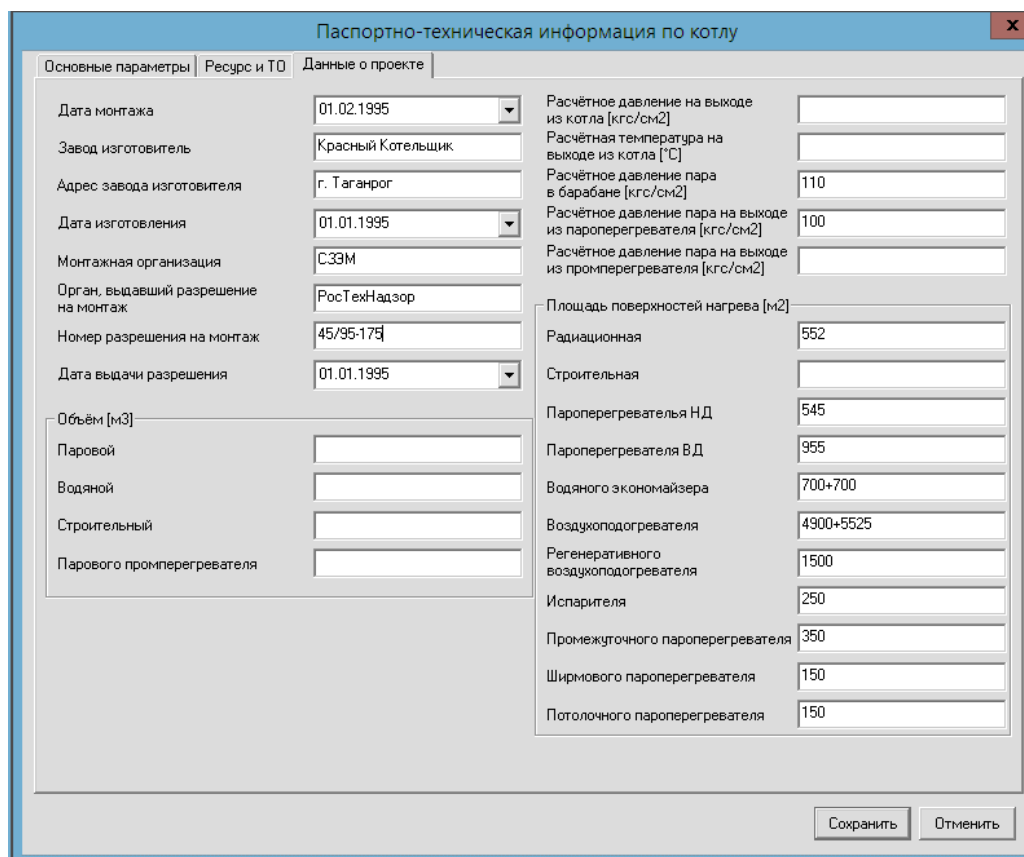


Рис. 2. Паспортно-техническая информация котла (данные о проекте) (авторские результаты)

На рис. 2 приведена одна из вкладок диалогового окна «Редактирование атрибутов котла» для ввода или редактирования паспортных характеристик выбранного КА. Всего это диалоговое окно имеет три вкладки: «Основные параметры», «Ресурс и ТО», «Данные о проекте», что позволяет с достаточной детализацией и подробностью описывать информацию, касающуюся изготовления котла, режимных параметров его работы и сроков планового технического обслуживания.

Для создания интерактивных изометрических схем трубопроводов и схем аппаратов котельного оборудования разработаны специализированные графические редакторы.

Пример использования одного из них для формирования принципиальной схемы барабана котла приведен на рис. 3. Барабаны входят в состав КА и являются взаимосвязанной совокупностью стандартных элементов, таких как «днище», «обечайка», «фланец», «патрубок». Барабан, представленный на рис. 3, состоит из обечайки с внутренним диаметром 1600 мм и двух эллиптических днищ. Длина обечайки составляет 17760 мм. В обечайку барабана врезаны трубы с внешними диаметрами 159, 108, 60, 40, 20 мм.

Представленная в нижней части рис. 3 развертка обечайки барабана формируется автоматически с учетом схемы расположения труб, врезанных в обечайку. Развертка обечайки содержит продольные и поперечные сварные швы. В левой части рис. 3 приведено отдельное диалоговое окно для ввода паспортных параметров обечайки с наименованием «Барабан». Это диалоговое окно содержит различные параметры обечайки, такие как «Дата монтажа», «Марка стали», «Внутренний диаметр», «Толщина стенки», «Длина» и другие. Значение параметра «Минимально допустимая толщина стенки» возможно определить автоматически с помощью созданных алгоритмов, обрабатывающих паспортные данные и технологические параметры работы котла.

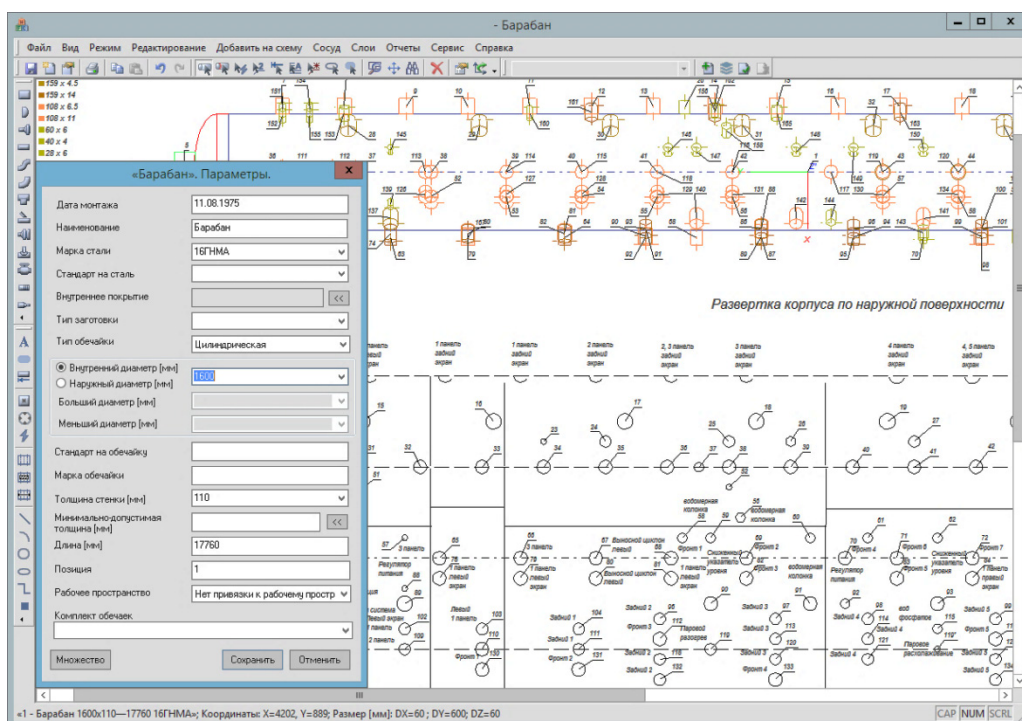


Рис. 3. Интерактивная схема барабана котла и диалоговое окно параметров обечайки (авторские результаты)

Система трубопроводов, объединяющая элементы КА, также входит в его состав. Каждый трубопровод, необходимый для работы КА, является взаимосвязанной совокупно-

стью соответствующих базовых элементов. Среди них можно выделить: «Труба», «Отвод», «Гнутая труба», «Тройник», «Фланец», «Арматура», «Заглушка» и др.

Пример использования специализированного графического редактора для формирования изометрической схемы трубопровода котельного оборудования приведен на рис. 4. Этот трубопровод состоит из элементов с внешним диаметром 219 и 159 мм и толщиной стенки 32, 30 и 18 мм. В правой части рис. 4 приведено отдельное диалоговое окно для ввода паспортных параметров одного из элементов типа «Гнутая труба», или «Гиб». Это диалоговое окно содержит различные параметры трубы, такие как «Дата монтажа», «Марка стали», «Наружный диаметр», «Толщина стенки», «Марка трубы» и другие. Во второй вкладке «Участкигиба» формируется последовательность отдельных прямых и гнутых отрезков гнутой трубы, из которых она состоит, вносятся геометрические параметры этих участков. Значение параметра «Минимально допустимая толщина стенки» возможно определить автоматически с помощью созданных алгоритмов, обрабатывающих паспортные данные и технологические параметры работы трубопровода.

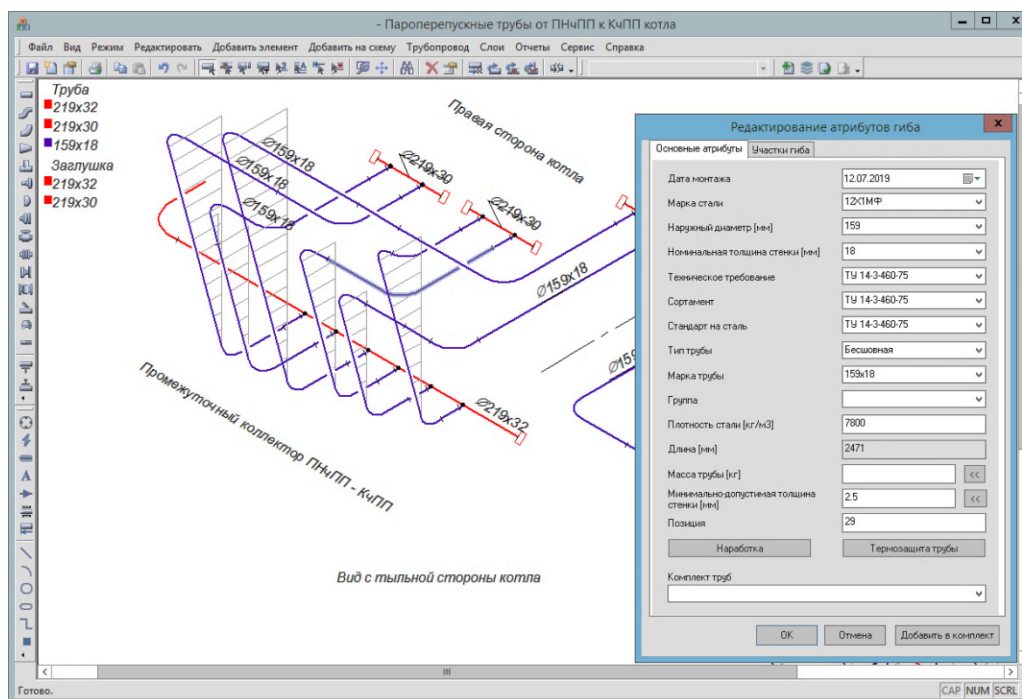


Рис. 4. Интерактивная изометрическая схема трубопровода котла и диалоговое окно атрибутов отвода (авторские результаты)

Одной из важнейших диагностических операций, входящих в состав ТОиР, является измерение толщины стенки элементов аппаратов и трубопроводов, входящих в состав КА.

На рис. 5 продемонстрирован пример диалогового окна для ввода результатов замера толщины стенки одного из элементов трубопровода – отвода с углом поворота 45° , внешним диаметром 1420 мм, толщиной стенки 10 мм. Выбран вариант измерения толщины стенки в четырех точках, расположенных в одном из наиболее подверженных износу сечении, а именно – в месте изгиба элемента. Диалоговое окно для ввода результатов замера толщины стенки содержит область предварительного просмотра расположения точек замеров в сечении по отношению ко всей трехмерной модели измеряемого элемента трубопровода. Элементы управления в нижней части диалогового окна позволяют изменить положение выбранной точки замера на элементе.

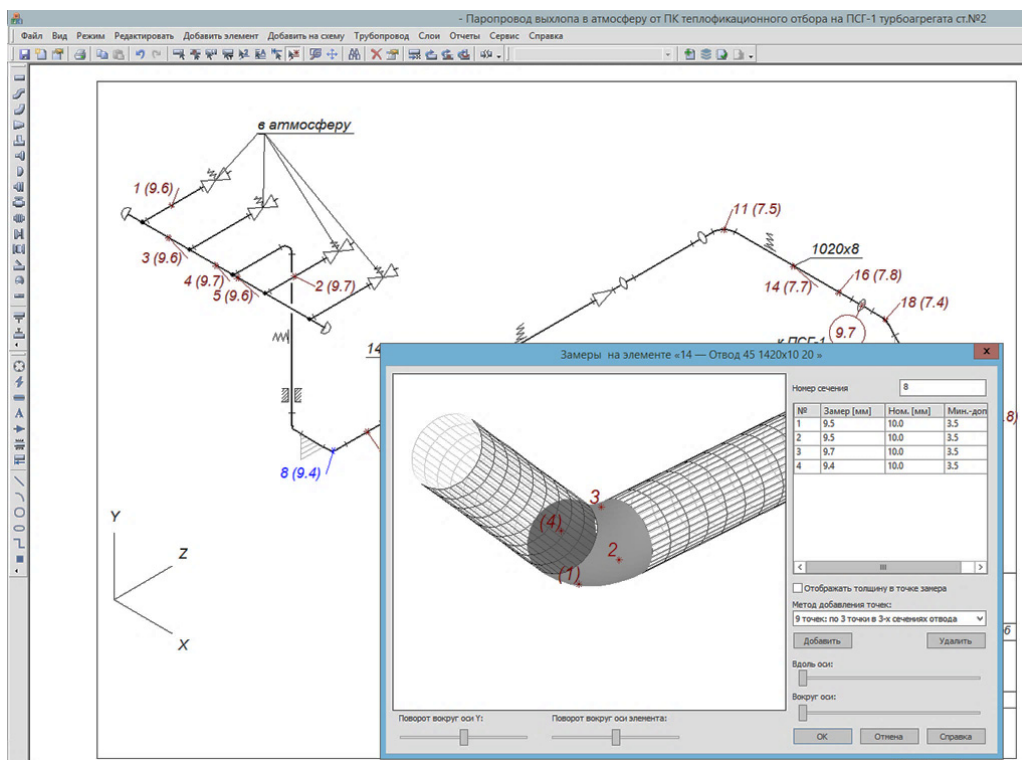


Рис. 5. Диалоговое окно для внесения результатов замеров толщины стенки (авторские результаты)

С помощью разработанного модуля также можно формировать различную техническую документацию, в частности документ «Индивидуальная программа контроля» (ИПК), который формируется в соответствии с нормативно-технической документацией и для каждого КА. ИПК содержит перечень аппаратов и трубопроводов, их конструктивных элементов и сварных соединений, для которых необходимо определить вид и объем неразрушающего контроля (ультразвуковой, радиографический, химический).

На практике процесс формирования ИПК для всей КА достаточно сложен и трудоемок, включает принятие интеллектуальных решений по отношению ко всем аппаратами и трубопроводам, входящим в состав котельного оборудования. Использование разработанного модуля позволяет автоматизировать этот процесс, что не только сокращает срок формирования указанного документа, но и повышает его качество. Автоматизация формирования ИПК осуществлялась с помощью моделей, описанных в источнике [1].

Ниже приведен пример алгоритма действий при формировании ИПК в автоматизированном режиме с помощью разработанного модуля.

Так как содержание ИПК зависит от типа трубопровода или аппарата, то при ее формировании пользователю следует выбрать соответствующий тип котельного оборудования из списка. На рис. 6 выбран тип трубопровода «Паропровод I категории».

Далее в процессе формирования ИПК автоматически определяются места проведения неразрушающего контроля на элементах трубопровода или аппарата в зависимости от выбранного пользователем типа котельного оборудования. На рис. 7 приведена изометрическая схема одного из трубопроводов котла с автоматически сформированным перечнем элементов, для которых необходимо провести неразрушающий контроль с указанием методов его проведения. Например, автоматически было определено, что для крутоизогнутых отводов типоразмера 325×38, 273×32 и 219×28 мм следует применить следующие виды неразрушающего контроля: визуальный, ультразвуковой, цветная или магнитопорошковая дефектоскопия.

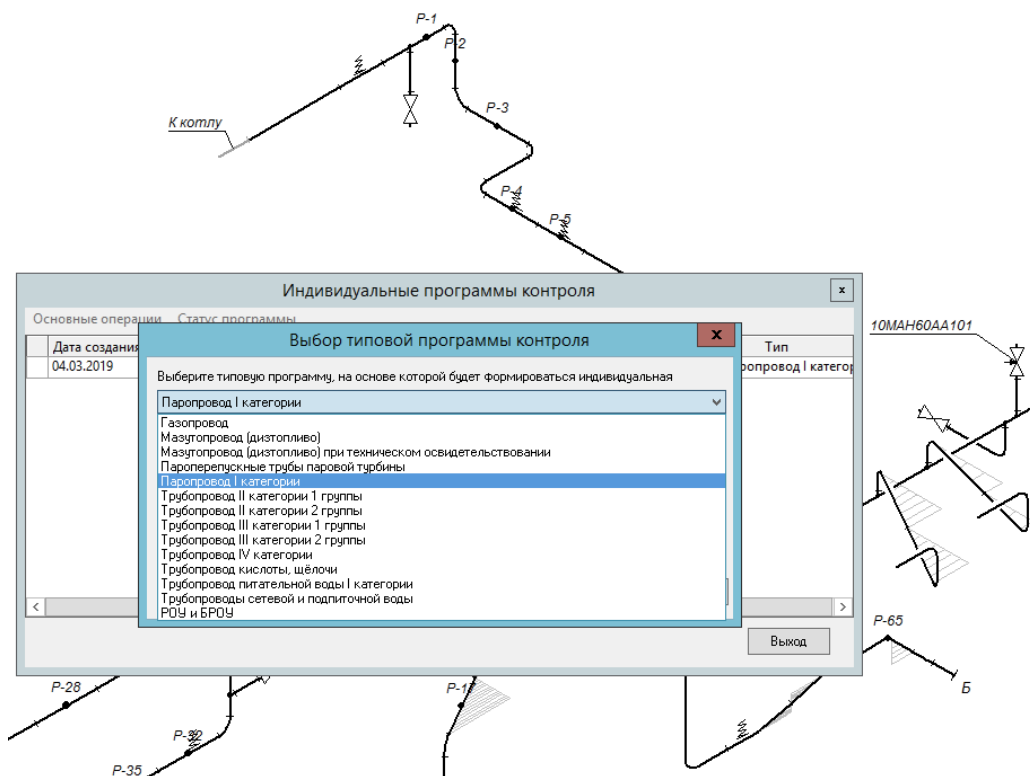


Рис. 6. Диалоговое окно выбора типовой программы контроля: на примере трубопровода (авторские результаты)

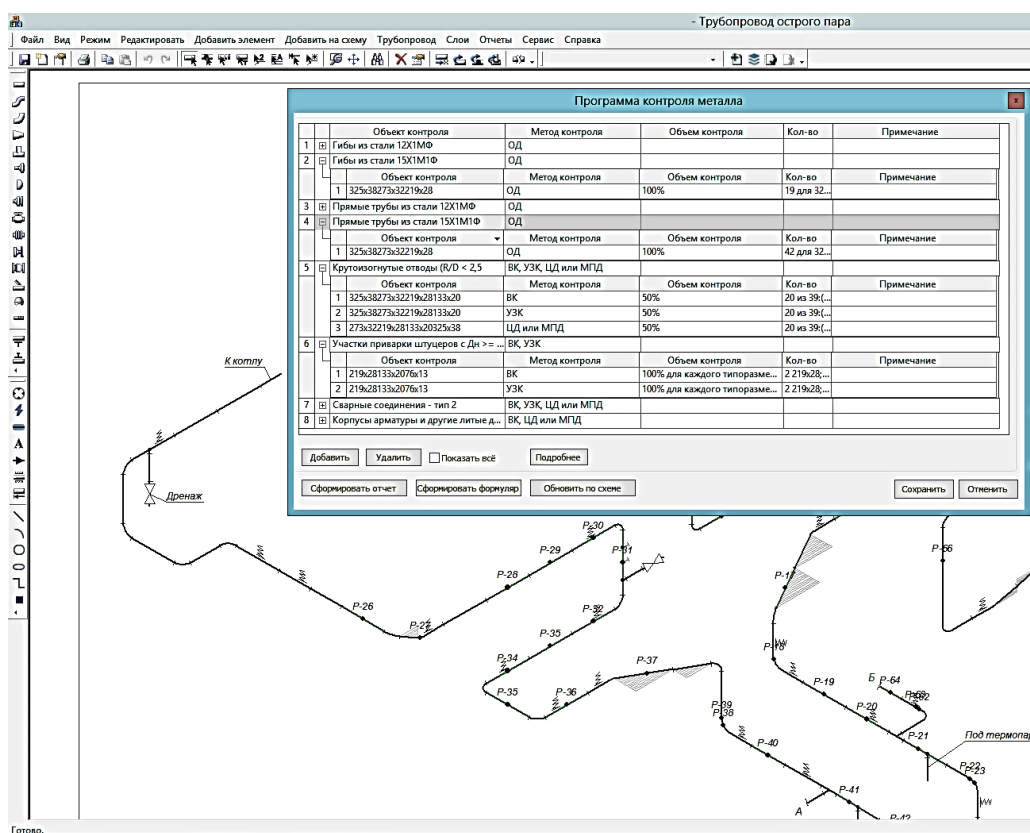


Рис. 7. Список элементов трубопровода котла для проведения неразрушающего контроля (авторские результаты)

ИНДИВИДУАЛЬНАЯ ПРОГРАММА КОНТРОЛЯ				
Трубопровод пара и горячей воды «Трубопровод острого пара, котел 2» Рег. № 226				
Расположение: ТЭЦ №12, Блок №2				
Завод-изготовитель:		ЗАО "ЛСМУ Северо-Запад-Энергомонтаж-2"		
Дата изготовления:		16.12.2015		
Год ввода в эксплуатацию:		2015		
Дата создания ИПК:		04.03.2022		
Наработка на 04.03.2019:		122217 ч.		
Количество циклов на 04.03.2019:		581		
Наработка с последнего КР (01.12.2022):		142359 ч.		
Среда:		Водяной пар		
Параметры эксплуатации:				
- давление:		140 кгс/см ²		
- температура:		545 °С		
Категория, группа:		I,		
№ п/п	Объект контроля	Метод контроля	Объем контроля	
			%	по элементам
1	Гибы из стали 12X1MФ	ОД	100%	19 для Ø219x28; 4 для Ø133x20;
2	Гибы из стали 15X1M1Ф	ОД	100%	19 для Ø325x38; 9 для Ø273x32; 7 для Ø219x28;
3	Прямые трубы из стали 12X1MФ	ОД	100%	2 для Ø219x28;
4	Прямые трубы из стали 15X1M1Ф	ОД	100%	42 для Ø325x38; 3 для Ø273x32; 1 для Ø219x28;
5	Кривоизогнутые отводы (R/D < 2,5)	ВК; УЭК	50%	20 из 39: (29 шт. Ø325x38; 5 шт. Ø273x32; 1 шт. Ø219x28; 4 шт. Ø133x20)

Рис. 8. Список элементов схемы трубопровода для проведения неразрушающего контроля (авторские результаты)

Сформированная в автоматизированном режиме ИПК с помощью выбора команды может быть преобразована в документ формата MS Word, пример которого приведен на рис. 8. Этот текстовый документ может быть использован для осуществления дальнейшего согласования в соответствующих подразделениях ТЭЦ и передаче исполнителю вместе с интерактивной схемой котельного оборудования для непосредственного проведения работ ТОиР.

Заключение

Рассмотренная тема исследования относится к области цифровизации производств, которая предполагает создание ПО, направленного на оптимизацию и управление процессами ИЛП оборудования. В настоящей статье рассмотрена достаточная важная составная часть процессов ИЛП – управление ТОиР трубопроводов и аппаратов КА. При этом разработанное ПО можно применять не только для ТОиР котельного оборудования ТЭЦ, но также и для многих других производств, например химических, нефтегазовых, пищевых. Унифицированные элементы конструкции, из которых состоят КА, входят во многие виды других типов оборудования, что позволяет существенно расширить область применения представленного ПО после его соответствующей адаптации.

Настоящая работа является развитием более ранних исследований авторов, посвященных автоматизации процессов ТОиР трубопроводных систем и технологического оборудования химических производств.

Дальнейшие исследования по данной тематике планируется продолжить в направлении разработки моделей, алгоритмов, цифровых двойников и ПО для автоматизации процессов ТОиР и ИЛП других видов оборудования теплоэнергетических и иных производств.

Конечной целью выполнения работ авторы видят создание баз данных унифицированных цифровых двойников оборудования и процессов. Наличие указанной базы данных по-

зволит максимально автоматизировать ИЛП оборудования предприятий различной отраслевой принадлежности и как следствие повысить их экономическую эффективность и промышленную безопасность.

Список литературы

1. Логико-информационные модели процессов технического обслуживания котельных установок химико-технологических систем / В.П. Мешалкин, Е.Р. Мошев, В.Д. Белов, М.А. Ромашкин, В.Г. Власов, М.Г. Шницляйн // Теоретические основы химической технологии. – 2022. – Т. 56, № 1. – С. 111–127. DOI: 10.31857/S0040357122010109
2. Moshev E.R., Meshalkin V.P., Romashkin M.A. Development of models and algorithms for intellectual support of life cycle of chemical production equipment // *Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modelling. Studies in Systems, Decision and Control*. 2020. – Vol. 259. – P. 153–165. DOI: 10.1007/978-3-030-32579-4_12
3. Мошев Е.Р., Мешалкин В.П. Автоматизированная система логистического обеспечения технического обслуживания оборудования химических производств // Теоретические основы химической технологии. – 2014. – Т. 48, № 6. – С. 709.
4. Meshalkin V.P., Moshev E.R. Modes of Functioning of the Automated System “Pipeline” with Integrated Logistical Support of Pipelines and Vessels of Industrial Enterprises // *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*. 2015. – Vol. 44, iss. 7. – P. 580–592. DOI: 10.3103/S1052618815070109
5. Belov V.D., Moshev E.R. Functional Model for the Formation of Individual Metal Control Programs of Boiler Equipment // *Studies in Systems, Decision and Control*. 2021. – Vol. 338. – P. 323–334. DOI:10.1007/978-3-030-66077-2_26
6. Working mode in aircraft manufacturing based on digital coordination model / F. Guo, F. Zou, J. Liu, Z. Wang // *The international journal of advanced manufacturing technology*. – 2018. – Vol. 98. – P. 1547–1571. DOI: 10.1007/S00170-018-2048-0
7. Kim H., Han S. Interactive 3d building modeling method using panoramic image sequences and digital map // *Multimedia tools and applications*. – 2018. – Vol. 77, iss. 20. – P. 27387–27404. DOI: 10.1007/S11042-018-5926-4
8. Moshev E.R., Romashkin M.A. Development of a conceptual model of a piston compressor for automating the information support of dynamic equipment // *Chemical and Petroleum Engineering*. 2014. – Vol. 49, iss. 9–10. – P. 679–685. DOI: 10.1007/S10556-014-9818-9
9. Menshikov V., Meshalkin V., Obraztsov A. Heuristic algorithms for 3D optimal chemical plant layout design // *Proceedings of 19th International Congress of Chemical and Process Engineering (CHISA-2010)*. – 2010. – Vol. 4. – P. 1425.
10. Lu J., Zhu Q., Wu Q. A novel data clustering algorithm using heuristic rules based on k-nearest neighbors’ chain // *Engineering applications of artificial intelligence*. – 2018. – Vol. 72. – P. 213–227. DOI: 10.1016/J.ENGAPPAI.2018.03.014
11. Zakharova A., Savitskaya T., Egorov A. Algorithm for calculating the reliability of chemical-engineering systems using the logical-and-probabilistic method in MATLAB // *Studies in Systems, Decision and Control*. – 2020. – Vol. 259. – P. 237–249. DOI: 10.1007/978-3-030-32579-4_19
12. Isogen®. Automatic piping isometrics from 3D plant design systems [Электронный ресурс] / Alias. – URL: https://www.alias.ltd.uk/ISOGEN_main.asp (дата обращения: 01.03.2023).
13. SAP Software & Solutions. Enterprise Resource Planning (ERP) [Электронный ресурс] / SAP. – URL: <https://www.sap.com/products/erp.html> (дата обращения: 14.04.2023).
14. AVEVA. Industrial Software Solutions [Электронный ресурс] / AVEVA. – URL: <https://www.aveva.com/en/solutions/> (дата обращения: 15.04.2023).

15. PLANT-4D Athena 3 [Электронный ресурс] / CSoft. – URL: <https://www.plant4d.ru/plant-4d/> (дата обращения: 10.04.2023).
16. Equipment management. Asset Management Software with No Limits! [Электронный ресурс] / iMaint. – URL: <https://www.imaint.com/products/imaint/asset-management-software/> (дата обращения: 5.04.2023).
17. Marca D., McGowan C. Structured analysis and design technique. – McGraw-Hill, New York, U.S.A, 1987. – 392 p.
18. Marvin Minsky. A framework for representing knowledge. – McGraw-Hill, New York, U.S.A, 1975. – 76 p.
19. Sepiacchi P., Depetri V., Manca D. A systematic approach to the optimal design of chemical plants with waste reduction and market uncertainty // *Computers and Chemical Engineering*. 2017. – Vol. 102. – P. 96–109. DOI: 10.1016/J.COMPCHEMENG.2016.11.032
20. Wu D., Olson D.L., Dolgui A. Artificial intelligence in engineering risk analytics // *Engineering applications of artificial intelligence*. 2017. – Vol. 65. – P. 433–435. DOI: 10.1016/J.ENGAPPAI.2017.09.001
21. Проталинский О.М. Применение методов искусственного интеллекта при автоматизации технологических процессов: монография. – Астрахань: Изд-во Астрах. гос. техн. ун-та, 2004. – 183 с.
22. Russell S.J., Norvig P. *Artificial Intelligence: A Modern Approach*, Third Edition. Prentice Hall. – New Jersey, U.S.A, 2010. – 1154 p.
23. Intelligent environmental decision support systems / M. Sánchez-Marrè, K. Gibert, R.S. Sojda, J.P. Steyer, P. Struss, I. Rodríguez-Roda, J. Comas, V. Brilhante, E.A. Roehl // *Environmental modelling, software and decision support: state of the art and perspectives*. – Elsevier, Amsterdam, 2008. – P. 119–144.

References

1. Meshalkin V.P., Moshev E.R., Belov V.D., Romashkin M.A., Vlasov V.G., Schnitzlein M.G. Logical and information models of the processes of maintenance of boiler installations of chemical and technological systems. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2022, vol. 56, iss. 1, pp. 107-123. DOI: 10.31857/S0040357122010109
2. Moshev E.R., Meshalkin V.P., Romashkin M.A. Development of models and algorithms for intellectual support of life cycle of chemical production equipment *Cyber-Physical Systems: Advances in Design & Modelling. Studies in Systems, Decision and Control*, 2020. vol. 259. pp. 153–165. DOI: 10.1007/978-3-030-32579-4_12
3. Moshev E. R., Meshalkin V. P. Computer Based Logistics Support System for the Maintenance of Chemical Plant Equipment. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2014, vol. 48, № 6, pp. 855–863.
4. Meshalkin V. P., Moshev E. R. Modes of Functioning of the Automated System “Pipeline” with Integrated Logistical Support of Pipelines and Vessels of Industrial Enterprises. *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 2015, vol. 44, iss. 7, pp. 580–592. DOI: 10.3103/S1052618815070109
5. Belov V.D., Moshev E.R. Functional Model for the Formation of Individual Metal Control Programs of Boiler Equipment. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2021, vol. 338, pp. 323–334. DOI:10.1007/978-3-030-66077-2_26
6. Guo F., Zou F., Liu J., Wang, Z. Working mode in aircraft manufacturing based on digital coordination model *The international journal of advanced manufacturing technology*, 2018, vol. 98, pp. 1547-1571. DOI: 10.1007/S00170-018-2048-0

7. Kim H., Han S. Interactive 3d building modeling method using panoramic image sequences and digital map *Multimedia tools and applications*, 2018, vol. 77, iss. 20, pp. 27387–27404. DOI: 10.1007/S11042-018-5926-4
8. Moshev E.R., Romashkin M.A. Development of a conceptual model of a piston compressor for automating the information support of dynamic equipment *Chemical and Petroleum Engineering*, 2014, vol. 49, iss. 9–10, pp. 679–685. DOI: 10.1007/S10556-014-9818-9
9. Menshikov V., Meshalkin V., Obraztsov A. Heuristic algorithms for 3D optimal chemical plant layout design *Proceedings of 19th International Congress of Chemical and Process Engineering (CHISA-2010)*, 2010, vol. 4, pp. 1425
10. Lu J., Zhu Q., Wu Q. A novel data clustering algorithm using heuristic rules based on k-nearest neighbors' chain *Engineering applications of artificial intelligence*, 2018, vol. 72, pp. 213–227. DOI: 10.1016/J.ENGAPPAL.2018.03.014
11. Zakharova A., Savitskaya T., Egorov A. Algorithm for calculating the reliability of chemical-engineering systems using the logical-and-probabilistic method in MATLAB *Studies in Systems, Decision and Control*, 2020, vol. 259, pp. 237–249. DOI: 10.1007/978-3-030-32579-4_19
12. Isogen®. Automatic piping isometrics from 3D plant design systems [Isogen®. Automatic piping isometrics from 3D plant design systems]. Available at: https://www.alias.ltd.uk/ISOGEN_main.asp (accessed 01 March 2023).
13. SAP Software & Solutions. Enterprise Resource Planning (ERP) [Enterprise Resource Planning (ERP)] Available at: <https://www.sap.com/products/erp.html> (accessed 14 Apr 2023).
14. AVEVA. Industrial Software Solutions [AVEVA. Industrial Software Solutions]. Available at: <https://www.aveva.com/en/solutions/> (accessed 15 Apr 2023).
15. PLANT-4D Athena 3 [PLANT-4D Athena 3]. Available at: <https://www.plant4d.ru/plant-4d/> (accessed 10 Apr 2023).
16. Equipment management. Asset Management Software with No Limits! [Asset Management Software with No Limits!]. Available at: <https://www.imaint.com/products/imaint/asset-management-software/> (accessed 5 Apr 2023).
17. Marca D., McGowan C. Structured analysis and design technique. McGraw-Hill. 1987. 392 p.
18. Marvin Minsky. A framework for representing knowledge. McGraw-Hill, New York, U.S.A. 1975. 76 p.
19. Sepiacchi P., Depetri V., Manca D. A systematic approach to the optimal design of chemical plants with waste reduction and market uncertainty. *Computers and Chemical Engineering*, 2017, vol. 102, pp. 96–109. DOI: 10.1016/J.COMPCHEMENG.2016.11.032
20. Wu D., Olson D.L., Dolgui A. Artificial intelligence in engineering risk analytics. *Engineering applications of artificial intelligence*, 2017, vol. 65, pp. 433–435. DOI: 10.1016/J.ENGAPPAL.2017.09.001
21. Protalinski, O.M. Primenenie metodov iskusstvennogo intellekta pri avtomatizatsii tekhnologicheskikh protsessov [Application of artificial intelligence techniques in the automation of technological processes]: Monograph, Publishing House of ASTU, Astrakhan, 2004, 183 p.
22. Russell S.J., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach, Third Edition. Prentice Hall, New Jersey, U.S.A., 2010, 1154 p.
23. Sánchez-Marrè M., Gibert K., Sojda R.S., Steyer J.P., Struss P., Rodríguez-Roda I., Comas J., Brillhante V., Roehl E.A. Intelligent environmental decision support systems. *Environmental modelling, software and decision support: state of the art and perspectives*, Elsevier, Amsterdam, 2008, pp. 119–144.