

# ОПЫТ ПОДГОТОВКИ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ АТОМНОЙ ОТРАСЛИ В УРАЛЬСКОМ ФЕДЕРАЛЬНОМ УНИВЕРСИТЕТЕ «ЧЕРЕЗ НАУКУ»

*Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е.*

*Уральский федеральный университет,  
620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19*



Сформулированы требования и особенности подготовки специалистов для атомной отрасли, подчеркнута важность опережающей подготовки специалистов для реализации планов по сооружению новых энергоблоков АЭС, в том числе с реакторами на быстрых нейтронах. Подчеркнута значимость научно-исследовательской деятельности студентов в повышении эффективности их обучения. Сформулированы основные условия внедрения принципа «обучение через науку» в процесс подготовки специалистов для атомной отрасли. Обобщен опыт реализации данного принципа кафедрой атомных станций и возобновляемых источников энергии Уральского федерального университета (УрФУ). Описана роль преемственности в проведении масштабных исследований для сохранения накапливаемых знаний путем создания научно-исследовательских групп в составе студентов различных курсов, аспирантов и работников предприятий. Рассмотрен процесс реализации принципа обучения «через науку» на примере решения научно-технических задач для Белоярской АЭС (3D-моделирование радиационно-опасных помещений, маршрутная оптимизация работ в неоднородных радиационных полях) и АО «Институт реакторных материалов» (расчетно-экспериментальные исследования теплогидравлических процессов в шахте-хранилище отработавших топливных сборок реактора ИВВ-2М, разработка системы пассивного отвода тепла с использованием кольцевого термосифона, разработка экспериментального стенда и проведение испытаний работы системы в различных режимах теплоотвода, оформление заявки на изобретение и получение патента).

**Ключевые слова:** инновационное направление развития атомной энергетики, реактор на быстрых нейтронах, персонал, опережающая подготовка, научно-исследовательская работа студентов.

**Для цитирования:** *Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е.* Опыт подготовки специалистов для атомной отрасли в Уральском федеральном университете «через науку». // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2024. – № 4. – С. 202–218. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.17>

## ВВЕДЕНИЕ

Кадровое обеспечение дорожной карты АО «Концерн Росэнергоатом» и зарубежных проектов госкорпорации Росатом определяется на основании внешних и внутренних факторов. Наряду с действующими блоками стоит задача в развитии новых блоков. Общее количество проектов энергоблоков в соответствии с дорожной картой до 2025 г. в РФ и дорожной картой сооружения АЭС большой мощности за рубежом на сегодня составляет 43 энергоблока, из них за рубежом – 26 блоков, в РФ – 17 энергоблоков. На текущий момент с учетом внешних и внутренних факторов суммарная потребность в персонале до 2035 г. эскизно оценивается в 100 тыс. человек [1].

Особую роль в развитии атомной отрасли играют реакторы на быстрых нейтронах, в развитии которых несомненным лидером является Россия. С 1980 г. на Белоярской АЭС успешно эксплуатируется БН-600, в декабре 2015 г. включен в энергосистему Урала, а в 2016 г. сдан в промышленную эксплуатацию энергоблок №4 с реактором БН-800 [2]. Кроме основной миссии БН-800 по отработке отдельных звеньев замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) важнейшей задачей реализации этого проекта является сохранение и развитие компетенций в области эксплуатации, проектирования, сооружения быстрых натриевых реакторов [3].

В 2022 г. выпущено распоряжение Госкорпорации Росатом от 28.04.2022 №1-8/282 «Об утверждении дорожной карты разработки предпроектной и проектной документации и сооружения энергоблока №5 Белоярской АЭС с РУ БН 1200М», которая определяет сроки принятия управленческих решений, разработки проектной документации, строительства, монтажа и ввода в эксплуатацию энергоблока №5 Белоярской АЭС [4].

Для успешной реализации данного инновационного направления развития атомной энергетики требуется опережающая подготовка квалифицированных специалистов по всем этапам жизненного цикла быстрых натриевых реакторов, особенно, для эксплуатации, технического обслуживания и ремонта. Технические университеты являются основным поставщиком квалифицированных кадров для атомной энергетики.

Одним из эффективных путей решения данной задачи является организация процесса подготовки специалистов «через науку» [5], подразумевающей вовлечение студентов, а в дальнейшем и молодых специалистов, совмещающих работу с учебой в аспирантуре, в решение научно-технических проблем атомной отрасли и конкретного предприятия.

## МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ

### Особенности подготовки специалистов для атомной энергетики

Кафедра «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» (АС и ВИЭ) (до 2012 г. «Атомная энергетика») основана в Уральском политехническом институте (УПИ) (ныне УрФУ) в 1961 г. в связи со строительством первых энергоблоков БАЭС [6]. Строительство блока № 3 Белоярской АЭС с РУ БН-600 потребовало организовать подготовку молодых специалистов для обслуживания быстрых натриевых реакторов. Это вызвало необходимость создания специальной учебно-материальной базы и особого подхода к подготовке специалистов.

В связи с сооружением на Белоярской АЭС энергоблока с РУ БН-800 была проведена глубокая модернизация учебно-материальной базы кафедры «Атомная энергетика», в том числе в рамках реализации программы «Формирование профессиональных компетенций выпускников на основе научно-образовательных центров для предприятий атомно-энергетического комплекса Уральского региона» в 2007-2008 гг.

Высокая ответственность за обеспечение безопасности ядерной установки АЭС накладывает жесткие квалификационные требования к эксплуатационному персоналу, обслуживающему реакторную установку. Важнейшим условием успешного ввода в эксплуатацию БН-1200 является заблаговременная подготовка оперативного персонала. В частности, до пуска энергоблока необходимо укомплектовать оперативный персонал в количестве 56 человек (рис. 1). Из них должны иметь разрешение Ростехнадзора: начальник смены станции (НСС), начальник смены реакторного цеха (НС РЦ), начальник смены турбинного цеха (НС ТЦ), ведущий инженер управления реактором (ВИУР), ведущий инженер управления блоком (ВИУБ), ведущий инженер управления турбиной (ВИУТ) (по 7 чел.); не требуется разрешение Ростехнадзора для начальника смены электроцеха (НС ЭЦ), начальника смены цеха тепловой автоматики (НС ЦТАИ). Исходный уровень образования — специалитет, магистратура.

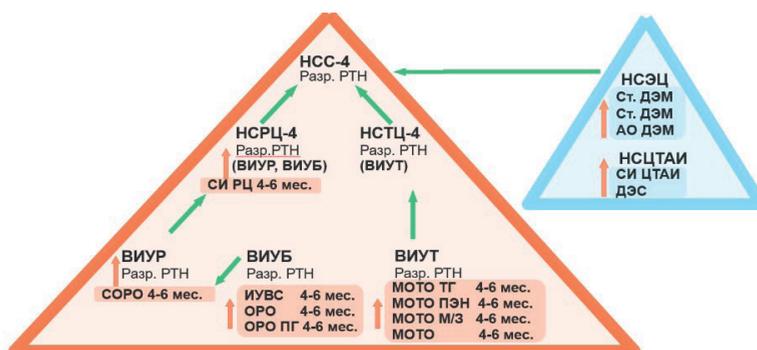


Рис. 1. Структура блочного пункта управления (БПУ)

По состоянию на август 2024 г. на Белоярской АЭС работают 187 работников, закончивших УрФУ по специальности «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг» («Атомные электрические станции и установки»), в том числе директор, главный инженер, пять заместителей главного инженера, НСС – 6 чел.; 70 чел. в реакторных цехах № 2 и № 3; 10 человек в турбинных цехах № 2 и № 3. Кроме того с 2012 г. по этой же специальности прошли профессиональную переподготовку более двухсот специалистов БАЭС, имеющих высшее техническое образование.

Белоярская АЭС расположена на расстоянии порядка 50 км от УрФУ, что позволяет максимально оптимизировать учебный процесс подготовки специалистов, имеется возможность осуществлять поездки как преподавателей на БАЭС, так и работников атомной станции в университет, например, для проведения занятий по профпереподготовке.

Плодотворное сотрудничество кафедры атомных станций и возобновляемых источников энергии с БАЭС реализуется также в направлении подготовки кадров высшей квалификации из работников БАЭС через аспирантуру и соискательство в УрФУ. Интеллектуальный потенциал вуза привлекается к обобщению накопленного опыта эксплуатации, подготовке на этой основе монографий и учебных пособий по проблемам АЭС с реакторами на быстрых нейтронах (табл. 1).

Таблица 1

## Учебные издания

№	Издание	Дисциплина	Статус издания
1	Бельтюков А.И., Карпенко А.И., Полуяков С.А., Ташлыков О.Л., Титов Г.П., Тучков А.М., Щеклеин С.Е. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем: учебное пособие. В 2 ч. Ч. 1; под общ. ред. С.Е. Щеклеина, О.Л. Ташлыкова. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – 548 с.	Теория переноса нейтронов, Физика ядерных реакторов, Ядерные энергетические реакторы, Парогенераторы атомных станций, Эксплуатация и режимы атомных станций	Учебное пособие
2	Бельтюков А.И., Карпенко А.И., Полуяков С.А., Ташлыков О.Л., Титов Г.П., Тучков А.М., Щеклеин С.Е. Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем: учебное пособие. В 2 ч. Ч. 2; под общ. ред. С.Е. Щеклеина, О.Л. Ташлыкова. – Екатеринбург: УрФУ, 2013. – 420 с.	Теория переноса нейтронов, Физика ядерных реакторов, Ядерные энергетические реакторы, Парогенераторы атомных станций, Эксплуатация и режимы атомных станций	Учебное пособие
3	Новиков Г.А., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Обеспечение безопасности в области использования атомной энергии: учебник – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 552 с.	Принципы обеспечения безопасности атомных станций	Учебник
4	Ташлыков О.Л. Ремонт оборудования атомных станций: учебник – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2018. – 352 с.	Ремонт оборудования атомных станций	Учебник
5	Ташлыков О.Л., Бельтюков А.И. Парогенераторы АЭС: учебник – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 304 с.	Парогенераторы АЭС	Учебник
6	Ташлыков О.Л. АЭС: Продление ресурса и снятие с эксплуатации: учебник – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2020. – 216 с.	Продление ресурса и снятие с эксплуатации	Учебник
7	Попов А. И., Ташлыков О.Л. Основы изобретательской деятельности (в области использования атомной энергии): учебник – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. – 204 с.	Основы изобретательской деятельности	Учебник
8	Климова В. А., Ташлыков О. Л. Схемы включения теплоэнергетического оборудования атомных станций и основы их расчета: учебное пособие – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2022. – 200 с.	Атомные электрические станции	Учебное пособие
9	Велькин В. И., Щеклеин С. Е. Тренажеры атомных электростанций РФ: Томас-1, Томас-2, КОРСАР, ЖОКЕР, БН-800: учебник – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2024. – 178 с.	Стендовая тренажерная подготовка	Учебник
10	Ташлыков О. Л., Щеклеин С. Е., Та В.Т. Основы ядерной энергетики: учебник – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2024. – 320 с.	Основы ядерной энергетики	Учебник
11	Ташлыков О.Л., Та Ван Т. Русско-вьетнамский словарь по ядерной энергетике: учебный словарь – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2024. – 176 с.	Дисциплины ядерно-энергетического цикла	Учебный словарь

Для сокращения сроков адаптации выпускников на Белоярской АЭС и других предприятиях атомной отрасли выбор темы дипломного проекта осуществляется совместно с работодателем и соответствует будущему месту работы. Значительный эффект дает трудоустройство студента уже на преддипломной практике и подготовка к сдаче экзаменов на должность.

Кафедра «Атомные станции и возобновляемые источники энергии» УрФУ имеет специализированную учебно-материальную базу по подготовке специалистов для эксплуатации АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. В учебном процессе активно используются программно-тренажерные средства (расчетные программы ГЕФЕСТ [7, 8], Joker, Syntes, аналитический тренажер БН-800 и другие). При проведении научно-исследовательских работ студенты используют различные системы автоматизированного моделирования, например, SolidWorks+Flow Simulation, Comsol.Multphysics [9, 10].

Особо следует выделить аналитический тренажер БН-800, созданный НТЦ «Моделирующие системы» (г. Обнинск), на котором студенты имеют возможность отрабатывать различные режимы работы энергоблока. Методика использования тренажерных средств в УрФУ при подготовке специалистов для Белоярской АЭС приведена в статье [11].

По всем дисциплинам, связанным с обслуживанием быстрых натриевых реакторов, разработаны учебно-методические комплексы (например, «Ядерные энергетические реакторы», «Парогенераторы и теплообменники атомных станций», «Эксплуатация и режимы атомных станций», «Принципы обеспечения безопасности атомных станций»), включающие в себя электронные образовательные ресурсы, позволяющие изучать конструкции, последовательность операций разборки и сборки реакторного оборудования.

В 2012–2013 гг. при поддержке Концерна Росэнергоатом специалистами кафедры «Атомные станции и ВИЭ» и Белоярской АЭС было подготовлено и издано двухтомное учебное пособие «Атомные электростанции с реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем». В последующий период ведущими специалистами кафедры были подготовлены и изданы учебники по основным дисциплинам подготовки по специальности 14.05.02 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг» (табл.1).

### **Организация научно-исследовательской работы студентов**

Обязательной составляющей процесса подготовки специалистов на кафедре атомных станций и возобновляемых источников энергии является научно-исследовательская работа (НИР) студентов под руководством ведущих специалистов кафедры. Важным условием успешной реализации процесса обучения через науку является сотрудничество кафедры с Белоярской АЭС и другими предприятиями и организациями Росатома (Институтом реакторных материалов, АО «Атомэнергоремонт» и др.).

Для развития навыков НИР, освоения компьютерных программ и расчетных кодов различной сложности, а также для последовательной реализации разрабатываемых научно-исследовательских тем учебный план был доработан, введены дополнительные дисциплины (например, дисциплина «Основы изобретательской деятельности», помогающая студентам оформить по результатам своей научно-исследовательской деятельности заявку на изобретение или полезную модель – табл. 2).

Повышению заинтересованности студентов в участии в научно-исследовательских работах (НИР) способствуют гранты и корпоративные стипендии для студентов, активно занимающихся НИР, помимо отличных успехов в учебе. Высокую эффективность обучения через решение реальных научно-технических задач показал проводившийся в течение

**Межпредметные связи дисциплин, обеспечивающих проведение НИР студентов**

Курс	Дисциплина	Объем, зачетных единиц	Используемое программное обеспечение
1	Введение в атомную энергетику	3	Электронные таблицы
	Информационные технологии в атомной энергетике	4	SolidWorks, Mathcad, КОМПАС 3D, Smath Studio
2	Основы ядерной энергетики	3	КОМПАС-график
2–3	Методы математического моделирования физических процессов	3	Mathcad, Smath Studio, электронные таблицы
3	Компьютерное моделирование физических процессов	4	SolidWorks+Flow Simulation, КОМПАС 3D + KompasFlow
4	Основы научных исследований в ядерной энергетике	6	SolidWorks+Flow Simulation, КОМПАС 3D + KompasFlow, Comsol. Multiphysics
5	Основы изобретательской деятельности	4	SolidWorks+Flow Simulation, КОМПАС 3D + KompasFlow, Comsol. Multiphysics
6	Преддипломная практика	14	SolidWorks+Flow Simulation, КОМПАС 3D + KompasFlow, Comsol. Multiphysics

десяти лет ежегодный конкурс научных работ «Знания молодых ядерщиков – атомным станциям», организованный АО «Концерн Росэнергоатом». Студенты кафедры, работы которых были посвящены решению актуальных проблем Белоярской АЭС и имели прикладное значение, традиционно занимали призовые места. Многие из лауреатов этого конкурса работают сейчас на Белоярской АЭС.

В последние годы через иностранных аспирантов, проходящих обучение на кафедре, расширилось сотрудничество с учеными университетов Египта, Иордании, Вьетнама, Саудовской Аравии, Турции в области расчетно-экспериментальных исследований радиационно-защитных свойств природных минералов, распространенных в местах сооружения объектов использования атомной энергии за рубежом [12, 13]. Это также стимулировало вовлечение студентов кафедры в эти исследования, в создание научно-исследовательских команд, что также способствует повышению эффективности реализации принципа «обучения через науку» путем формирования новых направлений научных исследований.

**РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ****Основные условия реализации принципа «Обучение через науку»**

Как показывают результаты, эффективность подготовки специалистов для атомной отрасли значительно возрастает при использовании принципа «Обучение через науку», подразумевающего организацию образовательного процесса на базе решения исследовательских задач атомной энергетики. Этот процесс обучения включает в себя изучение и анализ научно-технических проблем, разработку путей их решения, реализацию комплекса необходимых научно-исследовательских работ, создание опытного образца, патентование разработки. Однако основной проблемой (наиболее трудоемким этапом) является поиск и выбор «реальной» тематики этих исследований.

Тематика научно-исследовательской работы должна по возможности соответствовать профилю предприятия или организации, где студенты проходят производственную практику и куда планируют распределиться. Результатом разработки выбранной темы является дипломное проектирование. Лучшие выпускники имеют возможность продолжить обучение в аспирантуре, совмещая его с работой.

Немаловажным фактором повышения заинтересованности студентов в проведении и участии в НИР являются моральные и материальные факторы поощрения их научной деятельности (гранты и корпоративные стипендии для студентов, имеющих отличные успехи в учебе и активно занимающихся НИР).

Существовавшая ранее проблема прерывания масштабных тем исследований в связи с завершением студентом срока обучения была во многом решена внедрением принципа преемственности. Данный принцип подразумевает создание исследовательских команд, в которые помимо аспирантов и старшекурсников входят студенты младших курсов. При этом пополнение команд происходит ежегодно. Это повышает результативность научных исследований, передачу накапливаемых знаний и навыков. Совмещение обучения в аспирантуре и работы на предприятиях атомной отрасли значительно повышает эффективность проведения НИР, позволяет выполнять диссертационные работы по реальным научно-техническим задачам, проводить верификацию результатов, полученных в результате расчетов или моделирования, с экспериментальными данными на реальном оборудовании [14].

В связи с выбором направления научно-исследовательской работы студентов в соответствии с профилем функционирования предприятия или организации, где они проходят практику и куда планируют распределиться для дальнейшей работы, особую значимость имеет поддержка исследований, проводимых студентами и аспирантами, со стороны руководства цехов, отделов, лабораторий и т.д.

Особое место в решении научно-технических задач занимает привлечение фундаментальной науки путем сотрудничества с учеными кафедры прикладной математики УрФУ и Институтом математики и механики УрО РАН, позволяющее решать сложные математические задачи (например, разработку алгоритмов оптимизации наведения механизма перегрузки БН-600 и БН-800 [15, 16], маршрутную оптимизацию работ в неоднородных радиационных полях [17] и т.д.) и, соответственно, добиваться высоких результатов исследований.

В процессе сооружения, эксплуатации, продления срока эксплуатации (ПСЭ), подготовки к выводу из эксплуатации (ВЭ) быстрых натриевых реакторов (РБН) специалисты кафедры совместно со специалистами Белоярской АЭС принимают активное участие в решении возникающих научно-исследовательских и технических задач [18-22]. На основании этих исследований был подготовлен ряд кандидатских и докторских диссертаций.

При проведении масштабных работ по ПСЭ РУ БН-600 сформировалось обширное поле научно-исследовательской деятельности, в том числе по оптимизации радиационной защиты персонала [23]. Результаты этих исследований будут использованы для формулировки предложений, которые следует учесть при проектировании новых энергоблоков, в частности, БН-1200 [24].

Так одной из задач, сформулированной в ходе опытной эксплуатации подсистемы автоматизированной обработки данных нерегламентных измерений радиационной обстановки на блоках первой очереди Белоярской АЭС и решенной в результате комплекса расчетно-экспериментальных исследований, является «задача дозиметриста», в которой определяется оптимальный маршрут перемещения в радиационно опасном помещении

с посещением заданных точек с учетом обхода препятствий [25, 26]. Проведенные промышленные испытания в помещениях первой очереди БАЭС показали эффективность разработанного алгоритма – снижение дозы облучения при его использовании составило 15–20%. На основании полученных результатов планируется внедрение автоматизированной программы, выдающей оптимальный маршрут перемещения дозиметриста, соответствующий минимальной дозе облучения.

В качестве еще одного примера практической реализации результатов исследований можно привести разработки в области 3D-моделирования работником реакторного цеха и одновременно аспирантом кафедры атомных станций и ВИЭ [27]. Разработанные им 3D-модели помещений для маршрутной оптимизации работ в неоднородных радиационных полях были использованы для первичной подготовки персонала, как оперативного (без опыта работы), так и, особенно, ремонтного. Это позволило значительно сократить время перемещений, быстро находить необходимое оборудование (рис. 2). В ходе исследований по замеру продолжительности обходов оборудования 1-го контура по регламентному маршруту, выполняемых оператором реакторного отделения (ОРО) блока № 3 Белоярской АЭС при приёмке смены, проведенных в марте-апреле 2021 г., сравнивались результаты ОРО со стажем работы более 10 лет, операторов, проходящих стажировку на должность при использовании активных методов обучения в виде разработанных 3D-моделей (ОРО-1) и без них (ОРО-2). Обходы выполнялись в смену с 08:00 до 16:00 в соответствии с графиком и регламентом обходов; для каждой группы проводилось по восемь контрольных замеров, промежутки времени между экспериментами (замерами) составляли 1–2 суток (рис. 3).

Как видно из рисунка, конфигурация зависимости, построенная по результатам эксперимента, идентична «кривой обучения».



Рис. 2. 3D-модель радиационноопасного помещения

### **Разработка системы пассивного отвода тепла от шахты-хранилища ОТВС ИЯУ ИВВ-2М**

Рассмотрим основные этапы реализации на практике принципа «обучение через науку» на примере проведенного комплекса НИР по разработке системы пассивного отвода остаточных тепловыделений в шахте-хранилище (бассейне выдержки) ОТВС ИЯУ ИВВ-2М. В течение срока реализации проекта основной исполнитель прошел путь от студента третьего

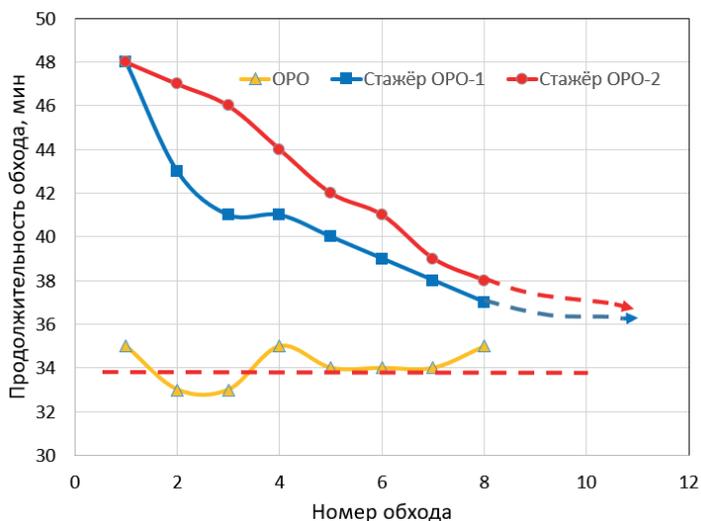


Рис. 3. Зависимость продолжительности регламентного обхода оператором реакторного отделения

курса до заместителя начальника ИЯУ АО ИРМ, пройдя последовательно этапы обучения, прохождения производственных практик в АО ИРМ, выполнения и защиты дипломного проекта по данной теме, обучения в аспирантуре, защиты выпускной работы и подготовки диссертационной работы. В течение всего этого периода над реализацией проекта работала научно-исследовательская группа, включающая в себя аспирантов и студентов различных курсов.

Задача повышения надежности теплоотвода ОТВС в шахте-хранилище (Ш-Х) была сформулирована в период прохождения студентами практики в АО ИРМ. В течение шести лет последовательно были реализованы необходимые шаги по проведению расчетных и экспериментальных исследований. Были построены 3D-модели шахты-хранилища. Проведено моделирование теплогидравлических режимов расхолаживания шахты-хранилища с различными вариантами загрузки ОТВС, при работающей системе охлаждения, при обесточивании с использованием программного пакета SolidWorks Flow Simulation [28]. Для верификации результатов моделирования были проведены экспериментальные исследования изменения температуры воды в различных точках шахты-хранилища, в том числе в режиме отключения насоса расхолаживания. На основании полученных результатов была разработана схема системы пассивного отвода тепла (СПОТ) с использованием кольцевого термосифона, изготовлено оборудование, смонтирован экспериментальный стенд в АО ИРМ (рис. 4, 5). В качестве рабочего тела использован спирт. Результаты комплекса испытаний, проведенных в декабре 2023 г. – январе 2024 г. подтвердили работоспособность и эффективность системы [29]. Испытания на различных режимах работы системы позволили выявить и устранить недостатки, большая часть которых была связана с геометрией термосифона. На основании проведенного комплекса расчетно-экспериментальных исследований получен патент на изобретение [30] и подана заявка еще на одно изобретение<sup>1</sup>. Разработанная конструкция СПОТ может быть интегрирована в Ш-Х новых проектируемых ИЯУ, что повысит их безопасность и конкурентоспособность.

<sup>1</sup> Заявка на изобретение: «Устройство пассивного отвода тепла на основе регулируемого термосифона» № 2024115492 от 06.06.2024 (авторы: Ташлыков О.Л., Чалпанов С.В., Сопроненков Н.Г., Епифанов И.Д.)

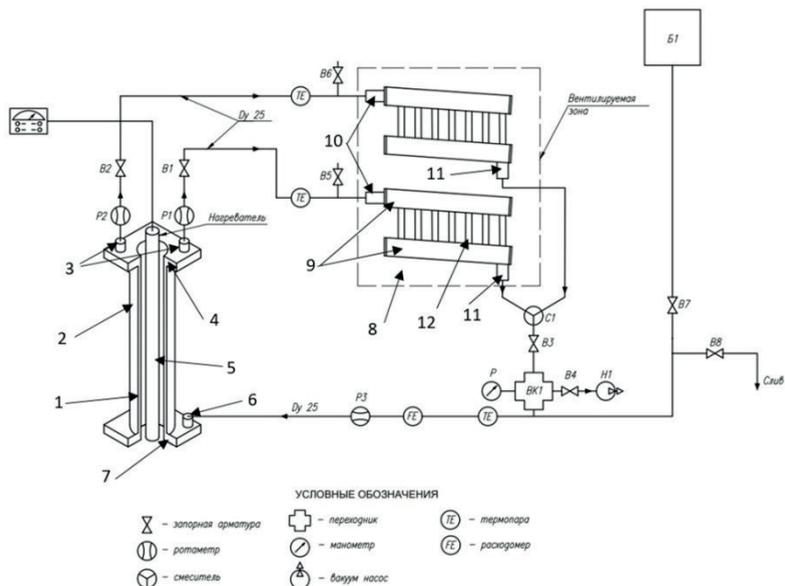


Рис. 4. Схема экспериментальной установки: 1 – кольцевой зазор; 2 – испарительный модуль; 3 – подъемные патрубки; 4 – верхняя камера испарительного модуля; 5 – нагреватель; 6 – патрубок возврата конденсата; 7 – нижняя камера испарительного модуля; 8 – конденсатор в вентилируемом пространстве; 9 – коллекторы конденсата; 10 – патрубки входа; 11 – патрубки выхода; 12 – трубки с оребрением

## РОЛЬ СОТРУДНИЧЕСТВА С ЗАРУБЕЖНЫМИ УНИВЕРСИТЕТАМИ В РЕАЛИЗАЦИИ ПРИНЦИПА «ОБУЧЕНИЕ ЧЕРЕЗ НАУКУ»

Возникший в последнее десятилетие интерес со стороны зарубежных университетов к научному сотрудничеству и коллаборации с УрФУ в связи с расширением географии присутствия Госкорпорации Росатом за рубежом, строительством ОИЭА (АЭС, центров ядерной науки и технологий и т.д.) и, как следствие, активизация работ по исследованиям местных природных и модифицированных материалов для возможного использования при сооружении радиационно опасных объектов способствовали развитию сотрудничества. Из Египта, Иордании, Вьетнама в УрФУ были направлены аспиранты для выполнения диссертационных работ по данной тематике. Основной целью исследований является создание композитных радиационно-защитных материалов (РЗМ) с высокими защитными свойствами, низкой токсичностью, с одновременным соблюдением принципа оптимизации.

Были проведены научно-исследовательские работы с участием студентов в составе научных команд по расчетно-экспериментальным исследованиям радиацион-



Рис. 5. Экспериментальный стенд системы пассивного отвода тепла от шахты-хранилища: 1 – бак с водой и термосифоном; 2 – дыхательная емкость; 3 – воздушник; 4 – конденсатор; 5 – соединительные трубы

но-защитных свойств природных минералов, распространенных в местах сооружения ОИАЭ за рубежом, в том числе Росатомом. Ряд работ выполнен в сотрудничестве с учеными университетов Египта, Иордании, Саудовской Аравии, Турции, Вьетнама и др. [31–33].

Сотрудничество ученых УрФУ и зарубежных университетов позволяет оперативно исследовать неизученные ранее материалы с использованием современных программных и приборных средств за счет объединения интеллектуальных и материально-технических ресурсов, возможностей научно-исследовательской базы университетов и получить значимые результаты, которые могут быть использованы при разработке технологии и изготовлении новых эффективных композитных радиационно-защитных материалов. Были опубликованы более ста статей в высокорейтинговых зарубежных журналах (Nuclear Engineering and Technology, Radiation Physics and Chemistry, European Physical Journal Plus, Progress in Nuclear Energy, Ceramics International и др.).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Привлечение студентов к выполнению актуальных научно-исследовательских работ экспериментального и аналитического характера, участие в реальных научных событиях и совместных разработках способствуют повышению уровня специальной подготовки, овладению дополнительными компетенциями студентов, ускорению адаптации выпускников в коллективах АЭС, АО «ИРМ», других предприятий Росатома и создают базу для продолжения исследований и подготовки диссертационных работ с целью поиска научно-технических решений актуальных задач атомной отрасли.

## Литература

1. Овечкин А.С., Николаев Н.Н., Чернов С.С. Перспективы кадрового обеспечения российских и зарубежных проектов / Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» МНТК-24. – М.: АО «Росэнергоатом», АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2024. – С. 304–305.
2. Алексеев С.В. Техничко-экономические аспекты инновационного развития ядерной энергетики России в XXI веке / Пленарные и секционные доклады международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» МНТК-2018. – М.: АО «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций» (АО «ЭНИЦ»), 2018. – С. 460–462.
3. Пономарев-Степной Н.Н. Двухкомпонентная ядерная энергетическая система с тепловыми и быстрыми реакторами в замкнутом ядерном топливном цикле. – М.: Техносфера, 2016. – 160 с.
4. Петрунин В.В., Фатеев С.А., Шешина Н.В., Шепелев С.Ф., Марова Е.В., Маров И.В., Щекин Д.В. Разработка и реализация проектов РУ БН-1200М, РИТМ-200, ВТГР-200 – ключевой вклад в обеспечение национального технологического суверенитета и лидерства в атомной энергетике / Тезисы докладов международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» МНТК-24. – М.: АО «Росэнергоатом», АО ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2024. – С. 12–14.
5. Фадеев А.С., Герди В.Н. Реализация принципа «Интеграция образования, науки и производства» на приборостроительном факультете Бауманского университета. Современное технологическое образование. Сборник научных статей: в 2-х частях (Под ред. А.А. Александрова и В.К. Балтына). – М.: Ассоциация технических университетов, 2021. – 294 с. – Часть 2. – С. 166–174.
6. Бакирова Н.В., Золотова А.С. Белоярская АЭС: XXI век. – Екатеринбург, ООО «Сократ», 2024. – 184 с.

7. Альперович М.Н., Григорьева Н.М., Сысоева О.В. Аннотация программы ГЕФЕСТ. // ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. – 1994. – Вып. 4. – С. 36–43.
8. Belov A.A., Seleznev E.F. Computational tracking of BN-600 operation. // Атомная энергия. – 2010. – Т. 108. – Вып. 4. – С. 256–259. Электронный ресурс: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1465> (дата доступа 01.10.2024).
9. Van Thuong T., Tashlykov O.L., Glukhov S.M., Shumkov D.E., Volchikhina Y. Experimental and theoretical justification of passive heat removal system for irradiated fuel assemblies of the nuclear research reactor in a spent fuel pool // Nuclear Engineering and Technology. – 2023. – No. 55. – PP. 2088–2095. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.02.028>
10. Ревякина П.А., Бессонов И.А., Завадский Д.И., Ташлыков О.Л. Анализ влияния внешних факторов на процессы, протекающие в тепломеханическом оборудовании атомных станций. // Альтернативная энергетика и экология. – 2024. – № 6 (423). – С. 50–58.
11. Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е., Титов Г.П., Носов Д.А., Тучков А.М. Методика использования программно-тренажерных средств при изучении специальных дисциплин. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2016. – № 3. – С. 63–72. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2016.3.07>
12. Aladailah M.W., Shirmanov I.A., Strugov E.D., Marashdeh Mohammad W., Abdelmunem E.M., Eke, C. Photon absorption capabilities of  $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-P}_2\text{O}_5\text{-CaO-MgO}$  glasses. // Radiation Physics and Chemistry. – 2022. – 190. – 109814. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109814>
13. Acikgoz A., Aladailah M.W., Tashlykov O.L., Demircan G., Kamislioglu M., Yaşar M.M., Özdoğan H., Yorulmaz N. Influence of  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  on radiation shielding and elastic properties of  $\text{TeO}_2\text{-MgO-Na}_2\text{O}$  glasses: A simulation study by PHITS and MCNP. // Pramana – Journal of Physics. – 2023. – No. 97(4). – PP. 167. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12043-023-02629-7>
14. Ташлыков О.Л., Бессонов И.А., Лезов А.Д., Чалпанов С.В., Смыков М.С., Скворцов Г.И., Климова В.А. Расчетно-экспериментальные исследования гидродинамических условий работы фильтров-контейнеров для ионоселективной очистки. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2022. – № 2. – С. 62–72. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2022.2.06>
15. Dolgii Yu.F., Sesekin A.N., Tashlykov O.L. Mathematical Model of the Nuclear Fuel Refueling Mechanism of the BN-800 Reactor and Optimization of its operation. // IFAC Papers On Line. – 2022. – No. 55–10. – PP. 590–594. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.462>
16. Dolgii Y.F., Petunin A.A., Sesekin A.N. Optimal control of the system of coupled cylinders. // AIP Conference Proceedings. – 2018. – 2048. – 020007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.462>
17. Tashlykov O.L., Sesekin A.N., Chentsov A.G., Chentsov A.A. Development of Methods for Route Optimization of Work in Inhomogeneous Radiation Fields to Minimize the Dose Load of Personnel. // Energies. – 2022. – No. 15. – 4788. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15134788>
18. Матвеев В.И., Черный В.А., Иванов А.П., Казанский Ю.А., Бабенко Г.В., Карпенко А.И., Росляков В.Ф., Васильев Б.А., Фарахшин М.Р. Основные этапы физического пуска БН-600 и сравнение измеренных и проектных характеристик. // Атомная энергия. – 2010. – Vol. 108. – Iss. 4. – С. 250–255. Электронный ресурс: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/1464> (дата доступа 01.10.2024).
19. Решетников А.В., Коверда В.П., Скоков В.Н., Карпенко А.И., Говоров П.П., Бельтюков А.И. Пульсации расхода воды с фликкерным спектром мощности в промышленном натриевом парогенераторе. Атомная энергия. – 2005. – Т. 98. – Вып. 2. – С. 105–110. Электронный ресурс: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/3220> (дата доступа 01.10.2024).
20. Карпенко А.И., Блинов Ю.А., Головин В.В., Зубкова Т.В. Измерение локальных возмущений плотности нейтронного потока на энергетической мощности БН-600. // Атомная энергия. – 1996. – Т. 80. – Вып. 3. – PP. 154–157. Электронный ресурс: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/4632> (дата доступа 01.10.2024).

21. Носов Ю.В., Ровнейко А.В., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Особенности вывода из эксплуатации быстрых реакторов БН-350, -600. // Атомная энергия. – 2018. – Т. 125. – № 4. – С. 195–200. Электронный ресурс: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/2227/2206> (дата доступа 01.10.2024).
22. Ровнейко А.В., Ташлыков О.Л., Филин И.А., Хомяков А.П., Щеклеин С.Е., Сесекин А.Н. Очистка натрия первого контура быстрых натриевых реакторов. // Вопросы радиационной безопасности. – 2024. – № 3 (115). – С. 3–9.
23. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. Annals of the ICRP. – 2007. – V. 37. – No. 2–4. – PP. 1–332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2007.10.003>
24. Ашурко Ю.М. Инновационные реакторные технологии 4-го поколения и текущее состояние их развития в рамках международного форума «ПОКОЛЕНИЕ-IV» / Пленарные и секционные доклады международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» МНТК-2018. – М.: АО «Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций» (АО «ЭНИЦ»), 2018. – С. 462–468.
25. Кропачев Ю.А., Ташлыков О.Л., Щеклеин С.Е. Оптимизация радиационной защиты на этапе вывода энергоблоков АЭС из эксплуатации. // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2019. – № 1. – С. 119–130. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.1.11>
26. Tashlykov O.L., Grigoryev A.M., Kropachev Y.A. Reducing the Exposure Dose by Optimizing the Route of Personnel Movement When Visiting Specified Points and Taking into Account the Avoidance of Obstacles. // Energies. – 2022. – No. 15. – 8222. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15218222>
27. Завадский Д.И., Ташлыков О.Л. Возможности использования ТИМ в атомной энергетике (на примере АЭС с энергоблоком БН-600). // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. – 2023. – 6(67). Часть II. – С. 65–70.
28. Шумков Д.Е., Ташлыков О.Л., Глухов С.М. Обеспечение безопасности эксплуатации и хранения ОТВС ИЯУ ИВВ-2М с использованием системы пассивного расхолаживания шахты-хранилища. // ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы. – 2023. – № 3. – С. 115–124. EDN: XNVNMA
29. Чалпанов С.В., Ташлыков О.Л., Глухов С.М., Шумков Д.Е., Попов А.И. Методика экспериментального исследования стенда-эмулятора пассивной системы охлаждения бассейна выдержки исследовательского ядерного реактора. // Альтернативная энергетика и экология. – 2024. – № 6 (423). – С. 38–49.
30. Ташлыков О.Л., Шумков Д.Е., Чалпанов С.В., Глухов С.М., Ширманов И.А. Устройство пассивного отвода остаточных тепловыделений. Патент РФ на изобретение № 2829090. Заявка № 2024104941 от 28.02.2024. Опубликовано: 23.10.2024, Бюл. № 30. Электронный ресурс: <https://fips.ru/EGD/e9ff68d5-2f65-44a7-ac89-b268f760d741> (дата доступа 01.10.2024).
31. Aladailah M.W., Tashlykov O.L., Marashdeh M.W., Akhdar H. Photon, neutron absorption capabilities of  $Y_2O_3-Al_2O_3-P_2O_5$  glasses. // Radiation Effects and Defects in Solids. – 2022. – No. 177(5–6). – PP. 455–470. DOI: <https://doi.org/10.1080/10420150.2022.2043320>
32. Та Ван Thuong, Shironina A.M., Voronin I.P., Kuvshinova E.V., Pyltsova D.O., Nazarov E.I., Mahmoud K.A. Physical and  $\gamma$ -ray shielding properties of Vietnam's natural stones: An extensive experimental and theoretical study. // Nuclear Engineering and Technology. – 2024. – No. 56. – PP. 1932–1940. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.03.012>
33. Mahmoud K.A., Kapustin F.L., Shironina A.M., Cholakh S.O., Voronin I.P., Abdel-Azeem M.M., Ismail A.M., Mira H.I. Experimental investigation of the annealing temperature impacts on the physical, morphological, and gamma-ray attenuation properties of clay-based bricks. // Radiation Physics and Chemistry. – 2024. – No. 223. – 111932. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111932>

Поступила в редакцию 07.10.2024  
После доработки 05.11.2024

## Авторы

Ташлыков Олег Леонидович, д.т.н., профессор кафедры «Атомные станции и ВИЭ»,  
E-mail: otashlykov@list.ru

Щеклеин Сергей Евгеньевич, д.т.н., зав. кафедрой «Атомные станции и ВИЭ»,  
E-mail: s.e.shcheklein@urfu.ru

UDC 621.039

## Experience of “Via Science” Personnel Training for Nuclear Industry at the Ural Federal University

**Tashlykov O.L., Shcheklein S.E.**

Ural Federal University,  
19 Mira St., 620002 Ekaterinburg, Russia

### Abstract

The requirements for and peculiarities of personnel training for nuclear industry have been formulated. The importance of advanced personnel training for implementing plans to build new NPP units, including those with fast neutron reactors, is emphasized. The significance of students' research activities in increasing the effectiveness of their training is underlined.

The key conditions for implementing the principle of “training via science” in the process of personnel training for nuclear industry have been formulated. The experience in implementing this principle by the UrFU's Department of Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources has been summed up.

The paper describes the role of continuity in conducting large-scale studies to retain the accumulated knowledge by forming research groups consisting of students from different years of training, graduate students and company employees.

The process of implementing the principle of «via science» learning has been considered using an example with solution of scientific and technical problems for the Beloyarsk NPP (3D simulation of radiation-hazardous rooms, route optimization of activities in non-uniform radiation fields) and for JSC «Institute of Reactor Materials» (computational and experimental investigation of thermal-hydraulic processes in the SFA storage well of the IVV-2M reactor, development of a passive heat removal system using a ring thermosyphon, development of an experimental test bench and testing of the system operation in different heat removal modes, preparing an application for an invention and obtaining a patent).

**Keywords:** innovative trend in nuclear power evolution, fast neutron reactor, personnel, advanced training, student research work.

**For citation:** Tashlykov O.L., Shcheklein S.E. Experience of “Via Science” Personnel Training for Nuclear Industry at the Ural Federal University. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2024, no. 4, pp. 202–218. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2024.4.17> (in Russian).

### References

1. Ovetschkin A.S., Nikolaev N.N., Tschernov S.S. Prospects for staffing Russian and foreign projects. *Abstracts of the reports of the International scientific and technical conference “Safety, efficiency and economics of nuclear energy” MNTK-2024*. Moscow, “Rosenergoatom” JSC, OKB Hidropress JSC Publ., 2024, pp. 304–305 (in Russian).
2. Alekseev S.V. Technical and economic aspects of innovative development of nuclear energy in Russia in the XXI century. *Plenary and sectional reports of the International scientific and technical conference*

“Safety, efficiency and economics of nuclear energy” MNTK-2018. Electrogorsk, JSC “Research and Development Center for Nuclear Power Plants Safety” (ENIC JSC) Publ., 2018, pp. 460–462 (in Russian).

3. Ponomarev-Stepnoj N.N. *Two-component nuclear power system with thermal and fast reactors in a closed nuclear fuel cycle*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2016, 160 p. (in Russian).

4. Petrunin V.V., Fateev S.A., Shashina N.V., Shepelev S.F., Marova E.V., Marov I.V., Shchekin D.V. Development and implementation of the BN-1200M, RITM-200, VTGR-200 reactor plant projects is a key contribution to ensuring national technological sovereignty and leadership in nuclear energy. *Abstracts of the reports of the International scientific and technical conference “Safety, efficiency and economics of nuclear energy” MNTK-2024*. Moscow, “Rosenergoatom” JSC, OKB Hidropress JSC Publ., 2024, pp.12–14 (in Russian).

5. Fadeev A.S., Gerdi V.N. Implementation of the principle of «Integration of education, science and production» at the instrument-making faculty of Bauman University. *Modern technological education. Collection of scientific articles*. Moscow, Association of Technical Universities, 2021, 294 p. Part. 2, pp. 166–174 (in Russian).

6. Bakirova N.V., Zolotiva A.S. *Beloyarsk NPP: 21st century*. Ekateriburg. Socrat Publ., 184 p. (in Russian).

7. Alperovitsch M.N., Grigorjeva N.M., Sysoeva O.V. Abstract of the program GEFEST. *Problems of Atomic Science and Engineering. Series: Physics of Nuclear Reactors*. 1994. 4. PP. 36–43 (in Russian).

8. Belov A.A., Seleznev E.F. Computational tracking of BN-600 operation. *Atomic energy*. 2010. 108 (4), pp. 321–324. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-010-9296-x>

9. T. Van Thuong, Tashlykov O.L., Glukhov S.M., Shumkov D.E., Volchikhina Y. Experimental and theoretical justification of passive heat removal system for irradiated fuel assemblies of the nuclear research reactor in a spent fuel pool. *Nuclear Engineering and Technology*. 2023, no. 55, pp. 2088–2095. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2023.02.028>

10. Revyakina P.A., Bessonov I.A., Zavadsky D.I., Tashlykov O.L. Analysis of the influence of external factors on the processes occurring in the thermal mechanical equipment of nuclear power plants. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2024, no. 6 (423), pp. 50–58 (in Russian).

11. Tashlykov O.L., Shcheklein S.E., Titov G.P., Nosov D.A., Tuchkov A.M. Methods for using computer training facilities in studies of special disciplines. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2016, no. 3, pp. 63–72. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2016.3.07> (in Russian).

12. Aladailah M.W., Shirmanov I.A., Strugov E.D., Marashdeh Mohammad W., Abdelmunem E.M., Eke C. Photon absorption capabilities of  $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-P}_2\text{O}_5\text{-CaO-MgO}$  glasses. *Radiation Physics and Chemistry*, 2022, 190, 109814. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2021.109814>

13. Acikgoz A., Aladailah M.W., Tashlykov O.L., Demircan G., Kamislioglu M., Yaşar M.M., Özdoğan H., Yorulmaz N. Influence of  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  on radiation shielding and elastic properties of  $\text{TeO}_2\text{-MgO-Na}_2\text{O}$  glasses: A simulation study by PHITS and MCNP. *Pramana – Journal of Physics*. – 2023, no. 97(4), pp. 167. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12043-023-02629-7>

14. Tashlykov O.L., Bessonov I.A., Lezov A.D., Chalpanov S.V., Smykov M.S., Skvortsov G.I., Klimova V.A. Computational and experimental studies into the hydrodynamic operation conditions of container filters for ion-selective treatment. *Nuclear Energy and Technology*. 2022, no. 8(3), pp. 197–202. DOI: <https://doi.org/10.3897/nucet.8.94105>

15. Dolgii Yu.F., Sesekin A.N., Tashlykov O.L. Mathematical Model of the Nuclear Fuel Refueling Mechanism of the BN-800 Reactor and Optimization of its operation. *IFAC Papers On Line*. 2022, no. 55–10, pp. 590–594. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.462>

16. Dolgii Y.F., Petunin A.A., Sesekin A.N. Optimal control of the system of coupled cylinders *AIP Conference Proceedings*. 2018, 2048, 020007. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5082025>

17. Tashlykov O.L., Sesekin A.N., Chentsov A.G., Chentsov A.A. Development of Methods for Route Optimization of Work in Inhomogeneous Radiation Fields to Minimize the Dose Load of Personnel. *Energies*, 2022, 15, 4788. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15134788>

18. Matveev V.I., Chernyi V.A., Ivanov A.P., Kazanskii Y.A., Babenko G.V., Karpenko A.I., Roslyakov V.F., Vasil'ev B.A., Farakhshin M.R. Main stages of physical startup of BN-600 and comparison of the measured and nominal characteristics. *Atomic Energy*. 2010, vol. 108, iss. 4, pp. 315–320. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-010-9295-y>
19. Reshetnikov A.V., Koverda V.P., Skokov V.N., Karpenko A.I., Govorov P.P., Bel'Tyukov A.I. Water flow rate pulsations with a flicker power spectrum in a commercial sodium steam generator *Atomic Energy*. 2005, vol. 98, iss. 2, pp. 97–102. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-005-0176-8>
20. Karpenko A.I., Blinov Y.A., Golovin V.V., Zubkova T.V. Measurement of local disturbances of neutron flux density at the generating capacity of a BN-600 reactor. *Atomic Energy*. 1996, vol. 80, iss. 3, pp. 153–156. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02414799>
21. Nosov Y.V. Rovneiko A.V., Tashlykov O.L., Shcheklein S.E. Decommissioning Features of BN-350, -600 Fast Reactors. *Atomic Energy*. 2019, vol. 125, no. 4, pp. 219–223. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-019-00470-z>
22. Rovneiko A.V., Tashlykov O.L., Filin I.A., Khomyakov A.P., Shcheklein S.E., Sesekin A.N. Decontamination of Sodium in the Primary Circuit of Fast Sodium-Cooled Reactors. *Radiochemistry*, 2024, vol. 66, no. 5, pp. 655–661. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1066362224050096>
23. The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. *Annals of the ICRP*. 2007, vol. 37, no. 2–4, pp. 1–332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icrp.2007.10.003>
24. Ashurko Yu.M. Innovative reactor technologies of the 4<sup>th</sup> generation and the current state of their development within the framework of the international forum “GENERATION-IV *Plenary and sectional reports of the International scientific and technical conference “Safety, efficiency and economics of nuclear energy” MNTK-2018*. Electrogorsk, JSC “Research and Development Center for Nuclear Power Plants Safety” (ENIC JSC) Publ., 2018, pp. 462–468 (in Russian).
25. Kropachev Y.A., Tashlykov O.L., Shcheklein S.E. Optimization of radiation protection at the stage of nuclear power plant units decommissioning. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*. 2019, no. 1, pp. 119–130. DOI: <https://doi.org/10.26583/npe.2019.1.11> (in Russian).
26. Tashlykov O.L., Grigoryev A.M., Kropachev Y.A. Reducing the Exposure Dose by Optimizing the Route of Personnel Movement When Visiting Specified Points and Taking into Account the Avoidance of Obstacles. *Energies*. 2022, 15, 8222. DOI: <https://doi.org/10.3390/en15218222>
27. Zavadskii D.I., Tashlykov O.L. The role of virtual technologies in the optimization of radiation protection of personnel (by the example of NPP unit with BN-600). *Natural and Technogenic Risks. Safety of Structures*. 2023, no. 6(67), part II, pp. 65–70 (in Russian).
28. Shumkov D.E., Tashlykov O.L., Glukhov S.M. Ensuring the safety of operation and storage of sfa of the IVV-2M research nuclear reactor using the passive cooling system of the storage mine. *Problems of atomic science and technology. Series: Nuclear and reactor constants*. 2023, iss. 3, pp. 115–124. EDN: XNVNMA (in Russian).
29. Chalpanov S.V., Tashlykov O.L., Glukhov S.M., Shumkov D.E., Popov A.I. Methodology for experimental study of a stand-emulator of a passive cooling system for a research nuclear reactor pool. *Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*. 2024, no. 6 (423), pp. 38–49 (in Russian).
30. Tashlykov O.L., Shumkov D.E., Chalpanov S.V., Glukhov S.M., Shirmanov I. A. *Device for passive removal of residual heat release*. Patent RF No. 2829090, 2024 (in Russian). URL: <https://fips.ru/EGD/e9ff68d5-2f65-44a7-ac89-b268f760d741> (accessed Nov. 01, 2024).
31. Aladailah M.W., Tashlykov O.L., Marashdeh M.W., Akhdar H. Photon, neutron absorption capabilities of  $Y_2O_3-Al_2O_3-P_2O_5$  glasses. *Radiation Effects and Defects in Solids*. 2022, no. 177(5-6), pp. 455–470. DOI: <https://doi.org/10.1080/10420150.2022.2043320>
32. Ta Van Thuong, Shironina A.M., Voronin I.P., Kuvshinova E.V., Pyltsova D.O., Nazarov E.I., Mahmoud K.A. Physical and  $\gamma$ -ray shielding properties of Vietnam's natural stones: An extensive experimental and

theoretical study. *Nuclear Engineering and Technology*. 2024, no. 56, pp. 1932–1940. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.net.2024.03.012>

33. Mahmoud K.A., Kapustin F.L., Shironina A.M., Cholakh S.O., Voronin I.P., Abdel-Azeem M.M., Ismail A.M., Mira H.I. Experimental investigation of the annealing temperature impacts on the physical, morphological, and gamma-ray attenuation properties of clay-based bricks. *Radiation Physics and Chemistry*. 2024, no. 223, 111932. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2024.111932>

### Authors

Oleg L. Tashlykov, Dr. Sci. (Engineering), Professor of the Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources Department,

E-mail: [otashlykov@list.ru](mailto:otashlykov@list.ru)

Sergei E. Shcheklein, Dr. Sci. (Engineering), Professor, head of the Nuclear Power Plants and Renewable Energy Sources Department,

E-mail: [s.e.shcheklein@urfu.ru](mailto:s.e.shcheklein@urfu.ru)