

ТЕПЛОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ, ИХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ И АГРЕГАТЫ (05.14.14)

УДК 377.1

DOI: 10.24160/1993-6982-2022-1-66-84

Реализация модели системных изменений многоуровневой проектно-ориентированной подготовки теплоэнергетиков в Сибирском федеральном университете

Е.А. Бойко, П.В. Шишмарев, Д.И. Карабарин, А.В. Бобров, С.Р. Янов, Н.С. Черных, А.А. Пикалова, Д.В. Сургутский, И.В. Загородний

Представлен опыт и результаты внедрения международной образовательной инициативы проектно-ориентированного обучения CDIO при реализации модели системных изменений многоуровневой подготовки теплоэнергетиков на кафедре тепловых электрических станций во ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет».

Ключевые слова: системные изменения, инженерное образование, проектно-ориентированное обучение, теплоэнергетика, промышленные партнеры, инновации.

Для цитирования: Бойко Е.А., Шишмарев П.В., Карабарин Д.И., Бобров А.В., Янов С.Р., Черных Н.С., Пикалова А.А., Сургутский Д.В., Загородний И.В. Реализация модели системных изменений многоуровневой проектно-ориентированной подготовки теплоэнергетиков в Сибирском федеральном университете // Вестник МЭИ. 2022. № 1. С. 66—84. DOI: 10.24160/1993-6982-2022-1-66-84.

Implementing a Model of System Changes in the Multilevel Project-Oriented Training of Specialists in Thermal Power Engineering at the Siberian Federal University

E.A. Boyko, P.V. Shishmarev, D.I. Karabarin, A.V. Bobrov, S.R. Yanov, N.S. Chernykh, A.A. Pikalova, D.V. Surgutskiy, I.V. Zagorodniy

The article presents the experience and results of introducing the international education initiative of project-oriented education (CDIO) in implementing the model of system-wide changes in the multilevel training of specialists in thermal power engineering at the Chair of Thermal Power Plants of the Siberian Federal University.

Key words: system-wide changes, engineering education, project-oriented education, thermal power engineering, industrial partners, innovations.

For citation: Boyko E.A., Shishmarev P.V., Karabarin D.I., Bobrov A.V., Yanov S.R., Chernykh N.S., Pikalova A.A., Surgutskiy D.V., Zagorodniy I.V. Implementing a Model of System Changes in the Multilevel Project-Oriented Training of Specialists in Thermal Power Engineering at the Siberian Federal University. Bulletin of MPEI. 2022;1:66—84. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2022-1-66-84.

В Послании Федеральному собранию 4 декабря 2014 г. Президент России Владимир Путин обозначил Национальную технологическую инициативу (НТИ) одним из приоритетов государственной политики — «на основе долгосрочного прогнозирования необходимо понять, с какими задачами Россия столкнется через 10 – 15 лет, какие передовые решения потребуются для

того, чтобы обеспечить национальную безопасность, качество жизни людей, развитие отраслей нового технологического уклада» [1]. НТИ содержит системные решения по определению и созданию ключевых технологий, необходимых изменений в области норм и правил, работающих мер финансового и кадрового развития, механизмов вовлечения и вознаграждения носи-

телей необходимых компетенций. Технологии выбираются с учетом основных трендов мирового развития, исходя из приоритета сетевых технологий, сконцентрированных вокруг человека как конечного потребителя. В разработку НТИ вовлечены проектные, творческие команды, технологические компании, готовые впитывать новые разработки, ведущие университеты, исследовательские центры, деловые объединения, институты развития, экспертные и профессиональные сообщества, заинтересованные министерства [2].

Одно из стратегических направлений развития НТИ — эффективное решение задачи кадрового обеспечения российской промышленности инженерами нового поколения в горизонте до 2035 г. Для совершенствования промышленных отраслей в эпоху глобального инновационного уклада нужен новый инженер, не только и не столько хорошо владеющий конкретной технологией, сколько обладающий системным мышлением, способный организовать взаимодействие различных технологий на основе учета особенностей их развития [3].

Понимание многими университетами актуальности сформулированной задачи привело к интенсивному поиску и внедрению новых образовательных технологий подготовки инженеров, востребованных профессиональной реальностью на основе формирования и реализации модели системных изменений многоуровневого инженерного образования (бакалавриат, магистратура и аспирантура) с учетом непрерывности и преемственности результатов на каждом из его уровней, заменяя традиционный принцип усвоения знаний на культуру поиска, опережения и обновления [4]. Для ведущих российских университетов, претендующих на высокие позиции в международных рейтингах, данная задача сопряжена с приоритетным направлением деятельности по развитию научных исследований и инновационной деятельности.

Эффективным концептуальным и методологическим инструментом для модернизации многоуровневых образовательных программ подготовки выпускников к комплексной инновационной и исследовательской инженерной деятельности на всех этапах жизненного цикла технических объектов, процессов и систем является применение на уровне бакалаврской подготовки проектно-ориентированной международной образовательной инициативы CDIO (Conceive (Планирование), Design (Проектирование), Implement (Производство), Operate (Применение)), существенно меняющей требования к модернизации содержания учебных планов, дисциплин и условий реализации проектной деятельности, методов преподавания и обучения, повышения квалификации преподавателей, непрерывной оценки результатов образовательной программы, усовершенствованной и адаптированной к задачам магистратуры и аспирантуры [5]. Вместо Operate (Применение), не являющегося для большинства магистров при-

оритетным видом деятельности, предусматривается Forecast (Прогнозирование), предполагающее анализ тенденций на рынке, прогнозирование перспективных запросов потребителей, оценку рисков и неопределенностей, определение наиболее востребованных и конкурентоспособных технических объектов, процессов и систем, что важно для планирования, проектирования и производства инновационной продукции. В свою очередь, для выпускников аспирантуры вместо Implement (Производство) предусмотрено Foresight (Предвидение), включающее научное и технологическое предвидение будущего, долгосрочное прогнозирование развития техники, планирование и проведение исследований, анализ «критических» технологий, что важно для создания научных основ инновационной деятельности.

Данный подход, основанный на использовании CDIO Syllabus и CDIO Standards в качестве моделей при планировании результатов обучения (компетенций выпускников) и проектировании образовательных программ, обеспечивающих их достижение (рис. 1), широко применяется в мировой практике (в частности, при аккредитации инженерных программ в странах участниках Washington Accord), поскольку хорошо согласуется с требованиями международных стандартов IAE Graduate Attributes and Professional Competences и EURACE Framework Standards and Guidelines к результатам обучения в вузе и компетенциям современных профессиональных инженеров [6].

Таким образом, структура и содержание планируемых результатов обучения, представленных в CDIO Syllabus (рис. 2, 3) адекватно отвечают задачам современной энергетики и служат системообразующим основанием при проектировании новых образовательных программ.

Несмотря на масштаб и положительный зарубежный опыт внедрения стандартов CDIO в различных вузах мира, за рамками практических рекомендаций остаются многочисленные аспекты теоретических и прикладных задач системного применения образовательной инициативы в конкретной образовательной программе, в частности, при подготовке теплоэнергетиков.

Представлены опыт и результаты внедрения стандартов CDIO при подготовке бакалавров, магистров и аспирантов теплоэнергетиков на кафедре тепловых электрических станций Сибирского федерального университета. В настоящее время опыт внедрения составляет шесть лет с момента официального включения Сибирского федерального университета в 2014 г. в сообщество университетов, реализующих стандарты CDIO [7].

Принципиальное значение для достижения эффективности образовательной программы в достижении максимальных результатов по видам инженерной деятельности, реализующей идеологию CDIO, имеет соз-

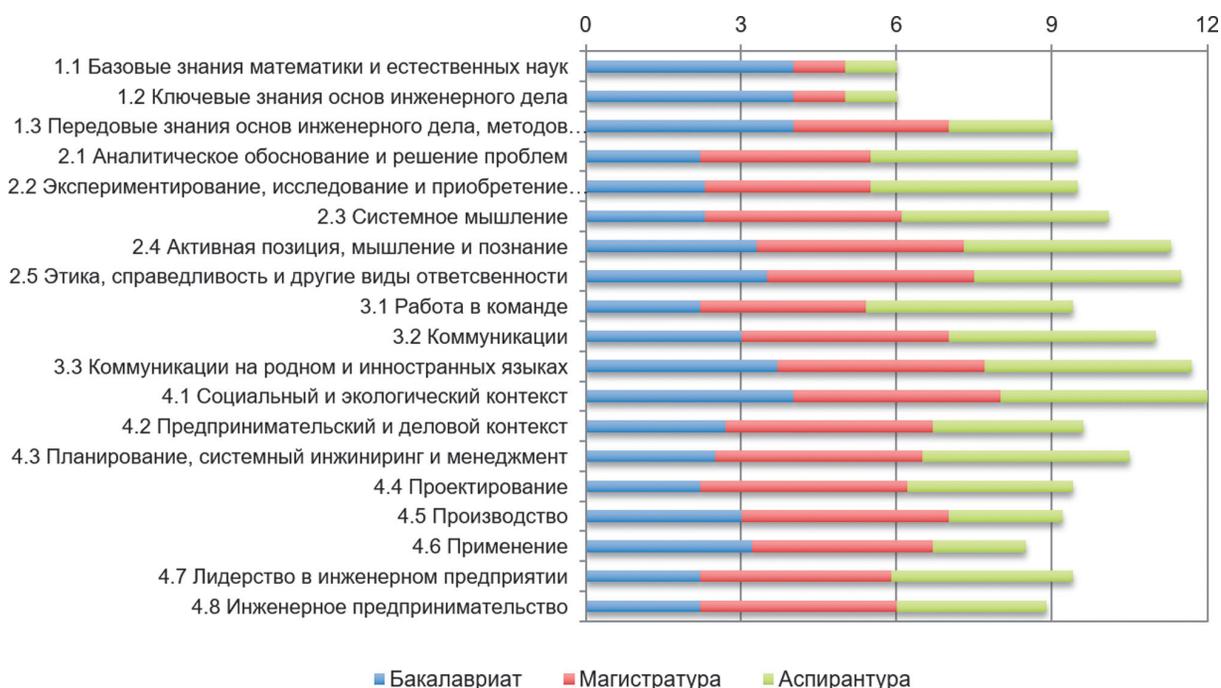


Рис. 1. Степень актуальности разделов CDIO Syllabus v2 (по 4-балльной шкале Skoltech Learning Outcomes Framework) для проектирования уровней программ инженерного образования

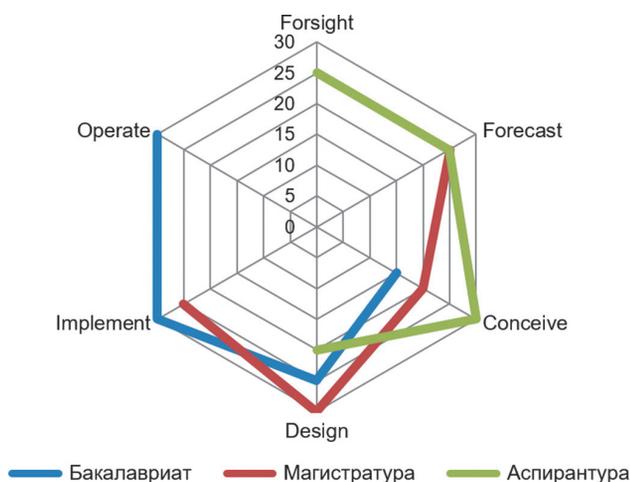


Рис. 2. Ориентация результатов обучения (в процентах) по программам бакалавриата, магистратуры и аспирантуры по этапам комплексной, инновационной и исследовательской инженерной деятельности

дание системы индивидуальных и командных проектов (включая выпускную квалификационную работу), обеспечивающей приобретение учащимися личностных, межличностных и профессиональных компетенций, позволяющих будущему специалисту создавать и внедрять различные инновационные продукты и системы (рис. 4) [8].

Правильное формирование целей, задач и содержания проектов наряду с эффективной модернизацией учебного плана и рабочих программ дисциплин — действенный механизм достижения нового результата,

развития творческих и лидерских качеств современного инженера: критического мышления и способности решения неструктурированных проблем, логического и системного мышления, проектного мышления (инжиниринга), коммуникативности и сотрудничества, творчества, воображения и креативности, практического опыта и ответственности, глобального мышления; инициативы и активности [9].

В рамках первого года обучения предусмотрено выполнение четырех проектов. В первом семестре заявлены командная stem-игра «Инженерный кластер» и командный общественно-социальный проект (численность студентов в командах — от 3 до 5 человек). «Инженерный кластер» (разработчик — Московский политехнический университет) представляет собой игровой турнир, предполагающий создание инженерно-производственной компании (ИПК), проектирующей высокотехнологичные продукты в виртуальной среде в рамках заочного этапа и изготавливающей физические устройства заданного назначения на очном этапе (рис. 5). Изобретение продуктов требует решения междисциплинарных задач по математике, физике, химии, информатике и начертательной геометрии, с ограничениями в виде выделяемого для каждого заказа бюджета. Оценка качества продукта определяет, насколько оптимально решена задача, в какой мере будет удовлетворен заказчик, и влияет на итоговый результат всего турнира.

Реализация общественно-социальных проектов осуществляется в рамках дисциплин «Основы деловых отношений» и «Основы профессиональных коммуни-

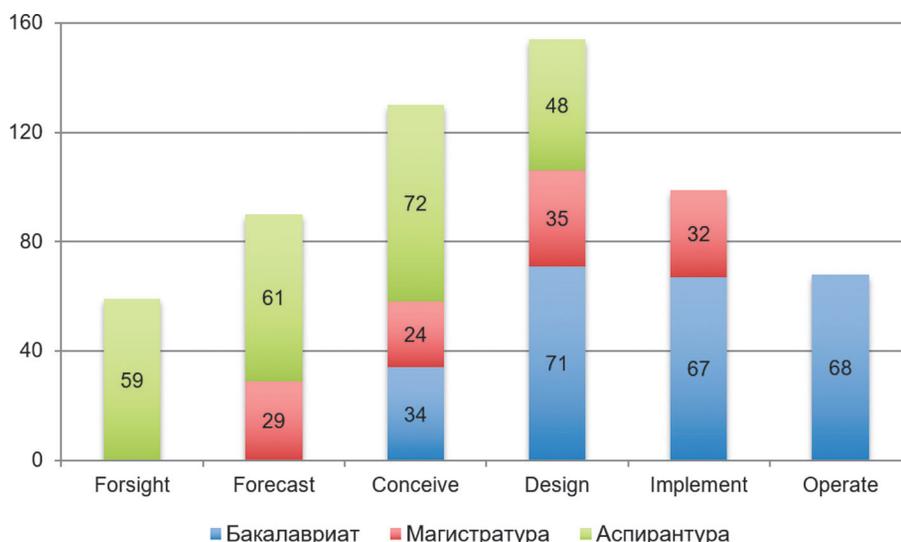


Рис. 3. Вклад модулей (в зачетных единицах) программ подготовки бакалавров, магистров и аспирантов в результаты обучения

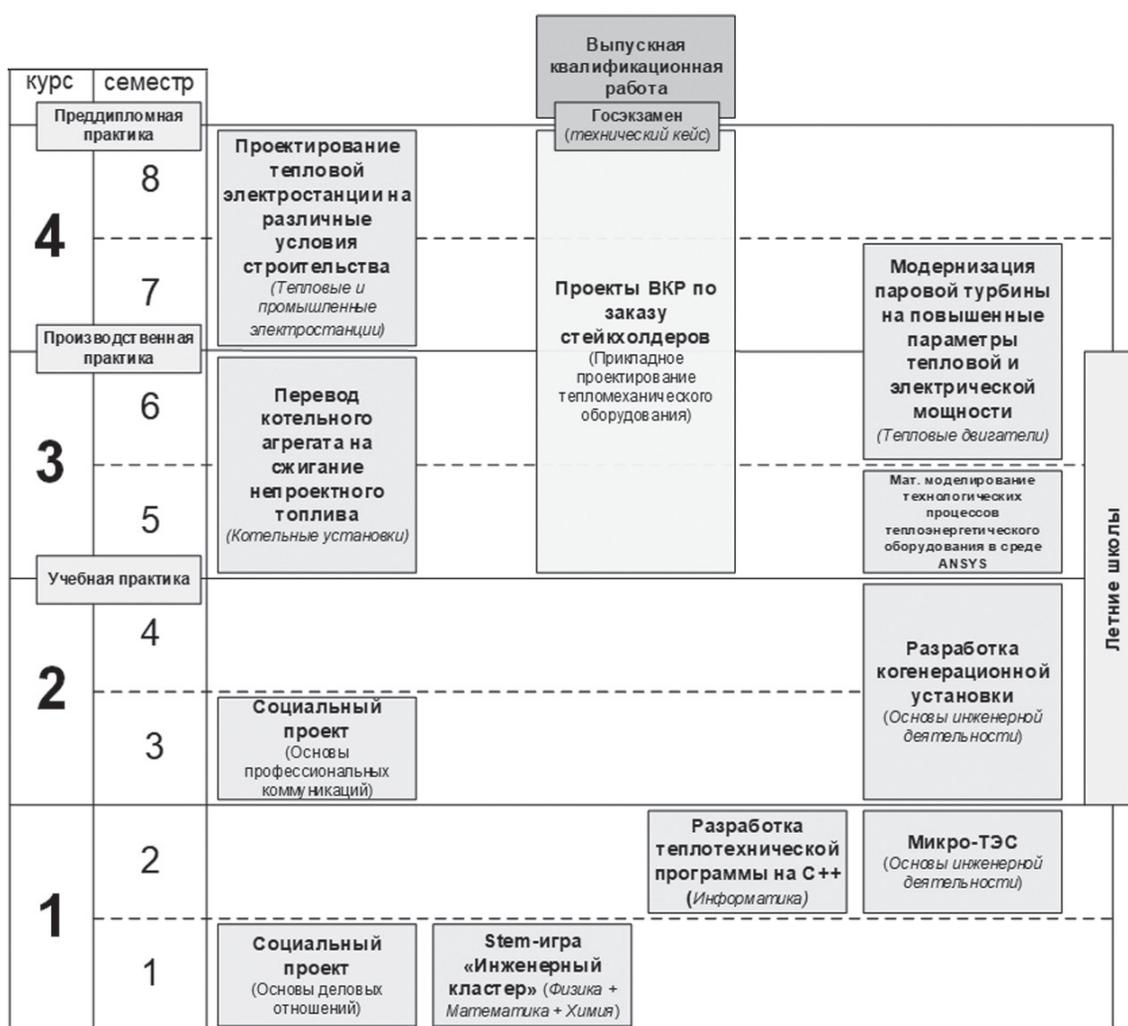


Рис. 4. Концепция проектной деятельности, используемая при организации учебного процесса бакалавров-теплоэнергетиков СФУ в технологии CDIO



Рис. 5. Очный этап stem-игры «Инженерный кластер»: создание и испытание аэроподъемника

каций» в течение первого и второго годов обучения. Перечень и содержание данных проектов преследуют своей целью развитие ряда личностных и межличностных навыков, способствующих дальнейшей профессиональной деятельности: этического поведения и надежности в поступках, социально-психологических навыков, включая уверенность в себе и позитивную точку зрения, готовности взять на себя ответственность, настойчивости, уважения к другим, здравого смысла, эффективного общения, включая отстаивание своих идей и убеждение других, сотрудничества, включая лидерские навыки, партнерство и достижения согласия, изобретательности и способности к самостоятельному образованию, внутри- и междисциплинарного (системного) мышления, творческого потенциала, эмпатии (сопереживания) и социально ответственности, осведомленности о глобальных проблемах человечества.

Следует отметить, что на старте общественно значимых проектов студенческим командам предлагаются варианты заданий, стейкхолдерами в качестве которых выступают выпускающая кафедра (проекты, связанные с профориентацией школьников), университет (адаптационные, творческие или спортивные мероприятия), либо работодатель (организация и проведение профес-

сионального посвящения или совместная волонтерская работа с молодежными советами энергетических предприятий) (рис. 6).

Финальным проектом первого года обучения при подготовке бакалавров-теплоэнергетиков стал индивидуальный инженерный проект «Микро-ТЭС», в рамках которого каждый студент-первокурсник реализовывал этапы жизненного цикла миниатюрной тепловой электростанции, работающей по циклу Ренкина: расчет и 3D-проектирование, изготовление элементов и монтаж устройства, испытание и наладку режимов работы изделия (рис. 7). Реализация проекта проходила при участии преподавателей-наставников в специализированных мастерских вуза на профессиональном оборудовании с использованием материалов, приобретаемых за счет средств энергетических предприятий-партнеров.

Данный проект реализует несколько важных методических и профессиональных задач: изучение принципов трансформации химической энергии органического топлива (природного газа) в электрическую и работы тепловой электростанции, знакомство с теплофизическими свойствами воды и водяного пара, а также принципом работы цикла Ренкина и природой тепловых потерь генерирующей установки, освоение упрощенной методики теплового расчета параметров паросилового цикла и его основных элементов, усвоение принципов и методов конструирования элементов (паровых котла и турбины, конденсатора пара и электрогенератора).

Следует отметить, что конструирование основных элементов энергетической установки идет через интеграцию с такими дисциплинами как «Основы инженерной деятельности», «Информатика» и «Инженерная графика в САД-средах» и носит вариативный характер.

Итоги работы над проектом в течение второго семестра подводятся на соревнованиях, в которых каждый участник демонстрирует работоспособность установки с фиксацией значений расхода затраченного топлива и вырабатываемой мощности. Все результаты ранжируются по техническим показателям эффектив-



а



б

Рис. 6 – Примеры реализации социальных профориентационных проектов студентов-первокурсников:

а — демонстрационные испытания проекта «ВелоЭнергоМетр» для профориентации; б — профориентационный квест на кафедре ТЭС СФУ со школьниками энергокласса

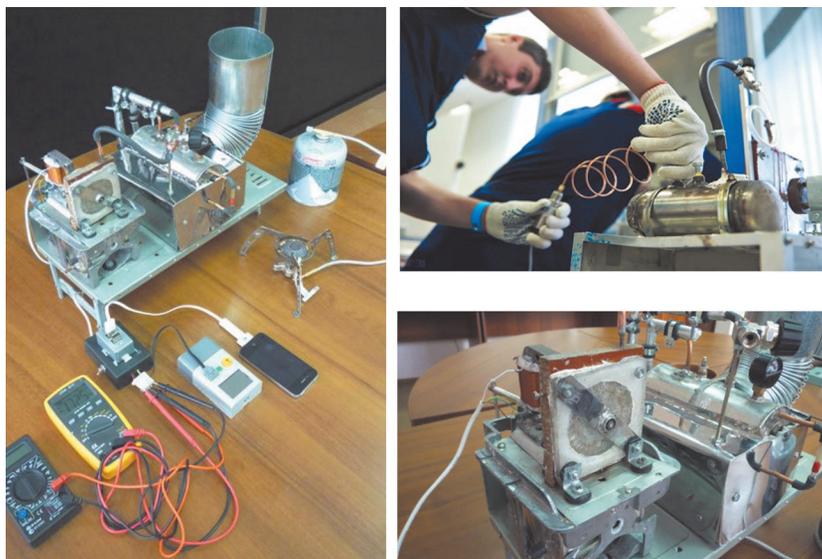


Рис. 7. Опытный образец «Микро-ТЭС»

ности работы установок, и занятое студентом место используется для формирования итоговой оценки, также учитывающей качество проектно-сметной документации, внешний вид и оригинальность конструкции, качество ответов на вопросы экспертной комиссии (рис. 8).

На втором году обучения бакалавров-теплоэнергетиков появляются командные проекты, реализуемые в течение всего года, направленные на создание различного рода генерирующих установок (тепловой и/или электрической энергии, включая когенерацию и тригенерацию). Подобная формулировка задачи позволяет органично сочетать элементы опережающего обучения и полученные знания в рамках различных естественнонаучных и общетехнических дисциплин: основы инженерной деятельности, информатику, инженерную и компьютерную графику, физику, математику, механику, материаловедение, термодинамику, те-

пломассообмен, гидрогазодинамику.

К числу основных вариантов генерирующих установок относят: реализацию цикла Ренкина с различными комбинациями тепловых двигателей (паровые расширительные агрегаты объемного типа, паровые роторные (роторно-лопастные) агрегаты, турбины Scroll-expander) и теплоносителей (органический цикл Ренкина), комбинации традиционных и возобновляемых источников энергии (ветро-солнечно-дизельные установки, тепловые насосы, газогенерирующие установки на твердом органическом топливе), включая гибридные схемы.

Выполнение проекта предусматривает тщательную проработку технического задания, предварительный технико-экономический анализ нескольких альтернативных вариантов, выполнение основных этапов проектирования (аванпроект, эскизный и технический проекты, оформление в упрощенном виде рабочей документации) с 3D-визуализацией технического решения и оценкой удельных энергетических характеристик и себестоимости вырабатываемой энергии, формирование проектно-сметной документации. Примеры реализованных проектов даны на рис. 9.

При использовании проектного подхода принципиально меняются роль и содержание учебной и производственной практик. Наряду с задачей изучения структуры предприятия, состава основного и вспомогательного оборудования, технологических схем каждому студенту ставится задача поиска актуальной проектной идеи, которая затем должна быть трансформирована в выпускную квалификационную работу (ВКР). Фактически для большинства студентов выполнение ВКР начинается на третьем курсе и протекает в течение двух оставшихся лет обучения. Часть тем проектов второго года обучения, имеющих высокую степень коммерциализации, «перетекают» в ВКР, часть тем инновационных ВКР формируются на осно-



Рис. 8. Процесс публичной защиты курсового проекта «Микро-ТЭС»



Рис. 9. Примеры реализованных проектов генерирующих установок:

a — генерирующая установка на основе органического цикла Ренкина 1,2 кВт; *б* — ветро-солнечно-дизельная генерирующая установка 600 кВт

ве научно-исследовательской работы кафедры, которая в таком случае выступает стейкхолдером, а остальная часть тем ВКР создается различными энергетическими предприятиями и связана с проектированием новых объектов, модернизацией и реконструкцией существующего теплоэнергетического оборудования. Темы ВКР носят как индивидуальный, так и групповой комплексный междисциплинарный характер. Для выполнения инженерных проектов с выходом на ВКР на третьем и четвертом курсах в учебном плане предусмотрена дисциплина «Проектирование тепломеханического оборудования» в объеме шести часов в неделю с выделением в расписании занятий проектного дня, когда у студентов имеется возможность выполнения прикладного проекта непосредственно на предприятии под руководством профессиональных наставников.

Параллельно с работой над прикладным проектом, определяемым темой будущей ВКР, в течение третьего и четвертого года обучения для формирования базовых профессиональных знаний и навыков последовательно по сквозной модели реализуются четыре курсовых проекта, завершающихся созданием цифровых прототипов выбранных технических решений: «Моделирование теплоэнергетических процессов и установок», «Котельные установки», «Тепловые двигатели» и «Тепловые и промышленные электростанции».

Курсовая работа по моделированию теплоэнергети-

ческих процессов и установок предусматривает моделирование студентами процессов аэродинамики, сложного теплообмена и горения органического топлива в топочной камере котельного агрегата средствами трехмерного численного моделирования CFD Simulation: ANSYS Fluent. Пример результатов компьютерного моделирования топочного процесса энергетического парового котла представлен на рис. 10.

Параллельно с численным моделированием топочных процессов студенты выполняют курсовой проект «Котельные установки», в рамках которого реализуется комплексный проект перевода энергетического котельного агрегата с естественной циркуляцией на сжигание непроектного топлива и нестандартные режимные параметры. В ходе работы над ним студенты осваивают нормативные методики теплового расчета котельного агрегата и системы пылеприготовления, аэродинамического расчета газового и воздушного трактов котла и гидравлический расчет контуров естественной циркуляции. Отличительные особенности проекта — многовариантный выбор и оптимизация технических решений задач, возникающих по ходу поверочных и конструкторских расчетов в среде MathCAD, для чего обязательным условием является компьютерный расчет отдельных элементов и котельного агрегата в целом. Результат проектирования котельного агрегата представляется в виде трехмерной модели, выполнен-

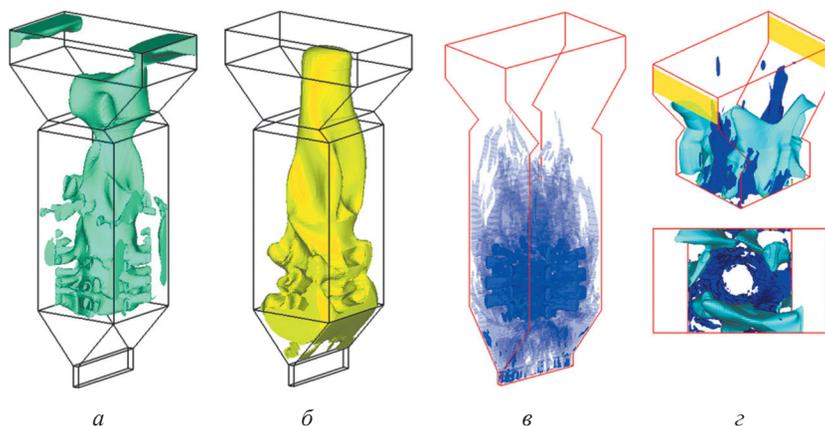


Рис. 10. Результаты численного моделирования топочных процессов котельного агрегата П-67 Березовской ГРЭС:

a, б — изоповерхности скорости (15 м/с) и температуры (1200 °С) газа; *в* — расчет степени выгорания пылевидного твердого топлива; *г* — потоки третичного дутья и недогоревших угольных частиц

ной в конструкторско-технологическом графическом пакете SolidWorks с широкими возможностями интерпретации полученных результатов (рис. 11).

Аналогичный принцип реализован при выполнении курсовых проектов «Тепловые двигатели (паровые и газовые турбины)» и «Промышленные и тепловые электростанции» (рис. 12). Все курсовые имеют сквозной характер и связаны между собой техническими и технологическими параметрами в виде комплексного технического задания, а у части студентов трансформируются в выпускную квалификационную работу.

Курсовые проекты защищаются публично с привлечением специалистов-экспертов энергетических предприятий. Следует отметить, что реализация указанного проектно-ориентированного подхода возможна только при тотальном внедрении в учебный процесс современных компьютерных и информационных технологий.

На заключительном этапе обучения студенты в рамках государственной итоговой аттестации в формате технического кейса сдают государственный экза-

мен, содержание которого предусматривает междисциплинарный характер основных профилирующих дисциплин: котельных установок, паровых и газовых турбин, тепловых и промышленных электростанций, водоподготовки, охраны окружающей среды, экономики энергетического производства (рис. 13).

Существенная модернизация учебного процесса стала возможна только при активном участии индустриальных партнеров — крупных энергетических предприятий, отраслевых лидеров, заинтересованных в подготовке высокопрофессиональных кадров. К числу предприятий, принимающих активное и непосредственное участие в продвижении эксперимента, относятся ПАО «Юнипро», ООО «Сибирская генерирующая компания», ООО «Газпром энергохолдинг» (ОГК-2), компания «Danfoss», инженеринговая компания «Powerz» и ряд других федеральных и региональных энергетических компаний. По мере развития проекта они существенно изменили отношение к содержанию и организации учебного процесса тепло-

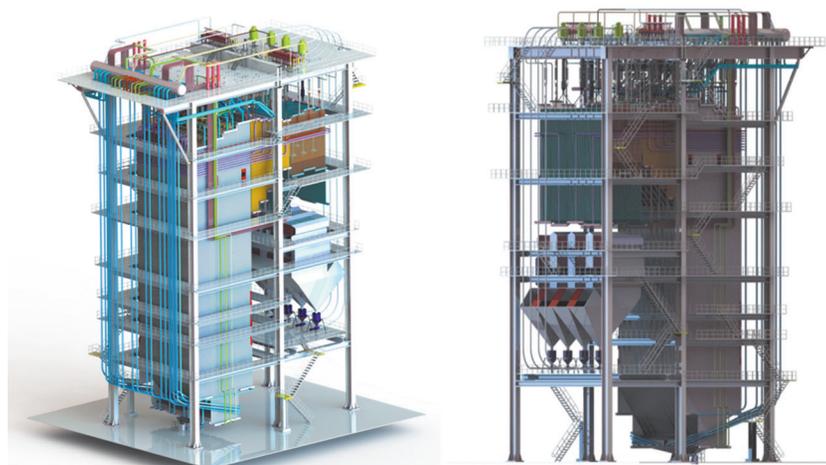
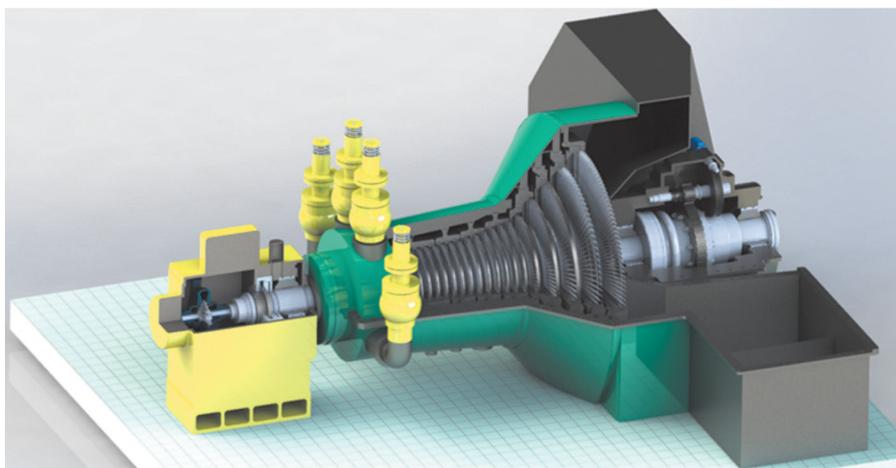


Рис. 11. Результаты трехмерного проектирования котельного агрегата БК3-500-140



а



б

Рис. 12. Трехмерные модели деталей паровой турбины К-50-7,5:
а — ротор и фрагмент диафрагмы паровой турбины; б — разрез паровой турбины

Государственная итоговая аттестация 2018
13.03.01 — теплоэнергетика и теплотехника
Характеристика ТЭК Красноярского края

1. Норильская ТЭЦ-5
2. Норильская ТЭЦ-2
3. Норильская ТЭЦ-1
4. Усть-Язвской ГЭС, 5. Курьинская ГЭС
6. Вакханская ГЭС;
7. Борзинская ГЭС;
8. ТЭЦ Анжурского гидрометаллургического комбината;
9. Красноярская ГЭС;
10. Баратаевская ГЭС-4;
11. Красноярская ТЭЦ-3; 11. Красноярская ТЭЦ-2;
12. Красноярская ТЭЦ-1; 14. Красноярская ГЭС;
15. Минусинская ГЭС-2;
16. Канская ТЭЦ;
17. Минусинская ТЭЦ;
18. Майская ГЭС;
19. Саяно-Шушенская ГЭС

Карта электростанций и ЛЭП Красноярского края

Карта тарифов на электроэнергию в Красноярском крае

Карта тарифов на тепловую энергию Красноярского края

Государственная итоговая аттестация 2018
13.03.01 — теплоэнергетика и теплотехника
Описание объекта

Структура энергопотребления города Лесосибирск

№ п/п	Объект инфраструктуры	Тепловая нагрузка (Вт, Гкал/ч)	Расход пара на производство пара (т/ч)	Электропотребление (кВт, МВт)
1.	Магистраль А	67,5	-	54
2.	Магистраль Чулушка	55	-	21
3.	ЛЭП-1	115	65	40
4.	ЛЭП	18	12	10
5.	Сургуть	29	-	23
6.	Речной порт	12	-	12
7.	Сибирский лес	15	6	8
8.	Сельскохозяйственный завод	5	10	14
9.	Минусинский лесопильный завод	25	42	16
10.	Прочие	12	13	25

Структура перспективного энергопотребления города Лесосибирск до 2030 года

№ п/п	Объект инфраструктуры	Тепловая нагрузка (Вт, Гкал/ч)	Расход пара на производственные нужды (т/ч)	Электропотребление (кВт, МВт)
1.	ЛЭП-2	180	140	60
2.	Индустриально-бытовой комплекс	200	315	80
3.	Фабричный завод	100	60	40
4.	Мобильная фабрика	140	40	70
5.	Объекты ЖКХ	240	-	80

Схема размещения теплоснабжателей города Лесосибирска (зеленым цветом выделены объекты перспективного инвестиционного развития городов до 2030 года)

Масштаб 1:500 000 (в 1 см 5 км)

Рис. 13. Задание на государственный экзамен в виде технического кейса «Проект модернизации системы энергообеспечения г. Лесосибирск Красноярского края»

энергетиков в СФУ, что выражается в реализации не только традиционных форм взаимодействия (целевой подготовке, именных стипендиях, предоставлении мест прохождения практик, участии в итоговой аттестации выпускников), но также и неформальных соглашениях о стратегическом партнерстве. В частности, повышение эффективности стратегического партнерства выражается в развитии материальной и лабораторной баз кафедры, создании новых рабочих пространств, софинансировании проектной деятельности студен-

тов, формировании тем, сопровождении и реализации проектов, совместной профорientационной деятельности (создании и сопровождении специальных энергетических классов в средних школах г. Шарыпово, г. Назарово, г. Минусинск, г. Абакан с целью повышения уровня знаний естественнонаучных дисциплин, введения в энергетику и приобретения ранних навыков проектной работы), участии студентов в деятельности советов молодежи компаний-партнеров кафедры, а также различных спортивных, творческих и корпоративных

мероприятиях энергетических компаний.

Комплексная модернизация учебного процесса отражена в интегрированном учебном плане, графическая интерпретация которого представлена на рис. 14.

Особое внимание в данном учебном плане отведено дисциплинам, в рамках которых студент овладевает навыками проектно-внедренческой деятельности: «Основы инженерной деятельности» (первый и второй год обучения) и «Проектирование тепломеханического оборудования» (третий и четвертый год обучения), «Основы деловых отношений» «Основы профессиональных коммуникаций» и ряд вариативных дисциплин «Решение технических кейсов», «Управление проектами», «Системная инженерия», «Управление изменениями». Это привело к существенной модернизации структуры и содержания образовательной программы, включая интеграцию планируемых результатов обучения CDIO (CDIO Syllabus) и дисциплинарных навыков, внедрение активных методов обучения и привлечение педагогов-практиков.

Очевидно, что реализация проектно-ориентированной технологии обучения в вузе потребовала существенного совершенствования рабочего пространства, обеспечивающего выполнение лабораторных работ,

инженерных проектов и, в целом, образовательной деятельности направления подготовки на «продвинутом» уровне. Лабораторное оборудование было обновлено и дополнено таким образом, чтобы выполнение всех работ носило индивидуальный характер (рис. 15). Сформирована новая испытательная лаборатория угольных и энергетических технологий, концептуальное содержание которой изображено на рис. 16.

Испытательная лаборатория включает углеподготовку и анализ технических и теплофизических характеристик энергетического топлива, газогенерирующую установку на твердом топливе (угле, древесине, торфе, твердых бытовых отходах), огневой испытательный стенд для отработки технологий экологически чистых технологий горелочных и топочных устройств, инновационные системы газоочистки, водогрейные и паровые угольные котлы малой мощности для нужд ЖКХ с утилизацией тепла уходящих дымовых газов с помощью теплового насоса, двигателя Стирлинга и органического цикла Ренкина.

Данные установки функционируют в комплексной инженерной системе отопления, вентиляции и горячего водоснабжения с автоматической системой диспетчеризации процессов производства и потребления

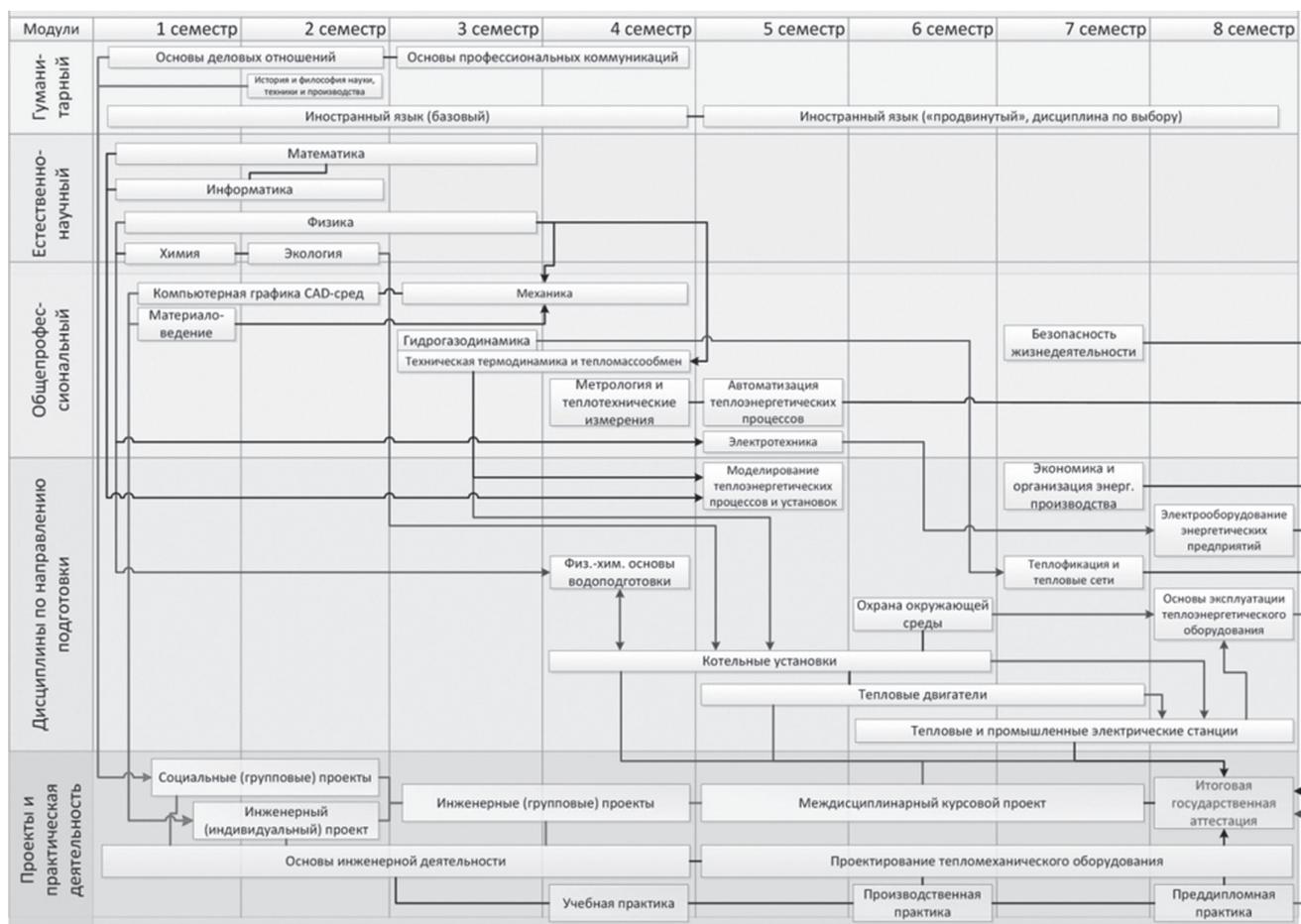


Рис. 14. Интегрированный учебный план направления подготовки бакалавров по направлению 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника» (CDIO)

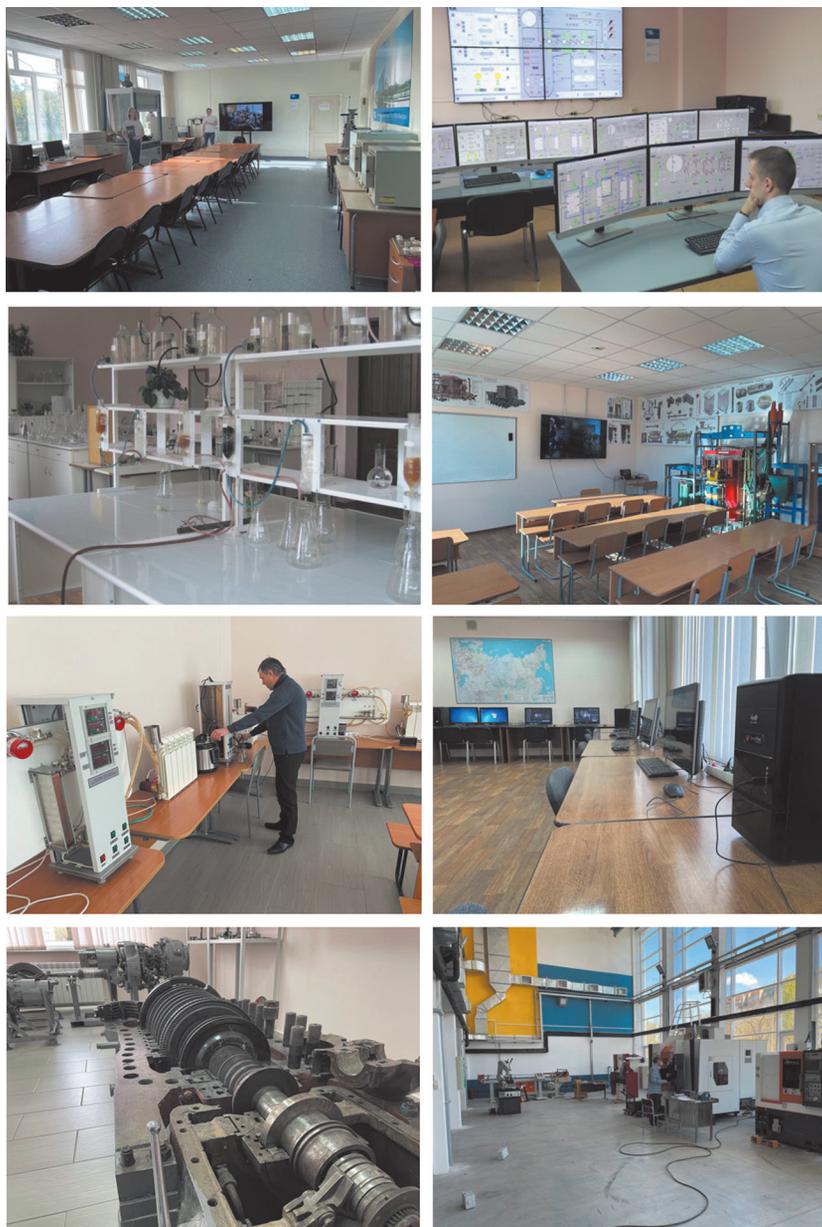


Рис. 15. Оснащение учебных лабораторий и рабочих мест студентов (лаборатории ПАО «Юнипро»)

тепловой и электрической энергии.

В лаборатории предполагается создание и отработка студентами разных образовательных уровней инновационных технологий гибридных энергетических установок с различным коэффициентом бинарности на основе сочетания угольных технологий, традиционных тепловых двигателей (осевых паровых турбин, паровинтовых машин, роторно-лопастных и scroll-expander тепловых двигателей) и возобновляемых источников энергии, в том числе солнечных, ветряных и гидравлических установок с организацией схемы выдачи электрической мощности на собственные нужды. Дизайн-проект новой лаборатории представлен на рис. 17.

Лабораторные работы по ключевым дисциплинам,

наряду с выполнением их в обновленных лабораториях вуза, проводятся в обязательном порядке на энергетических предприятиях посредством решения реальных производственных задач (рис. 18).

Отличительная особенность разработанного учебного плана при внедрении стандартов CDIO, наряду с выделением значительной доли трудоемкости проектной деятельности, — четырехлетнее изучение английского языка (базового, делового, профессионального, отраслевого). Практическая реализация данной компетенции осуществляется в процессе обучения участием лучших студентов в работе ежегодной Академии CDIO и летних международных школах (рис. 19).

Новая образовательная модель потребовала модернизации функционально-организационной структуры

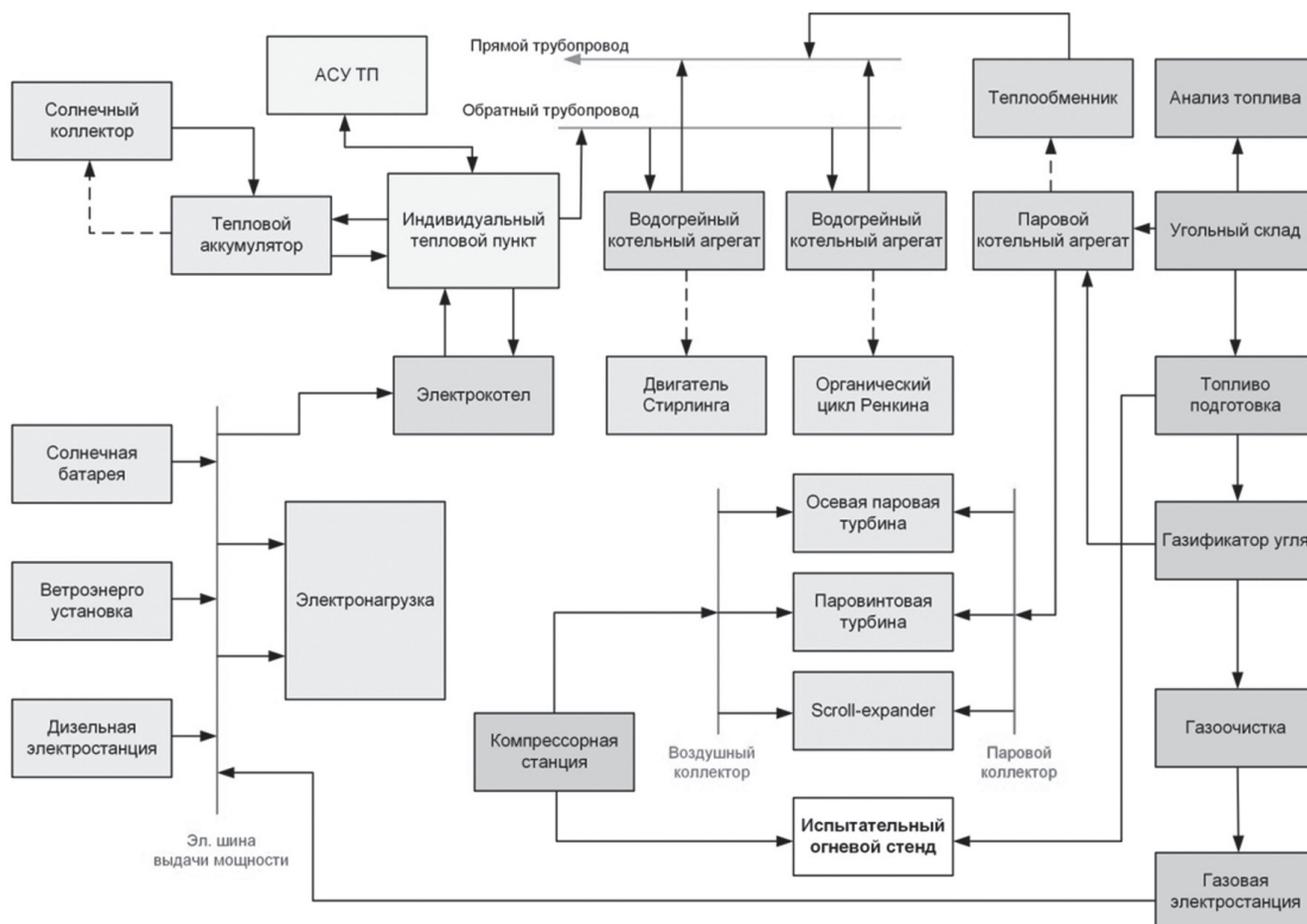


Рис. 16. Испытательная лаборатория угольных и энергетических технологий



Рис. 17. Дизайн-макет испытательной лаборатории угольных и энергетических технологий

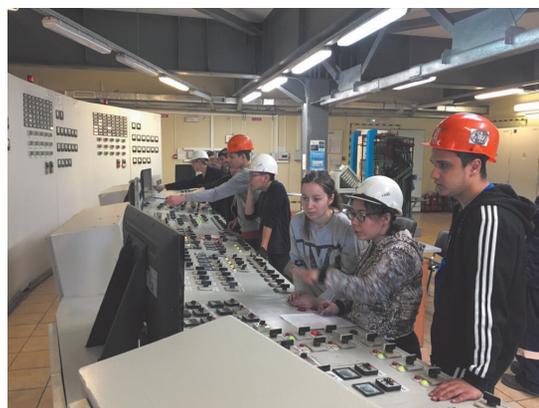


Рис. 18. Проведение лабораторных работ по котельным установкам на Красноярской ТЭЦ-1

кафедры в части перехода на модель управления образовательной программой [10], что позволило обеспечить выполнение основных параметров эффективности проекта, а также оптимизировать человеческие, финансовые и материальные ресурсы (рис. 20). В такой постановке новая структура образовательной программы регламентирует системно реализацию и контроль уникальных обязательных процессов (образовательной и международной деятельности,

НИОКР, учебно-воспитательной работы, работы со стратегическими партнерами и профориентационной деятельности).

Следует отметить, что по окончании бакалавриата до 30% выпускников на конкурсной основе поступают на магистерскую образовательную программу «Энергоэффективные технологии производства тепловой и электрической энергии», реализуемую на кафедре ТЭС СФУ.

Критериями отбора служат результаты специаль-

ного собеседования, цель которого — проверка имеющихся знаний по профильным дисциплинам, мотивации к научной и инновационной деятельности, а также оценка общих когнитивных способностей, аналитических и критических навыков мышления, приобретенных абитуриентом за период предварительного обучения. Обязательное условие для участия в конкурсном отборе — наличие проектной идеи и имеющиеся по ней научный и прикладной заделы.

Изображенная диаграмма, представленная на рис. 2, демонстрирует ориентацию результатов (CDIO Syllabus) освоения двухлетней программы магистратуры (120 кредитов ECTS) инновационной инженерной деятельности. Из рис. 2 следует, что 25% результатов обучения образовательной программы ориентированы на подготовку выпускников к работе на этапе прогнозирования (анализ рынка и изучение потребностей основных заинтересованных сторон, оценка рисков и неопределенностей, определение наиболее востребованных и конкурентоспособных технических объектов, процессов и систем), 20% — на работу по планированию инновационных разработок (техничко-экономический анализ, моделирование, создание ресурсов для проектирования), 30% — на проектирование инновационной продукции с учетом жестких технических, экономических, экологических и других ограничений и 25% — на участие в производстве инновационных технических объектов, процессов и систем (управление производством, техникий и технологический контроль). Из данных рис. 3 следует, что все модули программы вносят вклад в достижение результатов обучения, необходимых для подготовки выпускников-магистров, однако главную роль в их подготовке играют научные исследования и практика [11].

Подобная организация образовательной программы обеспечивает формирование единой системы согласованных компетенций выпускников, а с помощью оптимального распределения компонентов образовательного и научно-исследовательского блоков между первой и второй ступенями обучения достигается логичная сопряженная последовательность формирования целевых компетенций выпускников программы [12].

Выпускники магистерской программы ориентированы на инновационную инженерную деятельность, направленную на разработку и создание техники и технологий, обеспечивающих новый социальный и(или) экономический эффект. Инновационная инженерная деятельность является междисциплинарной, что требует глубоких фундаментальных и прикладных знаний, основана на анализе и синтезе технических объектов, систем и технологических процессов с использованием математических моделей высокого уровня [13].

К числу основных компетенций магистров, обучающихся по данной образовательной программе, соответствующих национальным и международным стандартам [14, 15], относят: применение фундаментальных знаний (глубоких математических, естественнонаучных, гуманитарных, социально-экономических и технических знаний в междисциплинарном контексте для

решения инновационных инженерных проблем), соответствующих направлению подготовки, инженерный анализ (постановку и решение инновационных задач инженерного анализа, соответствующих направлению подготовки) с использованием глубоких фундаментальных и прикладных знаний, аналитических методов и сложных моделей, инженерное проектирование (выполнение инновационных инженерных проектов технических объектов, систем и технологических процессов, соответствующих направлению подготовки), с учетом жестких экономических, экологических, социальных и других ограничений, исследования (проведение изысканий при решении инновационных инженерных проблем, соответствующих направлению подготовки, включая постановку сложного эксперимента, формулировку выводов в условиях неоднозначности) с применением глубоких знаний и оригинальных методов, инженерная практика (создание и применение необходимых ресурсов и методов, включая прогнозирование и моделирование, современных технических и IT-средств для решения инновационных инженерных проблем, соответствующих направлению подготовки) с учетом жестких ограничений, менеджмент (использование знаний в области проектного и финансового менеджмента для управления инновационной инженерной деятельностью, соответствующей направлению подготовки).

В этой связи формирование компетенций выпускников-магистров в образовательной программе достигается формированием и реализацией сбалансированных требований к выбору темы, содержанию, уровню коммерциализации, новизны и практической значимости результатов научных и прикладных исследований. К числу основных направлений работы относятся: разработка технических средств подготовки персонала энергетики и специализированного программного обеспечения, прикладное проектирование на основе типовых расчетов и математического моделирования теплоэнергетических процессов и устройств (в среде Ansys Fluent), создание технологий по повышению эффективности энергетического использования органических топлив, технико-экономическое обоснование и разработка проектов строительства, реконструкции и модернизации теплоэнергетического оборудования (комплексное энергообеспечение объектов ЖКХ), разработка инновационных энергетических технологий, проектирование систем отопления, горячего водоснабжения, вентиляции и кондиционирования объектов ЖКХ с использованием БИМ-технологий. Примеры реализации выпускных квалификационных работ магистров представлены на рис. 21 — 27.

Имеющийся опыт внедрения многоуровневой модели проектно-ориентированной технологии подготовки теплоэнергетиков в Сибирском федеральном университете получил положительную экспертную оценку у стратегических партнеров (работодателей), принимающих активное участие в проведении проектных недель и государственной итоговой аттестации, а также позволил повысить ряд показателей эффективности об-



Рис. 21. Когенерационная энергетическая установка мощностью 1,2 кВт на основе газификации твердого органического угля

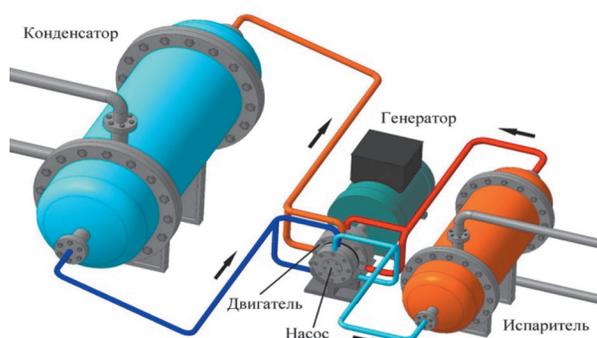


Рис. 22. Энергоустановка для утилизации низкопотенциального тепла на базе роторно-лопастных тепловых двигателей

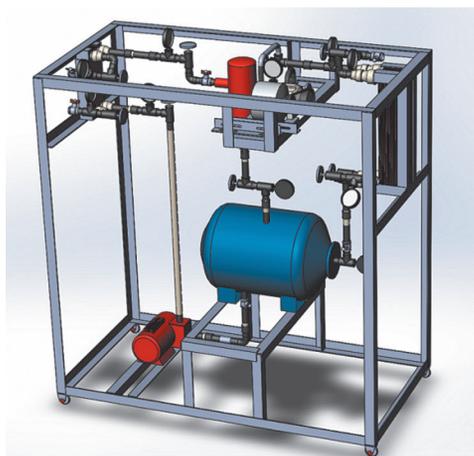


Рис. 23. Энергоустановка для утилизации низкопотенциального тепла на основе органического цикла Ренкина

разовательного подразделения. Так, по итогам 2018 г. образовательные программы по подготовке бакалавров и магистров теплоэнергетиков, реализуемых на кафедре тепловых электрических станций СФУ вошли в число лучших образовательных программ РФ по итогам экспертного голосования в рамках всероссийского проекта «Лучшие образовательные программы инновационной России».

За шесть лет проведения эксперимента (с момента первого набора на программу CDIO в 2014 г.) средний балл ЕГЭ по трем вступительным дисциплинам по-

высился со 182,3 до 212,5 при численности набора в 50 человек. География набора охватила 18 регионов РФ и 5 стран ближнего и дальнего зарубежья, что позволило поднять уровень интернационализации на программе с 1,2 до 8,5%. Сохранность контингента удалось повысить с 53 до 91%. Публикационная активность студентов, а также их участие в конференциях и научно-технических конкурсах различного уровня повысились в три раза.

Ряд студенческих разработок, обладающих высокой степенью коммерциализации, приняли участие в реги-

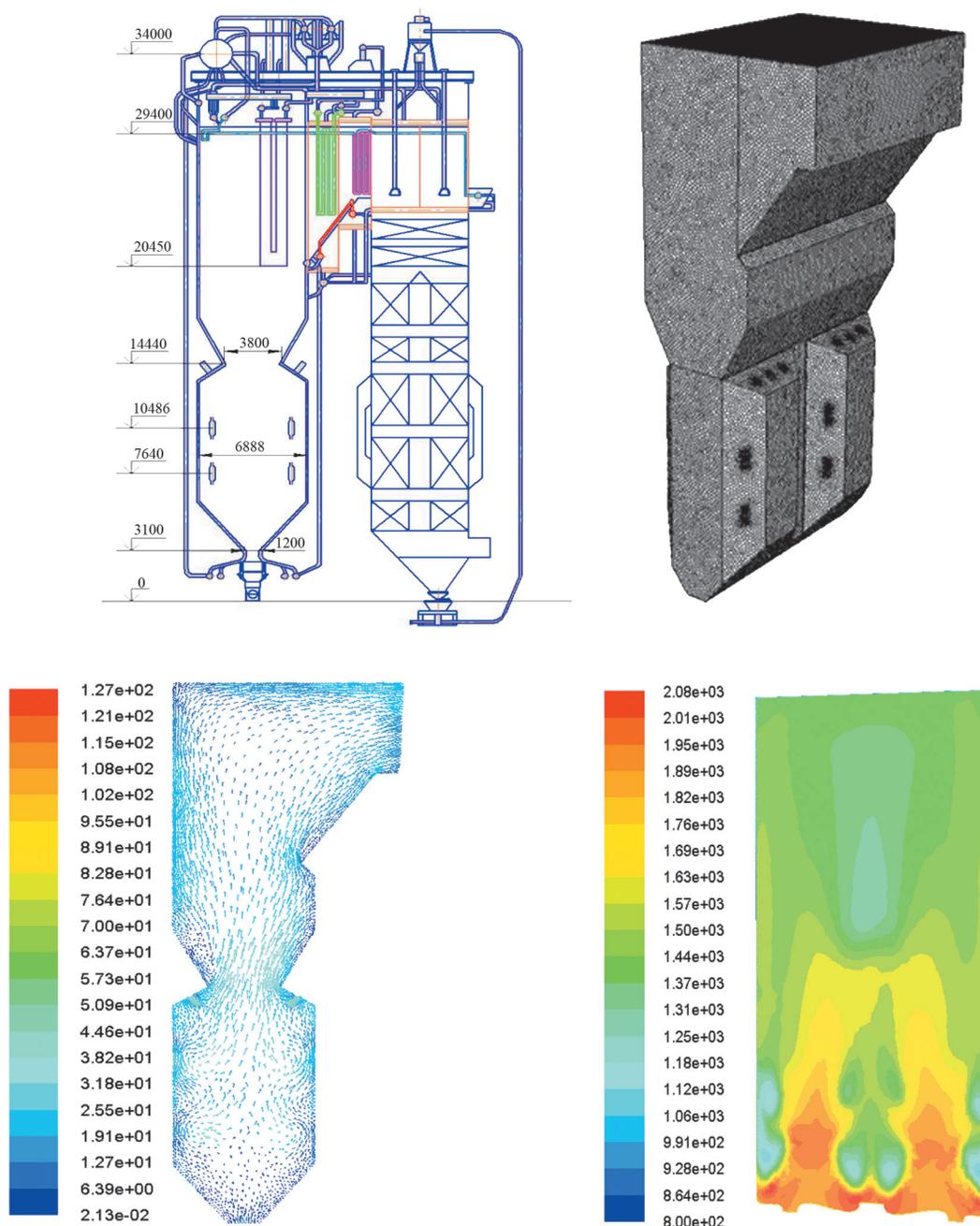


Рис. 24. Проект реконструкции котельного агрегата БКЗ-320-140 Красноярской ТЭЦ-1 с переводом на твердое шлакоудаление

ональных и федеральных конкурсах инновационных молодежных проектов и получили признание и финансовую поддержку на их реализацию в размере более 1 млн. рублей (рис. 28).

Следует отметить риски, сопровождающие внедрение новой образовательной технологии, главными из которых стали: отсутствие требуемой квалификации профессорско-преподавательского и учебно-вспомогательного персонала, заключающееся в недостатке самостоятельного проектного опыта, неудовлетворительная существующая инфраструктура вуза и, соответственно, образовательной программы (кафедры),

необходимость наличия значительно больших управленческих, организационных (на уровне вуза), материальных и финансовых ресурсов.

Итоги реализации проекта по внедрению модели системных изменений многоуровневой проектно-ориентированной подготовки теплоэнергетиков в СФУ позволяют констатировать достижение целого ряда объективных положительных образовательных результатов и рекомендовать представленный подход для практического использования при модернизации инженерного образования как аналогичных, так и других направлений подготовки инженеров в широком поле российского и мирового образовательного пространства.

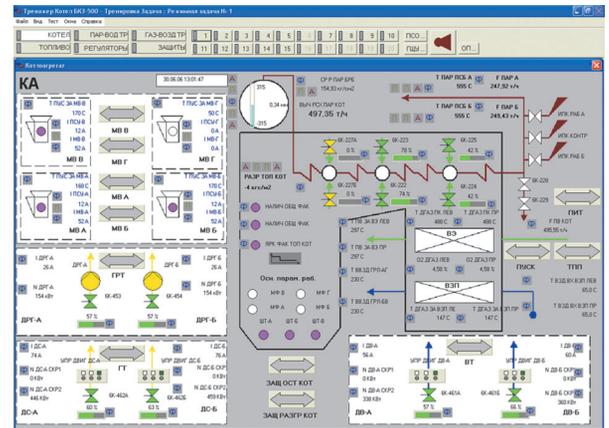
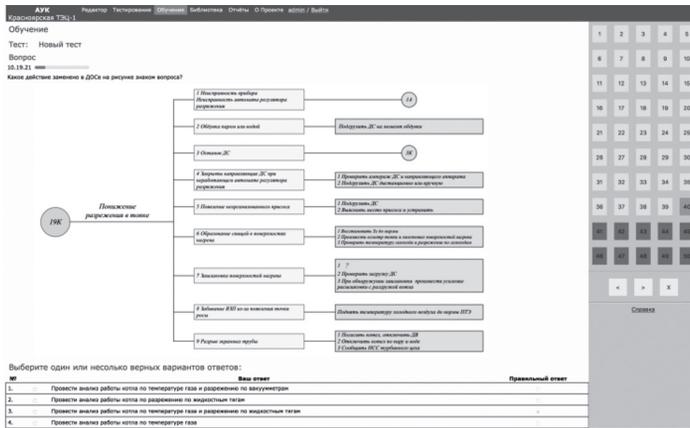


Рис. 25. Корпоративная система подготовки оперативного персонала тепловых электростанций: а — автоматизированная обучающая система; б — тренажер котельного агрегата BK3-500-140 Красноярской ТЭЦ-2

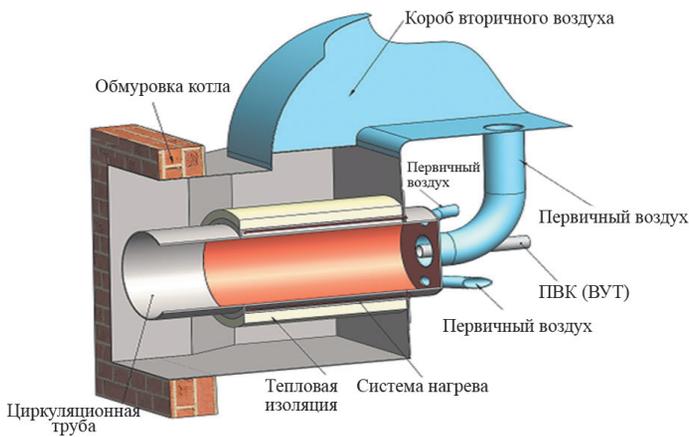


Рис. 26. Система безмазутной растопки паровых котлов BK3-420-140



Рис. 27. Проект комплексного энергообеспечения объектов ЖКХ на основе твердотопливных котельных роботов



Рис. 28. Студенты теплоэнергетики CDIO кафедры ТЭС в числе победителей федерального конкурса инновационных проектов Росмолодежи «Бирюса — 2017»

Литература

References

1. Дульзон А.А. Реформы высшего образования и вузовское сообщество // Инженерное образование. 2017. № 21. С. 8—17.
2. Агамирзян И.Р., Крук Е.А., Прохорова В.Б. Некоторые современные подходы к инженерному образованию // Высшее образование в России. 2017. № 11(217). С. 43—48.
3. Сигов А.С., Сидорин В.В. Требования к инженерам в условиях новой индустриализации и пути их реализации // Инженерное образование. 2012. № 10. С. 80—91.
4. Бойко Е.А. и др. Опыт внедрения всемирной инициативы CDIO в практику подготовки теплоэнергетиков в Сибирском федеральном университете // Инженерное образование. 2017. № 22. С. 81—87.
5. Чучалин А.И. Модернизация трёхуровневого инженерного образования на основе ФГОС 3++ и CDIO++ // Высшее образование в России. 2018. Т. 27. № 4. С. 22—32.
6. Чучалин А.И. О применении подхода CDIO для проектирования уровневых программ инженерного образования // Высшее образование в России. 2016. № 4(200). С. 17—32.
7. Всемирная инициатива CDIO. Стандарты / Пер. с англ. и ред. Чучалина А.И., Петровской Т.С., Кулюкиной Е.С. Томск: Томский политехн. ун-т., 2011.
8. Boiko E.A., Shishmarev P.V., Karabarin D.I., Yanov S.R., Pikalova A.A. Implementing CDIO Project-based Learning and Training of Heat and Power Engineers // J. Physics: Conf. Series. 2017. No. 891. Pp. 3—10.
9. Quist J. e. a. CDIO Based Engineering Design and Optimization Course // Proc. XIII Intern. CDIO Conf. Calgary: University of Calgary, 2017. Pp. 102—118.
10. Клемешев А.П., Кукса И.Ю. Управление образовательными программами как фактор модернизации университета // Высшее образование в России. 2016. № 5(201). С. 10—20.
11. Волкова Г.Л. Непрерывное образование российских инженеров: уровень заинтересованности в стратегии участия // Инженерное образование. 2019. № 25. С. 15—26.

1. Dul'zon A.A. Reformy Vysshego Obrazovaniya i Vuzovskoe Soobshchestvo. Inzhenernoe Obrazovanie. 2017;21:8—17. (in Russian).
2. Agamirzyan I.R., Kruk E.A., Prokhorova V.B. Nekotorye Sovremennye Podkhody k Inzhenernomu Obrazovaniyu. Vysshee Obrazovanie v Rossii. 2017;11(217): 43—48. (in Russian).
3. Sigov A.S., Sidorin V.V. Trebovaniya k Inzheneram v Usloviyakh Novoy Industrializatsii i Puti ikh Realizatsii. Inzhenernoe Obrazovanie. 2012;10:80—91. (in Russian).
4. Boyko E.A. i dr. Opyt Vnedreniya Vsemirnoy Initsiativy CDIO v Praktiku Podgotovki Teploenergetikov v Sibirskom Federal'nom Universitete. Inzhenernoe Obrazovanie. 2017;22:81—87. (in Russian).
5. Chuchalin A.I. Modernizatsiya Trekhurovnevoogo Inzhenernogo Obrazovaniya na Osnove FGOS 3++ i CDIO++. Vysshee Obrazovanie v Rossii. 2018;27;4: 22—32. (in Russian).
6. Chuchalin A.I. O Primenenii Podkhoda CDIO dlya Proektirovaniya Urovnevnykh Programm Inzhenernogo Obrazovaniya. Vysshee Obrazovanie v Rossii. 2016; 4(200):17—32. (in Russian).
7. Vsemirnaya Initsiativa CDIO. Standarty. Per. s Angl. i Red. Chuchalina A.I., Petrovskoy T.S., Kulyukinoy E.S. Tomsk: Tomskiy Politekhn. Un-t., 2011. (in Russian).
8. Boiko E.A., Shishmarev P.V., Karabarin D.I., Yanov S.R., Pikalova A.A. Implementing CDIO Project-based Learning and Training of Heat and Power Engineers. J. Physics: Conf. Series. 2017;891:3—10.
9. Quist J. e. a. CDIO Based Engineering Design and Optimization Course. Proc. XIII Intern. CDIO Conf. Calgary: University of Calgary, 2017:102—118.
10. Klemeshev A.P., Kuksa I.Yu. Upravlenie Obrazovatel'nymi Programmami kak Faktor Modernizatsii Universiteta. Vysshee Obrazovanie v Rossii. 2016;5(201): 10—20. (in Russian).
11. Volkova G.L. Npreryvnoe obrazovanie Rossiyskikh Inzhenerov: Uroven' Zainteresovannosti v Strategii Uchastiya. Inzhenernoe Obrazovanie. 2019;25:15—26. (in Russian).

12. **Сенашенко В.С., Пыхтина Н.А.** Преемственность бакалавриата и магистратуры: некоторые ключевые проблемы // Высшее образование в России. 2017. № 12(218). С. 13—25.

13. **Мотовилов О.В.** Проблемы подготовки кадров в магистратуре // Высшее образование в России. 2016. № 2(198). С. 38—45.

14. **Похолков Ю.П., Толкачева К.К.** Инициатива CDIO и проблемы реализации активных методов обучения в инженерном образовании // Инженерное образование. 2014. № 16. С. 120—125.

15. **Чучалин А.И.** Модернизация инженерного образования на основе международных стандартов CDIO // Инженерное образование. 2014. № 16. С. 14—29.

12. **Senashenko V.S., Pykhtina N.A.** Preemstvennost' Bakalavriata i Magistratury: Nekotorye Klyuchevye Problemy. Vysshee Obrazovanie v Rossii. 2017;12(218): 13—25. (in Russian).

13. **Motovilov O.V.** Problemy Podgotovki Kadrov v Magistrature. Vysshee Obrazovanie v Rossii. 2016;2(198): 38—45. (in Russian).

14. **Pokholkov Yu.P., Tolkacheva K.K.** Initsiativa CDIO i Problemy Realizatsii Aktivnykh Metodov Obucheniya v Inzhenernom Obrazovanii. Inzhenernoe Obrazovanie. 2014;16:120—125. (in Russian).

15. **Chuchalin A.I.** Modernizatsiya Inzhenernogo Obrazovaniya na Osnove Mezhdunarodnykh Standartov CDIO. Inzhenernoe Obrazovanie. 2014;16:14—29. (in Russian).

Сведения об авторах:

Бойко Евгений Анатольевич — доктор технических наук, заведующий кафедрой тепловых электрических станций Политехнического Института Сибирского федерального университета, e-mail: EBoiko@sfu-kras.ru

Шишмарев Павел Викторович — кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций Политехнического Института Сибирского федерального университета, e-mail: pshismarev@sfu-kras.ru

Карабарин Денис Игоревич — кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций Политехнического Института Сибирского федерального университета, e-mail: dkarabarin@sfu-kras.ru

Бобров Алексей Васильевич — кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций Политехнического Института Сибирского федерального университета, e-mail: avbobrov@sfu-kras.ru

Янов Сергей Романович — кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций Политехнического Института Сибирского федерального университета, e-mail: ysr80@mail.ru

Черных Наталья Сергеевна — старший преподаватель кафедры тепловых электрических станций Политехнического Института Сибирского федерального университета, e-mail: dombrovskaya-nat@mail.ru

Пикалова Альбина Александровна — доцент кафедры тепловых электрических станций Политехнического Института Сибирского федерального университета, e-mail: pikalova_albina@mail.ru

Сургутский Денис Викторович — старший преподаватель кафедры тепловых электрических станций Политехнического Института Сибирского федерального университета, e-mail: surgutskiy@inbox.ru

Загородний Игорь Владимирович — ассистент кафедры тепловых электрических станций Политехнического Института Сибирского федерального университета, e-mail: ZagorodniiIV@sibgenco.ru

Information about authors:

Boyko Evgeniy A. — Dr.Sci. (Techn.), Head of Thermal Power Plants Dept., Polytechnic Institute of the Siberian Federal University, e-mail: EBoiko@sfu-kras.ru

Shishmarev Pavel V. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Thermal Power Plants Dept., Polytechnic Institute of the Siberian Federal University, e-mail: pshismarev@sfu-kras.ru

Karabarin Denis I. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Thermal Power Plants Dept., Polytechnic Institute of the Siberian Federal University, e-mail: dkarabarin@sfu-kras.ru

Bobrov Aleksey V. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Thermal Power Plants Dept., Polytechnic Institute of the Siberian Federal University, e-mail: avbobrov@sfu-kras.ru

Yanov Sergey R. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Thermal Power Plants Dept., Polytechnic Institute of the Siberian Federal University, e-mail: ysr80@mail.ru

Chernykh Nataliya S. — Senior Lecturer of Thermal Power Plants Dept., Polytechnic Institute of the Siberian Federal University, e-mail: dombrovskaya-nat@mail.ru

Pikalova Albina A. — Assistant Professor of Thermal Power Plants Dept., Polytechnic Institute of the Siberian Federal University, e-mail: pikalova_albina@mail.ru

Surgutskiy Denis V. — Senior Lecturer of Thermal Power Plants Dept., Polytechnic Institute of the Siberian Federal University, e-mail: surgutskiy@inbox.ru

Zagorodniy Igor V. — Assistant of Thermal Power Plants Dept., Polytechnic Institute of the Siberian Federal University, e-mail: ZagorodniiIV@sibgenco.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 05.07.2021

The article received to the editor: 05.07.2021