

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В ВУЗОВСКОЙ ПОДГОТОВКЕ БУДУЩИХ СПЕЦИАЛИСТОВ ДЛЯ АЭС ПО ПРОГРАММЕ «ВУЗ-ПРЕДПРИЯТИЕ»

Семёнов В.К.* , Вольман М.А.* , Журавлёва В.С.**

* *ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина» (ИГЭУ), 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34*

** *Филиал ОАО «Концерн Росэнергоатом» Калининская атомная станция. 171843, Тверская область, г. Удомля, Калининская атомная станция*



Рассмотрены аспекты разработанной на кафедре АЭС Ивановского государственного энергетического университета совместно с Калининской АЭС программы подготовки будущих специалистов для АЭС, составными элементами которой являются использование компьютерного и имитационного моделирования в вузе и проект «8-й семестр», реализуемый на станции. В течение восьмого семестра студенты приобретают практические навыки работы в цехах, проходят обучение в учебно-тренировочном подразделении станции и там же сдают экзамены. В стенах вуза компьютерное моделирование используется для численных экспериментов по кинетике ядерных водо-водяных реакторов в среде Mathcad. Имитационное моделирование технологических процессов проводится на компьютерном и полномасштабном тренажерах энергетического блока АЭС с реактором ВВЭР-1000.

Разработаны комплексы программ и методическое обеспечение для математического моделирования переходных процессов в реакторах; программы и методики симуляции на компьютерном и полномасштабном тренажерах нейтронно-физических экспериментов и операций пуска и останова блока. Тренажерные комплексы способствуют формированию профессионального мышления, являются эффективным средством личностного становления будущего специалиста, поэтому при использовании тренажеров уделяется внимание влиянию индивидуально-личностных особенностей обучаемых на успешность прохождения данного этапа подготовки. В качестве примера описана математическая модель и приведены результаты численных экспериментов по исследованию ксеноновой устойчивости реактора. Комплексное внедрение описанной программы подготовки позволяет практически вдвое сократить сроки адаптации выпускников вуза на рабочих местах станции, что подтверждается отзывами руководителей соответствующих подразделений.

Ключевые слова: АЭС, ВВЭР, подготовка персонала, математическое моделирование, численные эксперименты, компьютерные и полномасштабные тренажеры, ксеноновые колебания, ксеноновая устойчивость ядерного реактора.

ВВЕДЕНИЕ

Для выполнения существующей программы широкомасштабного развития ядерной энергетики России требуется подготовка высококвалифицированных специалистов, обладающих глубоким пониманием нейтронно-физических и теплофизических процессов, сопровождающих работу ядерного реактора во всех режимах его работы. Высокие профессиональные навыки для работы в качестве оперативного персонала выпускник вуза получает непосредственно на станции, однако сроки его подготовки могут быть существенно сокращены при широком использовании компьютерных технологий в вузе и постоянном взаимодействии в учебном процессе вуза и предприятия.

ПРОГРАММА «ВУЗ-ПРЕДПРИЯТИЕ»

С 1985 г. в рамках договора между Ивановским государственным энергетическим университетом (ИГЭУ) и Калининской АЭС (КлнАЭС) действует программа подготовки будущих специалистов «вуз-предприятие», одним из элементов которой является обучение студентов в течение восьмого семестра непосредственно на станции. Основанием для внедрения указанного проекта послужил тот факт, что строительство КлнАЭС требовало большого количества специалистов, способных обеспечить пуск и эксплуатацию с соблюдением требований ядерной и радиационной безопасности. Ввиду дефицита подготовленного оперативного персонала блочных щитов управления была поставлена задача сокращения сроков адаптации молодых специалистов на производстве. Для решения этой задачи был привлечен ИГЭУ, являющийся одним из ведущих высших учебных заведений по подготовке кадров для энергетического сектора экономики. В течение восьмого семестра студенты проходят обучение в учебно-тренировочном подразделении КлнАЭС, приобретают практические навыки работы в цехах и там же сдают экзамены по следующим дисциплинам: «Ядерные реакторы», «Турбины АЭС», «Электрооборудование АЭС», «Безопасность жизнедеятельности», «Охрана окружающей среды», «Инженерная психология» [1]. Результаты практики учитываются при корректировке программы обучения в вузе, где значительная доля учебного времени уделяется компьютерному и имитационному моделированию. Последнее осуществляется с использованием полномасштабного тренажера (ПМТ) блока АЭС с реактором ВВЭР-1000, переданного в ИГЭУ Калининской АЭС, и компьютерного функционального аналитического тренажера (ФАТ), идентичного ПМТ, являющегося программным продуктом ООО «Вестерн Сервисез».

КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В РАМКАХ ПРОГРАММЫ «ВУЗ-ПРЕДПРИЯТИЕ»

Общепризнано, что компьютерные технологии обладают высокой эффективностью в вузовской подготовке будущих специалистов ядерно-энергетического профиля [2 – 4]. Применяемая нами технология обучения с использованием компьютерного и имитационного моделирования состоит из трех взаимосвязанных частей. Первая часть содержит компьютерный лабораторный практикум по кинетике водородных реакторов, вторая – посвящена симуляции нейтронно-физических реакторных измерений на компьютерном тренажере ФАТ, а в третьей части внимание уделено отработке навыков по управлению технологическими процессами на ФАТ и ПМТ.

Углубленное изучение нейтронно-физических процессов проводится на основе численных экспериментов в рамках разработанного нами комплекса компьютерных программ [5, 6]. Математические модели охватывают кинетику холодного и горячего реактора. Они позволяют проанализировать роль запаздывающих нейтронов, влияние тем-

пературы топлива и теплоносителя на характер переходных процессов, выгорание топлива, отравление реактора ксеноном и самарием, а также ксеноновые колебания и ксеноновую устойчивость реактора. Математические модели основываются на системе жестких нелинейных дифференциальных уравнений, интегрирование которых осуществлено с использованием соответствующих алгоритмов в среде Mathcad. Использование указанной среды делает процесс моделирования весьма наглядным и удобным для проведения численных экспериментов, позволяющих студентам «поиграть» различными входными параметрами, оценить их роль и провести самостоятельное исследование. При моделировании переходных процессов уделено внимание проблеме замыкания системы дифференциальных уравнений, что не только является математической проблемой, но и имеет практическое значение – позволяет сформулировать условия для анализа работы взаимодействующих между собой отдельных частей технологической схемы блока. Кроме того студентам прививается умение рассматривать взаимосвязанные технологические переходные процессы в оборудовании не только на основе численных экспериментов, но и по результатам качественного анализа дифференциальных уравнений без их решения.

Вторая часть касается симуляции нейтронно-физических реакторных измерений на компьютерном тренажере ФАТ [7]. Следует отметить, что в существующих вузовских программах и соответствующих учебниках реакторные измерения затрагиваются довольно скупо. Однако безопасный пуск и последующая эксплуатация ядерного реактора возможны только при знании его нейтронно-физических характеристик с точностью, удовлетворяющей требованиям правил ядерной безопасности и теплотехнической надежности активной зоны. Знакомство с техникой физического эксперимента и овладение ею со студенческой скамьи является одной из важнейших задач при подготовке специалистов, которым предстоит эксплуатировать ядерные реакторы.

Заключительная часть комплекса – симуляция на ФАТ и ПМТ различных технологических процессов в оборудовании блока АЭС с ВВЭР-1000, в частности, пуска и останова блока [8]. Методическое обеспечение для ее реализации разработано на основе типовой пошаговой программы пуска-останова с учетом базового перечня операций по пуску-останову, порядка и последовательности их выполнения. Освоение студентами данной части позволяет им не только изучить принцип действия отдельных элементов энергоблока, но и исследовать их взаимные связи, закрепить и систематизировать теоретические знания, приобрести первоначальные навыки управления сложным технологическим объектом.

Работа с тренажерами способствует формированию профессионального мышления, а также является эффективным средством личностного становления будущего специалиста, инструментом развития профессионально важных качеств. Поэтому в ходе симуляции пуско-остановочных работ на ПМТ ведутся исследования по выявлению индивидуально-личностных качеств, влияющих на успешность выполнения тренажерных заданий. Личностные особенности – один из компонентов компетенций, влияющий на скорость и эффективность их формирования. У студентов с разным уровнем успешности выполнения тренажерных задач выявляются значимые различия в показателях выраженности личностных качеств. Их анализ дает возможность развивать методический аспект обучения на основе как комплексных решений, так и индивидуальных рекомендаций обучаемым.

ИССЛЕДОВАНИЕ КСЕНОНОВОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ВОДО-ВОДЯНОГО РЕАКТОРА

В качестве примера рассмотрим компьютерную реализацию математической модели возбуждения и подавления аксиальных ксеноновых колебаний в ядерном реакторе,

которая позволяет студентам изучить важную и актуальную для эксплуатации проблему. Известно, что в больших ядерных реакторах, работающих при высокой плотности потока нейтронов, может возникнуть весьма опасный эффект – появление ксеноновых колебаний и волн. Ксеноновые колебания условно разделяются на азимутальные, радиальные и аксиальные. Эксперименты показывают, что для реактора ВВЭР существенны только аксиальные колебания, и необходимо принимать меры по их подавлению. Это явление связано с положительной обратной связью реактивности реактора по ксеноновой составляющей. Если в какой-то области активной зоны реактора возникнет флуктуация, вызывающая рост нейтронного потока, то это приведет к дополнительному выгоранию ксенона, дальнейшему росту нейтронного потока и локального энерговыделения. Если эту флуктуацию не подавить органами регулирования реактора, то процесс будет развиваться, что может привести к тяжелой аварии, связанной с повреждением тепловыделяющих элементов из-за превышения в них пределов линейной и объемной тепловых нагрузок. При интегральном воздействии системы регулирования плотность нейтронного потока будет снижена во всей активной зоне. Концентрация ксенона по всей зоне, за исключением локальной области, начнет возрастать. В области неоднородности она некоторое время еще будет падать, а затем начнет расти. Такое взаимодействие системы регулирования с реактором приведет к тому, что область с переменной концентрацией ксенона будет перемещаться по зоне с периодом примерно одни сутки. Стабилизирующее влияние на ксеноновые колебания (волны) оказывают отрицательный температурный и мощностной эффекты реактивности.

Численные эксперименты по моделированию ксеноновых колебаний осуществляются на основе системы двух одинаковых связанных между собой реакторов с равным энерговыделением и соприкасающимися торцами. Эта система реакторов является моделью одного реактора, разделенного по вертикали на две одинаковые половины. Обмен нейтронными потоками между этими реакторами осуществляется за счет утечки нейтронов через соприкасающиеся торцы. Вероятность утечки определяется выражением

$$P = 1 - \exp(-B^2 M^2) = B^2 M^2, \quad (1)$$

где B^2 – геометрический параметр; M^2 – площадь миграции нейтронов. Время обмена нейтронами является задаваемым параметром, подлежащим в процессе экспериментов варьированию, предварительное значение которого можно оценить по формуле

$$\tau_{об} = H^2 / (v \cdot D), \quad (2)$$

где H – высота половины реактора; D , v – коэффициент диффузии тепловых нейтронов и их скорость соответственно.

Возбуждение ксеноновых колебаний между верхней и нижней половинами реактора осуществляется за счет возмущения одной половины реактора введением в нее флуктуации в виде скачка реактивности, а подавление введенной флуктуации моделируется борным регулированием, действующим на обе половины реактора. В основу рассмотрения положена «точечная» модель реактора в двухтемпературном приближении по топливу и теплоносителю, дополненная уравнениями рождения и гибели ксенона. Поскольку переходный процесс является медленным, то запаздывающие нейтроны на него никакого влияния не оказывают, и их можно либо вообще не принимать во внимание, т.е. считать все нейтроны мгновенными, либо использовать однополое приближение. В исследуемой модели подавление аксиальных ксеноновых колебаний осуществлялось за счет температурного эффекта реактивности и уменьшения времени обмена нейтронными потоками между связанными реакторами. Неравномерность аксиального энергораспределения характеризует

аксиальный офсет (AO), под которым понимается отношение разности энерговыделения между нижней и верхней половинами реактора к их сумме, определенной до возникновения колебаний:

$$AO = (W_n - W_v) / (W_n + W_v)_0. \quad (3)$$

В качестве исходных данных приняты параметры, характерные для реактора ВВЭР-1000. Характерные значения масштабов времени отдельных процессов лежат в диапазоне от 10^{-4} с до нескольких суток, поэтому рассматриваемая система уравнений относится к классу жестких дифференциальных уравнений, и для их интегрирования использованы соответствующие алгоритмы.

На основе проведенных численных экспериментов студенты строят кривые, определяющие границу между ксеноновой устойчивостью и неустойчивостью реактора. В области ксеноновой неустойчивости колебания носят нарастающий характер, тогда как в области устойчивости – затухающий. Переход от одной области к другой характеризуется незатухающими колебаниями. На рисунке 1 приведены характерные зависимости температурного коэффициента реактивности от мощности реактора, определяющие область ксеноновой устойчивости реактора для различных значений времени обмена нейтронными потоками между реакторами. Вначале подъем кривой связан с дестабилизирующим влиянием роста концентрации ксенона за счет радиоактивного распада йода, далее сказывается стабилизирующее влияние температурного эффекта реактивности. Заметим, что если время обмена нейтронными потоками между реакторами окажется порядка времени жизни поколения мгновенных нейтронов, то ксеноновых колебаний вообще не возникнет.

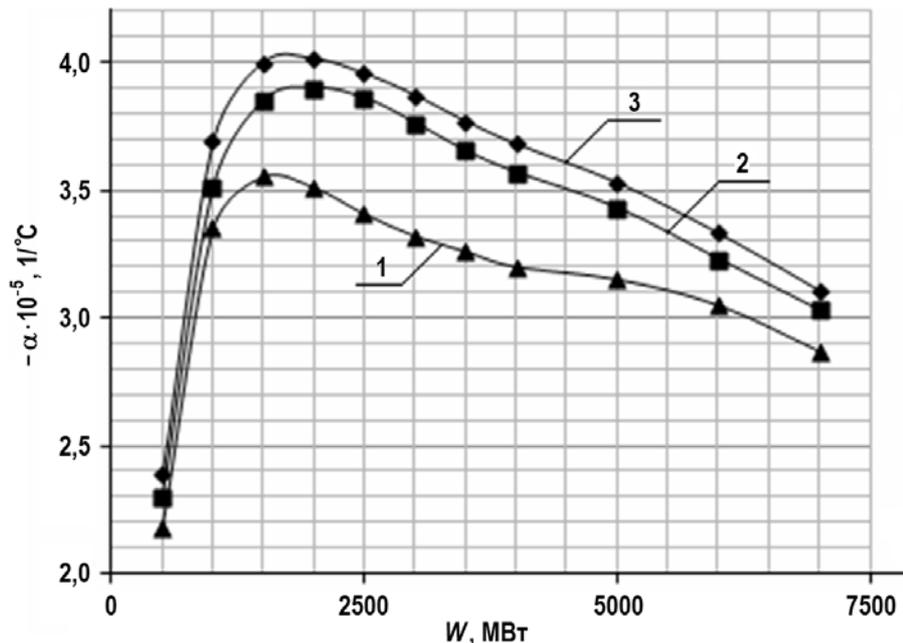


Рис. 1. Зависимость температурного коэффициента реактивности от мощности реактора, определяющая область ксеноновой устойчивости реактора: 1 – время обмена нейтронными потоками $\tau_{об} = 0,001$ с; 2 – $\tau_{об} = 0,01$ с; 3 – $\tau_{об} = 0,1$ с

В заключение данного исследования проводится сравнение результатов численных экспериментов с результатами натурных испытаний и результатами теоретического исследования ксеноновой устойчивости реактора в рамках теории возмущений. Так, для использованных условий моделирования бросок мощности половины реактора в ходе переходного процесса составлял 200 МВт, перегрев тепловыделяю-

щих элементов 27 градусов, наибольшее значение офсета 17,8%, период колебаний 27,7 часа и постоянная времени затухания 52,5 часов. Эти результаты удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными, полученными в натуральных экспериментах на действующих реакторных установках [9]. Подавление ксеноновой неустойчивости реактора за счет мощностного эффекта реактивности, рассчитанного в рамках теории возмущений, также удовлетворительно согласуется с соответствующим температурным эффектом, определенным из приведенной выше модели [10].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящее время программа «вуз-предприятие» реализуется в нашем вузе для студентов специальности 141403.65 «Атомные станции: проектирование, эксплуатация и инжиниринг». Ежегодный прием по данному направлению подготовки составляет 40 человек. Разработанные нами и описанные выше компьютерные технологии внедрены в целом ряде учебных дисциплин, а также являются основой для учебно-исследовательских и дипломных работ студентов. Доля дисциплин профессионального цикла, в которых используется математическое и имитационное моделирование, достигает более 35%. В отдельных курсах, таких как «Кинетика ядерных реакторов», «Реакторные измерения», «Режимы работы и эксплуатация ЯЭУ», «Испытание и наладка оборудования АЭС», количество часов, предусматривающих применение моделирования, составляет до 90% в структуре этих дисциплин.

Таким образом, наш опыт по применению компьютерных технологий в рамках совместной программы с Калининской АЭС «вуз-предприятие» дает положительный эффект в подготовке будущих специалистов для АЭС. В результате, по отзывам руководителей соответствующих подразделений, сроки адаптации наших выпускников сокращаются в полтора – два раза по сравнению с общепринятыми.

Литература

1. Журавлева В.С. Организация практики на Калининской АЭС: проект «8 семестр» / Тезисы докладов IX Международной научно-технической конференции «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики». – М.: 2014. – С. 251 – 252.
2. Коровин Ю.А., Тихоненко А.В. Современные компьютерные технологии в подготовке специалистов ядерно-энергетического профиля и научных исследованиях // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2011. – №2. – С. 188-193.
3. Наумов В.И., Смирнов В.Е. Моделирование нестационарных и аварийных процессов в ядерных энергетических установках: лабораторный практикум. – М.: МИФИ, 2007. – 104 с.
4. Кряквин Л.В. Сборник программ для расчета кинетики и динамики ядерного реактора
Доступно на сайте
<http://www.exponenta.ru/educat/systemat/kryakvin/index.asp>. Дата обращения: 01.06.2015.
5. Семенов В.К. Кинетика ядерных реакторов: методические материалы для проведения компьютерного лабораторного практикума. – Иваново: ИГЭУ, 2013. – 52 с.
6. Свидетельство № 2014618789. Программный комплекс симуляции переходных процессов в ядерных реакторах: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / В.К. Семенов, М.А. Вольман. Ивановский государственный энергетический университет. - № 2014616344, заявл. 02.07.2014; зарегистр. 28.08.2014.
7. Семенов В.К., Вольман М.А. Реакторные измерения: методические материалы для проведения компьютерного лабораторного практикума. – Иваново: ИГЭУ, 2014. – 80 с.
8. Вольман М.А. Пуск и останов энергоблока ВВЭР-1000: методические материалы для проведения лабораторного практикума. – Иваново: ИГЭУ, 2014. – 60 с.
9. Крайнов Ю.А., Духовенский А.С., Астахов С.А. Обзор экспериментов исследования аксиальных ксеноновых колебаний в активной зоне реактора ВВЭР-1000 // ВАНТ. Сер. Физика и техника ядерных реакторов. – 1987. – Вып. 1. – С. 36–37.

10. *Семенов В.К., Вольман М.А.* К вопросу о ксеноновых колебаниях в ядерном реакторе // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 2. – С. 15–20.

Поступила в редакцию 12.05.2014 г.

Авторы

Семенов Владимир Константинович, профессор, доктор техн. наук

E-mail: semenov_vk@mail.ru

Вольман Мария Андреевна, ассистент

E-mail: maria_volman@mail.ru

Журавлёва Виктория Сергеевна, начальник учебно-методического отдела

E-mail: juravleva@knpp.ru

UDC 621.039.37

**EXPERIENCE OF COMPUTER TECHNOLOGY USAGE
WITHIN UNIVERSITY TRAINING
FOR FUTURE SPECIALISTS OF NUCLEAR POWER PLANTS
UNDER THE «UNIVERSITY-ENTERPRISE» PROGRAM**

Semenov V.K. *, Volman M.A. *, Zhuravlyova V.S. **

* Ivanovo State Power Engineering University.

34, Rabfakovskaya st., Ivanovo, 153003 Russia

** Kalinin NPP, branch of JSC «Concern Rosenergoatom».

Kalinin NPP, Udomlya, Tver' reg., 171843 Russia

ABSTRACT

The article deals with the aspects of training program for future specialists of nuclear power plants. This program is realized at NPP Department of Ivanovo State Power University and Kalinin NPP. The usage of computer and simulation modeling at the university and the program «8-th term» are the main components of this concept. In the context of the «8-th term» students study at the training unit of the station. They get practical skills in the workshops and pass the exams. Computer modeling is used for numerical experiments on the kinetics of nuclear reactors in Mathcad. The complex of programs and methodological support for simulation of transients in nuclear reactors are designed. The mathematical model for determining the xenon stability in a nuclear reactor is described in detail. The numerical experiments on modeling of xenon oscillations in a nuclear reactor are carried out. The simulation results agree with the results of pilot experiments. Simulation modeling of the technological processes is carried out on the computer and full-scale simulator of WWER-1000. The programs and methodological support for the simulation on the computer and full-scale simulator of neutron-physical reactor measurements and the start-up - shutdown process are designed too. A thorough knowledge of physical experiment techniques during university study is one of the most urgent tasks in training for future specialists. The training complex contributes to form professional thinking. Also it is an effective means of personal forming for the future specialist. The proposed approach allows reducing the adaptation terms for graduates in their workplaces.

Key words: NPP, WWER, training of personnel, mathematical modeling, numerical experiments, computer and full-scale simulators, xenon oscillations, xenon stability in a nuclear reactor.

REFERENCES

1. Zhuravleva V.S. Organizaciya praktiki na Kalininskoo AES: proekt «8 semestr» [Organization of practice at Kalinin NPP: "8-th semester" project]. Tezisy dokladov IX Mezhdunarodnoj nauchno-tehnicheskoy konferencii «Bezopasnost', effektivnost' i ekonomika atomnoj energetiki». Moscow, 2014, pp. 251–252 (in Russian).
2. Korovin Yu.A., Tikhonenko A.V. Sovremennye komp'yuternye tehnologii v podgotovke specialistov yaderno-energeticheskogo profilya i nauchnyh issledovaniyah [Modern computer technologies in research and training for nuclear energy specialists]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2011, no. 2, pp. 188–193.
3. Naumov V.I., Smirnov V.E. Modelirovanie nestacionarnykh i avariynykh processov v yadernykh energeticheskikh ustanovkakh: laboratornyj praktikum [Simulation of transient and emergency processes in nuclear reactors: computer training]. Moscow, MIFI Publ., 2007. 104 p. (in Russian).
4. Kryakvin L.V. Sbornik programm dlya raschyota kinetiki i dinamiki yadernogo reaktora (Collection of programs for calculation of the kinetics and dynamics of nuclear reactor) Available at: <http://www.exponenta.ru/educat/systemat/kryakvin/index.asp>. (accessed 1 Jun. 2015).
5. Semenov V.K. Kinetika yadernykh reaktorov: metodicheskie materialy dlya provedeniya komp'yuternogo laboratornogo praktikuma [Kinetics of nuclear reactors: methodical materials for computer training]. Ivanovo, IGEU Publ., 2013. 52 p. (in Russian).
6. Semenov V.K., Vol'man M.A. Programmnyj kompleks simulyacii perehodnykh processov v yadernykh reaktorah [Program complex of transient simulation in nuclear reactors]. Svidetel'stvo № 2014618789, 2014 (in Russian).
7. Semenov V.K., Vol'man M.A. Reaktornye izmereniya: metodicheskie materialy dlya provedeniya komp'yuternogo laboratornogo praktikuma [Reactor dimensions: methodical materials for computer training]. Ivanovo, IGEU Publ., 2014. 80 p. (in Russian).
8. Vol'man M.A. Pusk i ostanov energobloka VVER-1000: metodicheskie materialy dlya provedeniya laboratornogo praktikuma [Start-up and shutdown of WWER-1000: methodical materials for laboratory training]. Ivanovo, IGEU Publ., 2014. 60 p. (in Russian).
9. Kraynov Yu.A., Dukhovenskiy A.S., Astakhov S.A. Obzor eksperimentov issledovaniya aksial'nykh ksenonovykh kolebaniy v aktivnoy zone reaktora VVER-1000 [The review of an axial xenon oscillations research in the core of WWER-1000]. *VANT*, Ser. Fizika i tekhnika yadernykh reaktorov, iss. 1, 1987, pp. 36–37.
10. Semenov V.K., Vol'man M.A. K voprosu o ksenonovykh kolebaniyah v yadernom reaktore [About xenon oscillations in nuclear reactor]. *Vestnik IGEU*. 2015, iss. 2, pp. 15–20 (in Russian).

Authors

Semyonov Vladimir Konstantinovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: semenov_vk@mail.ru

Vol'man Mariya Andreevna, Assistant

E-mail: maria_volman@mail.ru

Zhuravlyova Victoria Sergeevna, Head of Educational-Methodical Department

E-mail: juravleva@knpp.ru