

УДК 621.311.25

*Д. И. КУХТИН, А. В. ЕФИМОВ, Т. В. ПОТАНИНА, Т. А. ГАРКУША***МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМ И ОБОРУДОВАНИЯ ЭНЕРГООБЛОКОВ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Рассмотрены математические модели парогенераторных и реакторных установок АЭС и их вспомогательного оборудования, паротурбинных установок АЭС и ТЭС, теплообменного оборудования систем регенерации, конденсации и теплофикации энергоблоков АЭС и ТЭС. Показана необходимость совершенствования математических моделей систем и оборудования энергоблоков электростанций для автоматизированного управления режимами их эксплуатации, что делает актуальными разработки и усовершенствование математического и алгоритмического обеспечения, которое отвечает за автоматизацию систем управления энергоблоков АЭС и ТЭС.

Ключевые слова: математическая модель, системы оборудования, автоматизированное управление, алгоритм, энергоблок, электростанция.

Введение: В области разработки математических моделей технологических процессов, происходящих в системах и оборудовании энергоблоков электростанций во время их эксплуатации, различными авторами был создан целый ряд универсальных программ. Разработка таких моделей актуальна для создания систем автоматизированного управления режимами эксплуатации АЭС и ТЭС. Рассмотрим примеры моделей систем и оборудования энергоблоков, которые традиционно относят к основному оборудованию: парогенерирующих установок (котел, парогенератор, реактор), турбоустановок, систем регенерации, конденсации и теплофикации.

Основная часть: Математические модели парогенераторных и реакторных установок АЭС и их вспомогательного оборудования.

Для эффективного использования данных об эксплуатации парогенераторов АЭС с ВВЭР создан широкий спектр программных средств для сбора, хранения и анализа этих данных с целью систематизации всей возможной информации о режимах их работы.

Первая версия информационной системы «Парогенераторы АЭС», описанная в работе [1], разработана на основе опыта, полученного при создании «Международной базы данных по парогенераторам» (InterSG), разработанной в 2001 г. Главное отличие этой системы состоит в выделении в ней отдельно проектируемого модуля, предназначенного для ввода, хранения и анализа данных вихретокового контроля. Базы данных, предназначенные для информации о контроле и ремонте, дают возможность хранения соответствующей числовой и графической информации.

Информационно-аналитическая система «Дефектность труб парогенераторов» [2] предназначена для решения задач систематизации данных о результатах вихретокового контроля труб поверхности теплообмена.

Для моделирования технологических процессов в парогенераторах широко применяются так называемые универсальные компьютерные коды

(программы), а также коды, создаваемые для расчета отдельных параметров парогенератора и решения конкретных задач. Однако, необходимо отметить, что модели, построенные таким образом, не всегда обладают достаточной степенью адекватности из-за отсутствия, в ряде случаев, в кодах необходимых уравнений для описания особенностей технологических процессов (например, импульсных колебаний гидравлических потоков в переходных режимах) и корреляций, неустойчивости в некоторых случаях расчетного процесса и ограничений расчетных мощностей [3]. В подобных случаях в модели вводятся упрощения, которые зачастую искажают результат. В связи с этим возникает необходимость разработки специальных кодов для расчета отдельных параметров и описания таких, например, специфических процессов, как распределение примесей в водяном объеме, естественная циркуляция в «невыгороженных» пучках поверхности теплообмена и других.

В работах [4, 5] для описания стационарных и нестационарных процессов в объеме второго контура горизонтального парогенератора для АЭС с ВВЭР используются специальные проблемно-ориентированные компьютерные коды, достаточно хорошо себя зарекомендовавшие.

Авторами работ [6–8] предложена математическая модель гидродинамики водяного объема парогенератора, которая учитывает неорганизованные контуры в процессе естественной циркуляции пароводяной смеси.

В модели, представленной в работе [9], теплогидравлические процессы в парогенераторе описываются с помощью применения методов теории механики однофазных и многофазных сред: вода и пар рассматриваются в данной модели как отдельные фазы, для которых формулируются законы сохранения массы, количества движения и энергии, дополненные замыкающими соотношениями. Трубная система парогенератора учтена в модели [9] за счет введения понятия пористости.

В работе [10] моделируется эксплуатационная ситуация существенного падения уровня воды в парогенераторе. Для решения данной проблемы

используется достаточно сложная модель, которая учитывает значительную неравномерность распределения параметров по объему парогенератора. Необходимо отметить, что широкому применению такого рода моделей для решения задач управления режимами работы и нагрузкой энергоблоков АЭС препятствует их громоздкость и большая требовательность к вычислительным ресурсам.

Разработанная в [11] математическая модель горизонтального парогенератора ПГВ-1000, включает в себя сопряжённую гидродинамическую задачу по первому и второму контурам с учётом тепловой связи через пакеты труб поверхности теплообмена. При этом первый контур рассмотрен в многоканальном 1D приближении с учётом гидравлической неравномерности расходов теплоносителя по расчётным группам теплообменных труб. Гидродинамика рабочего вещества (питательной воды и пара) в корпусе парогенератора представлена в 3D постановке на основе модели анизотропного пористого тела.

В работе [12] показаны результаты моделирования пространственного распределения параметров рабочего вещества второго контура в горизонтальном парогенераторе реакторной установки с ВВЭР-1000. Расчёты проведены с помощью компьютерного кода ATHLET 2A с использованием в нем моделей для описания гидродинамического воздействия между параллельными каналами потоков и моделей теплообменных процессов, которые связывают первый и второй контур.

Для анализа тепло- и массообмена в парогенераторах горизонтального типа разработан также программный код STEG (steamgenerator) [13]. На основе решения системы нестационарных трехмерных уравнений механики многофазных сред выполняется расчет параметров пароводяной смеси в объеме второго контура. Специально разработанная программа ПГВ-2.1 позволяет определить поле теплового потока на поверхности теплообменных труб с учетом гидравлической неравномерности по ширине и высоте пучка труб. Для расчета паросодержаний и гидравлических сопротивлений при движении пароводяной смеси в пучке теплообменных труб в коде STEG предусмотрены эмпирические корреляции. Модель позволяет проводить тщательный анализ явлений во II контуре в стационарных условиях: расчетная схема содержит 54648 расчетных объемов, в которых реализуется разнонаправленное движение фаз. Код STEG дает возможность осуществлять расчетно-аналитические исследования по оптимизации компоновки теплообменных труб, достаточно достоверно описывать основные явления, характерные для гидродинамики II контура. Вместе с тем, анализ результатов его идентификации показал, что требуется доработка кода и увеличение числа расчетных объемов для устранения несоответствия между модельными расчетами и экспериментальными исследованиями в некоторых локальных зонах опускных коридоров поверхности теплообмена

парогенератора.

Целый ряд работ [14–17] посвящен разработке методов и алгоритмов рационального контроля параметров парогенераторов, прогнозированию изменения параметров и управляющих воздействий парогенератора в различных режимах работы энергоблока, созданию математических моделей процессов, происходящих в парогенераторах.

Широкое применение в ядерной отрасли нашли также расчетные компьютерные коды, моделирующие теплогидравлические процессы в оборудовании реакторных установок АЭС. Создание трехмерных кодов представляет собой серьезную комплексную проблему, так как переход от одномерной версии к трехмерной путем механического увеличения размерности невозможен. В теплогидравлических кодах TRAC [18] и CATHARE [19] трехмерные модули были разработаны для моделирования крупномасштабных многомерных эффектов (например, ситуаций, связанных с авариями с большой течью), которые не всегда требуют весьма детальной трехмерной нодализации. Вместе с тем часто возникающие маломасштабные явления требуют именно трехмерного описания. Коды компонент TRAC, CATHARE, RELAP5 [20, 21], ATHLET [22, 23] осуществляют моделирование теплогидравлических процессов в активной зоне реакторов и в парогенераторах. Недостатком этих кодов с точки зрения применения автоматизированного управления режимами работы энергоблоков является высокая требовательность к затратам времени, и потому их потенциал не может использоваться рационально: моделируются конкретные элементы оборудования, которые важны для безопасности, а комплексное моделирование агрегатов проводится ограничено.

В работе [24] представлен компьютерный код КИТ (код интегральный тяжелоаварийный), представляющий собой полномасштабную модель АЭС с ВВЭР. Модель включает модели реакторной установки и всех систем энергоблока и дополнена специальными моделями процессов деградации активной зоны реактора, поведения кориума в нижней камере и разрушения днища реактора. Код функционирует в рамках аналитического тренажера АЭС и имеет модульную структуру, что дает возможность улучшать и верифицировать отдельные модули. Основу КИТ составляют физико-химический программный комплекс СВЕЧА для активной зоны [25] и теплогидравлический программный комплекс БАГИРА [26–28].

В работах [29–32] разработан код КОРСАР (комплексный расчет атомных реакторов), использующий современные замыкающие соотношения, имеющий хороший уровень верифицированности. На основе этого кода планируется создание комплексной расчетной модели энергоблока АЭС с ВВЭР-1500 для обоснования создания систем контроля и управления.

Основной целью работы [33] является разработка

методов многокритериального параметрического синтеза интеллектуальных систем автоматического управления энергоблоков АЭС на основании оптимизации показателей качества систем генетическими алгоритмами.

В работе [34] исследуются особенности охлаждения расплавления кориума в контейнменте во время тяжелых аварий на АЭС для обоснования безопасности АЭС и построения пассивных систем защиты от тяжелых аварий в реакторах третьего и четвертого поколений.

Целью исследований в работе [35] является определение способов работы энергоблока в период продления рабочей кампании, удовлетворяющих определенным условиям:

- максимально возможной мощности и дополнительной выработки электроэнергии;
- максимальной экономичности;
- максимальной маневренности и приёмности;
- автоматизации ведения режимов работы оборудования и изменения структуры тепловой схемы.

Автором работы [36] была предложена математическая модель теплогидравлических процессов, которые происходят в пассивной системе защиты от тяжелых аварий при проникновении температурных струй расплава кориума к подреакторному бассейну с охладителем, который испаряется под действием потоков тепла от струи. Также в этой работе были исследованы явления распада струи на капли и их охлаждение, что позволяет установить закономерности теплогидравлических процессов в пассивной системе защиты, необходимые для конструирования новых и усовершенствования существующих систем безопасности АЭС.

Цели и задачи работы [37] заключаются в повышении безопасности эксплуатации АЭС путем разработки и исследования пассивных систем защиты от тяжелых аварий и определение таких параметров систем, которые при любом сценарии развития гарантированно обеспечат удержание топлива внутри контейнента.

Автор работы [38] ставит цель в решении научной проблемы усовершенствования методов повышения безопасности и эффективности эксплуатации АЭС на основе обобщенного риск-ориентированного подхода.

Целью ряд работ [39–47] посвящен разработке методов, алгоритмов и подходов к повышению безопасности и эффективности эксплуатации атомных станций, а также к созданию математических моделей оптимизации системы контроля концентрации борного раствора теплоносителя реакторных установок.

Математические модели паротурбинных установок АЭС и ТЭС.

В работе [48], одной из первых в СССР, был описан пакет программ, позволяющий моделировать

тепловые схемы паротурбинных установок, являющихся, как и реакторные и парогенераторные установки, одним из основных элементов технологических схем энергоблоков АЭС, и позволяющий оценивать их технико-экономическую эффективность. Расчет паротурбинной установки проводился либо при условии электрической постоянной мощности турбоустановки или постоянном расходе пара на турбину, либо при условии заданной тепловой нагрузки парогенератора. Если расход пара на турбину не был задан в исходных данных, он определялся в процессе расчета всей схемы турбоустановки. Введенные «уровни» производили кодировку элементов установки. Для определения параметров пара или воды в любом элементе схемы следовало задать уровень и номер расчетной точки. Характеристики оборудования учитывались в виде различных зависимостей.

Также в СССР одной из первых для энергоблоков АЭС была создана математическая модель технологических процессов ядерной теплоэнергетической установки [49], состоящая из моделей процессов в парогенераторах, турбоустановках и в системе «ЦНД – конденсатор». Из математического описания схемы процесса в этой модели были исключены вспомогательные элементы оборудования, характеристики которых практически не меняются при варьировании основных параметров турбоустановки (конденсатные и дренажные насосы, эжекторы, испарители и т.п.). Эта модель предназначалась только для сопоставительных расчетов параметров технологических схем ядерных энергетических установок, позволяющих решать частные задачи проектирования и эксплуатации. Кроме того, эта же модель не обладала структурной инвариантностью.

В 70–90 гг. XX века в ИПМаш НАН Украины был разработан метод имитационного моделирования теплоэнергетических установок ТЭС и АЭС [50]. Этот универсальный метод позволяет моделировать теплоэнергетические установки с уровнем детализации, принятом не только при проектировании, но и при эксплуатации. С его помощью охватывается круг задач, содержащих многие реальные состояния эксплуатируемого энергетического оборудования. Модели, реализующие этот метод, эффективны в системе «человек-компьютер», обладают структурным и функциональным изоморфизмом и являются информационными аналогами турбоустановок ТЭС и АЭС. Такие модели позволяют решать задачи как комплексной технико-экономической оптимизации теплоэнергетических установок ТЭС и АЭС в целом, так и оптимизации параметров отдельных ее подсистем и аппаратов. Модульная структура организации таких моделей позволяет при необходимости использовать её отдельные части. Методические положения имитационного моделирования, описывающего паротурбинную установку [50–52], позволяют развивать подобные

модели дальше. С помощью этой модели, в частности, были проведены обширные исследования по структурно-параметрической оптимизации режимов работы и нагрузок оборудования паротурбинных установок АЭС и ТЭС [53, 54, 55].

В работе [56] описана математическая модель паровой турбины К-1000-1500/60 с различными типами регуляторов и представлены результаты синтеза регуляторов методами векторной оптимизации. Для систем автоматического управления паровыми турбинами АЭС также актуальны задачи математического моделирования режимов работы и синтеза параметров регуляторов частоты вращения роторов турбин.

Нелинейная динамическая модель второго контура АЭС, представленная в работе [57], объединяет модели главного парового коллектора, системы регулирования турбины, проточной части турбины, сепаратора и промежуточного перегревателя пара, конденсатора, системы регенеративного подогрева основного конденсата и питательной воды, деаэрата, питательных насосов и системы питания парогенераторов. В модели проточной части турбины приняты допущения, не учитывающие теплообмен с окружающей средой и изменений количеств теплоты, аккумулированной в элементах турбины.

В [58–60] изложен подход к построению комплексной динамической имитационной математической модели паротурбинной установки (ПТУ) в различных режимах ее работы. Модель имитирует в комплексе протекающие процессы, управляемые автоматикой и оператором. Математическая модель процесса расширения пара основывается на представлении проточной части турбины как последовательности паровых объемов, разделенных сопротивлениями, и учитывает тепловое состояние металла системы «статор-ротор». Для каждого парового объема рассчитываются параметры пара, а для каждого отсека – расход и средняя температура металла ротора и статора турбины. Модель абсолютных и относительных тепловых перемещений в системе «статор-ротор» цилиндров турбоустановки реализована на основе общих методов теории прочности и представления сложных геометрических элементов конструкций корпусов и роторов цилиндров эквивалентными стержнями и оболочками, а неравномерности распределения температур в них представлены действием эквивалентной системы сил и моментов. Имитационная математическая модель изменения виброхарактеристик турбоагрегата во всех режимах его работы реализована на основе теории колебаний для системы соединенных роторов турбины, сопряженных с ротором генератора.

В ряде работ [61–63] авторы оценивают ресурс эксплуатации и показатели долговечности каналов теплоделяющих сборок ядерных реакторов АЭС, а также теплообменных труб пароперегревателей паровых котлов ТЭС с учетом сплошной коррозии, причем рассматривают показатели долговечности

теплообменных труб пароперегревателей паровых котлов ТЭС на основе континуальной модели коррозионного растрескивания.

Модель турбоустановки, представленная в работе [64], имеет модульную структуру, объединяет четыре взаимосвязанных модуля: «ступени турбины», «отбор пара», «сепараторы и регенеративные подогреватели», «стопорный клапан». Моделирование осуществлено с помощью разработанного авторами кода MMS.

В работах [65, 66] математическая модель и программный код расчета динамики технологических параметров второго контура включает собственно турбину, конденсатор, тракт регенеративного подогрева основного конденсата и питательной воды, систему главных паропроводов и пускосбросных устройств, а также систему управления входящим в эти тракты оборудованием и собственно турбиной. Для выполнения расчетов переходных режимов работы энергоблока в целом разработаны модель парогенератора и упрощенная модель реактора и четырех петель первого контура с главными циркуляционными насосами и системой управления реактором. Для расчета элементов тепловой схемы, которые описываются одними и теми же уравнениями, используется один расчетный модуль (программа). Каждый расчетный модуль имеет внешние связи с другими расчетными модулями. Модель дает возможность определять динамические характеристики оборудования энергоблока, выбирать настройки регуляторов, проверять функциональное состояние оборудования при различных возмущениях и нормальной работе системы управления энергоблоком.

В работе [67] авторами была поставлена и решена задача создания детальной модели энергоблока АЭС в доступном программном обеспечении. Модель разработана в интерфейсе MatlabSimulink. Кроме решения ряда задач, связанных с функционированием одной электростанции, модель позволяет анализировать взаимодействие нескольких АЭС, объединенных в энергосистему.

Математические модели теплообменного оборудования систем регенерации, конденсации и теплофикации энергоблоков АЭС и ТЭС.

В работе [68] создана модель и программа расчетов для системы автоматизированного проектирования группы подогревателей высокого давления (ПВД) системы регенерации АЭС и ТЭС. Разработан пакет прикладных программ теплогидродинамического расчета ПВД для ускорения проектирования и оперативной обработки результатов промышленных испытаний и наладки ПВД в реальных условиях эксплуатации. При гидродинамическом расчете за основу принят метод проектирования на базе типовых моделей. Вся номенклатура ПВД разбита на конечное число типов в соответствии с конструктивными особенностями зон охлаждения пара, конденсации пара и охлаждения конденсата, с каждым из которых связан набор расчетных эмпирических зависимостей. Кроме того,

предусмотрена возможность упрощения модели за счет пренебрежения потерями напора в раздающих и собирающих коллекторах. Эта же модель и программа расчетов может быть также применена для подогревателей сетевой воды теплофикационных установок энергоблоков.

Математические модели для расчета регенеративных и сетевых подогревателей [69, 70], разработанные на основе статистической обработки экспериментальных данных, используют метод группового учета аргументов. Экспериментальные исследования режимов работы теплообменного оборудования энергоблоков, послужившие основой создания модели, показали, что не только на переменных, но и на всех стационарных режимах работы паротурбинных установок наблюдаются колебания параметров и расходов теплоносителей на входе в подогреватели. Такие математические модели и алгоритмы расчетов подогревателей, учитывая реальные физические процессы в них, наряду с предоставляемой статистической информацией могут служить удобным инструментом для анализа их работы и надежности. К сожалению, в работе приводится анализ лишь одного из множества факторов, определяющих работоспособность и надежность работы подогревателей.

В работе [71] представлена методика определения значений минимальных температурных недогревов в подогревателях, обеспечивающих минимум расчетных затрат по станции, для различных схем включения подогревателей. Приводятся эмпирические зависимости, графики и таблицы для выбора оптимальных недогревов и унифицированных поверхностей нагрева с точки зрения экономического эффекта. В программе, созданной для расчета тепловых схем паротурбинных установок, параметры, определяющие эффективность работы подогревателей и систем регенерации и теплофикации, не являются инвариантными при проведении теплогидравлических расчетов.

На ряде ТЭС реализована автоматизированная система контроля состояния теплообменного оборудования [72]. Результаты обработки испытаний хранятся в базе данных и используются для построения моделей, основанных на ретроспективных параметрах, позволяющих проводить анализ динамики состояния оборудования. В этих моделях используются экспертные системы и базы знаний. В системе [72] реализованы элементы диагностики, использующие физико-математические модели для описания причин отклонений параметров работы оборудования от номинальных значений, но обладающие ограниченной применимостью ввиду сложности происходящих в оборудовании тепломассообменных процессов.

Уточненная математическая модель подогревателей [73] и построенный на ее базе алгоритм позволили авторам работ [74] получить аналитические зависимости поправочных коэффициентов к среднелогарифмическому

температурному напору, с помощью которых рассчитывается процесс теплообмена не только в поверхностных регенеративных подогревателях, но и в других аналогичных теплообменных аппаратах паротурбинных установок АЭС – деаэраторах, испарителях, опреснительных установках. Кроме того, данная модель обеспечивает расчет отдельных теплообменных аппаратов в тепловой схеме паротурбинной установки, а также возможность учитывать их взаимное влияние.

Выводы: Приведенный обзор существующих методов, моделей, компьютерных систем и подходов к моделированию функционального состояния основного оборудования энергоблоков АЭС и ТЭС показал их разнородность, проблемно-ориентированную специфику и актуальную необходимость максимально возможной унификации с целью создания автоматизированных систем управления режимами эксплуатации энергоблоков АЭС и ТЭС.

Список литературы: 1. Костенко А. Г. Информационная система «Парогенераторы АЭС» / А. Г. Костенко // 6-й Междунар. семинар по горизонтальным парогенераторам : сб. тез. докл. – Подольск : ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2004. – С. 28. 2. Аверин А. С. Информационно-аналитическая система «Дефектность труб парогенераторов» / А. С. Аверин, И. С. Метальников // 6-й Междунар. семинар по горизонтальным парогенераторам : сб. тез. докл. – Подольск : ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2004. – С. 30. 3. Трунов Н. Б. Исследование теплогидравлических процессов в парогенераторах для АЭС с ВВЭР / Н. Б. Трунов // Теплоэнергетика. – 2006. – № 1. – С. 27–37. 4. Titov V. F. Mathematical simulation of Processes in Horizontal Steam Generators and the Program of Calculation of Its Characteristics / V. F. Titov, V. M. Zorin, V. I. Gorburov // Proceedings of third international seminar on horizontal steam generators. – Finland : – Lappeenranta, 1995. – P. 64–70. 5. Stevanovic V. D. Horizontal steam generator thermal-hydraulics at various steady-state power levels / V. D. Stevanovic, Z. V. Stosic, M. Kiera [et al] // American Society of Mechanical Engineers. – ASME : New York, 2002. – 13 p. 6. Маргулова Т. Х. Совершенствование внутрикорпусных устройств парогенератора ПГВ-1000 / Т. Х. Маргулова, В. М. Зорин, В. И. Горбуров // Теплоэнергетика. – 1988. – № 11. – С. 43–47. 7. Горбуров В. И. Моделирование на ЭВМ гидродинамики водяного объема парогенератора ПГВ-1000 / В. И. Горбуров, В. М. Зорин // Теплоэнергетика. – 1994. – № 5. – С. 22–29. 8. Горбуров В. И. Об организации водного режима в паропроизводящих установках / В. И. Горбуров, В. М. Зорин // Теплоэнергетика. – 2000. – № 6. – С. 41–45. 9. Нугматулин Р. И. Динамика многофазных сред / Р. И. Нугматулин. – М. : Наука, 1987. – 824 с. 10. Beliaev Ju. Modelling Horizontal Steam Generator with ATHLET. Verification of different nodalization schemes and implementation of verified constitutive equations / Ju. Beliaev, W. Luther [et al] // Proceedings of third international seminar on horizontal steam generators. – Finland : Lappeenranta, 1995. – P. 97–106. 11. Сергеев В. В. 3D-модель ПГВ-1000 на основе кода TRAC / В. В. Сергеев, А. А. Казанцев // 6-й Междунар. семинар по горизонтальным парогенераторам : сб. тез. докл. – Подольск : ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2004. – С. 51. 12. Коцарев А. В. Пространственная модель горизонтального парогенератора реактора ВВЭР-1000 в рамках компьютерного кода ATHLET / А. В. Коцарев, С. П. Никонов, Г. Лерхль // 6-й Междунар. семинар по горизонтальным парогенераторам : сб. тез. докл. – Подольск : ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2004. – С. 53. 13. Трунов Н. Б. Верификация программного комплекса STEG на основе теплогидравлического расчета номинального режима работы ПГВ-1000М / Н. Б. Трунов, О. И. Мельхов, Ю. В. Парфенов [и др.] // 6-й Междунар. семинар по горизонтальным парогенераторам : сб. тез. докл. – Подольск : ФГУП ОКБ «ГИДРОПРЕСС», 2004. – С. 53–54. 14. Демченко В. А. Разработка математической модели динамики парогенератора ПГВ-1000 АЭС / В. А. Демченко // Автоматика-97

- : пр. 4-ї Укр. конф. з автоматичного управління. – Черкаси : ЧІТІ, 1997. – Т. I. – С. 20–23. **15. Ubra O.** Horizontal steam generator PGV-1000 thermal-hydraulic analysis / *O. Ubra, M. Doubek* // Proceedings of third international seminar on horizontal steam generators. – Finland : Lappeenranta, 1995. – P. 107–117. **16. Урбан Т. В.** Математическое моделирование теплогидравлических процессов в горизонтальном парогенераторе ПГВ-1000 / *Т. В. Урбан, В. И. Мелухов, О. И. Мелухов* // Теплоэнергетика. – 2002. – № 5. – С. 70–74. **17. Melikov V. L.** Numerical modelling of secondary side thermo hydraulics of horizontal steam generator / *V. L. Melikov [et al]* // Proceedings of third international seminar on horizontal steam generators. – Finland : Lappeenranta, 1995. – P. 249–270. **18. Nadejda K. Todorova** Investigation of spatial coupling aspects for coupled code application in PWR safety analysis / *Nadejda K. Todorova, Kostadin N. Ivanov* // Annals of Nuclear Energy. – 2003. – V. 30, № 2. – P. 189–209. **19. Kolev N.** Simulation of the VVER-1000 pump start-up experiment of the OECD V1000CT benchmark with CATHARE and TRAC-PF1 / *N. Kolev, N. Petrov, B. Ivanov [et al]* // Progress in Nuclear Energy. – 2006. – V. 48, № 8. – P. 922–936. **20. Kozmenkov Y.** Development and Benchmarking of the DYN3D/RELAP5 Code System / *Y. Kozmenkov, Y. Orekhov, U. Grundmann* // Proceedings of Annular Meetings on Nuclear Technology. – Dresden (Germany), 2001. – P. 15–18. **21. Chavez-Mercado J. K.** Allison National Autonomous University of Mexico RELAP/SCDAPSIM-Based Plant Simulation and Training Applications to the Laguna Verde NPP / *J. K. Chavez-Mercado, C. M. Hohorst* // NUTHOS-6 : the 6th International Conference on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety. – Nara, Japan, 2004. – P. ID. N6P307. **22. Teschendorff V.** Methodology, status and plans for development and assessment of the code ATHLET / *V. Teschendorff, H. Austregesio, G. Lerehl* // Proceedings of the OECD/CSNI Workshop on Transient Thermal-Hydraulic and Neutronic Codes Requirements. – Issy-les-Moulineaux, France, 1997. – V. 4. – P. 112–128. **23. Grundmann U.** Coupling of the Thermo-hydraulic Code ATHLET with the Neutron Kinetic Core Model DYN3D / *U. Grundmann, D. Lucas, U. Rohde* // Int. Conf. On Mathematics and Computations, Physics and Environmental Analysis. – Portland, Oregon (USA) : Proc., 1995. – V. 1. – P. 257–263. **24. Крошилин А. Е.** Интегральный программный комплекс для оценки безопасности АЭС / *А. Е. Крошилин, В. Е. Крошилин, А. В. Смирнов [и др.]* // Теплоэнергетика. – 2001. – № 1. – С. 15–21. **25. Veshchunov M. S.** Code Package SVECHA, Modeling of Core Degradation Phenomena at Severe Accidents / *M. S. Veshchunov* // Proceedings of NUREC-7. – 1995. – V. 3. – P. 1914–1929. **26. Крошилин А. Е.** Моделирование экстремальных ситуаций на АЭС с ВВЭР-1000 с помощью пакета расчетных программ БАГИРА-SAM / *А. Е. Крошилин, В. Е. Крошилин, Р. Л. Фукс* // Теплоэнергетика. – 2001. – № 12. – С. 11–17. **27. Веселовский А. Н.** Комплекс программ БАГИРА для моделирования теплогидродинамики многофазных сред / *А. Н. Веселовский, А. Ф. Животягин, С. Д. Калиниченко [и др.]* // Теплоэнергетика. – 1998. – № 5. – С. 11–16. **28. Крошилин А. Е.** Применение программного комплекса БАГИРА для расчетного анализа аварийного режима с малой течью из I контура на стенде ПСБ-ВВЭР / *А. Е. Крошилин, В. Е. Крошилин, А. В. Смирнов* // Теплоэнергетика. – 2006. – № 9. – С. 41–48. **29. Драгунов Ю. Г.** Опыт применения и развитие расчетного кода КОРСАР для обоснования безопасности АЭС с ВВЭР / *Ю. Г. Драгунов, М. А. Бьков, В. А. Василенко [и др.]* // Теплоэнергетика. – 2006. – № 1. – С. 43–47. **30. Василенко В. А.** Опыт создания и основные характеристики теплогидравлического расчетного кода нового поколения КОРСАР / *В. А. Василенко, Ю. А. Мигров, С. Н. Волкова [и др.]* // Теплоэнергетика. – 2002. – № 11. – С. 11–16. **31. Юдов Ю. В.** Замыкающие соотношения теплогидравлической модели расчетного кода КОРСАР / *Ю. В. Юдов, С. Н. Волкова, Ю. А. Мигров* // Теплоэнергетика. – 2002. – № 11. – С. 22–29. **32. Беляев Ю. В.** Численное моделирование аварийных режимов реакторной установки с ВВЭР-1000 с помощью расчетных кодов ТРАП и КОРСАР / *Ю. В. Беляев, С. И. Зайцев, С. Н. Волкова* // Теплоэнергетика. – 2002. – № 11. – С. 62–65. **33. Сейед Моджтаба Дж. Х. С.** Многокритериальный синтез интеллектуальных систем управления энергоблоков АЭС генетическими алгоритмами : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.13.07 / *Сейед Моджтаба Джафари Хенджани* ; Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт». – Харьков, 2010. – 20 с. **34. Калванд А.** Моделирование процессов плавления-солидации при охлаждении расплава корнума погруженными легкоплавкими блоками : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.14 / *Калванд Али* ; Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт». – Киев, 2013. – 19 с. **35. Аум Салем М.** Улучшение эксплуатационных характеристик энергоблоков с водо-водяными реакторами путем оптимизации программы регулирования : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.03 / *Аум Салем Мохаммед* ; Санкт-Петербургский государственный технический университет. – Санкт-Петербург, 2001. – 22 с. **36. Могоддам В. Х.** Теплогидравлические особенности проникновения струи расплава ядерного топлива в подреакторный бассейн с водой в аварийных ситуациях : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.14 / *Могоддам Вахид Хасани* ; Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт». – Киев, 2012. – 22 с. **37. Могоддам А. Х.** Моделирование удержания топлива внутри контейнента во время тяжелых аварий на АЭС : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.14 / *Могоддам Али Хасан* ; Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт». – Киев, 2009. – 19 с. **38. Комаров Ю. А.** Обобщенный риск-ориентированный подход для повышения безопасности и эффективности эксплуатации атомных электростанций : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.14.14 / *Комаров Ю. А.* ; Институт проблем безопасности атомных электростанций Национальной академии наук Украины. – Киев, 2014. – 44 с. **39. Комаров Ю. А.** Развитие риск-ориентированных подходов для повышения безопасности и эффективности эксплуатации атомных электростанций : монография / *Ю. А. Комаров, В. И. Скалозубова*. – Чернобыль : Ин-т проблем безопасности АЭС, 2014. – 288 с. **40. Биллей Д. В.** Риск-ориентированные подходы оптимизации технического обслуживания и эксплуатационного контроля систем, важных для безопасности АЭС : монография / *Д. В. Биллей, С. В. Васильченко, Н. И. Власенко [и др.]*. – Одесса : ТЭС, 2004. – 530 с. **41. Коврижжик Ю. Л.** Оптимизация планирования ремонтов и испытаний систем безопасности атомных электростанций на основе риск-ориентированных подходов : монография / *Ю. Л. Коврижжик, Ю. А. Комаров, В. М. Пышный [и др.]*. – Одесса : ТЭС, 2006. – 383 с. **42. Биллей Д. В.** Развитие и оптимизация систем контроля атомных электростанций с ВВЭР : монография / *Д. В. Биллей, Т. В. Габлая, А. А. Ключников [и др.]*. – Чернобыль : Ин-т проблем безопасности АЭС, 2008. – 512 с. – Режим доступа : http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/40/004/40004147.pdf. – Дата обращения : 30 августа 2015. **43. Скалозубов В. И.** Научно-технические основы мероприятий повышения безопасности АЭС с ВВЭР : монография / *В. И. Скалозубов, А. А. Ключников, Ю. А. Комаров [и др.]*. – Чернобыль : Ин-т проблем безопасности АЭС, 2010. – 200 с. – Режим доступа : http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/42/109/42109584.pdf. – Дата обращения : 30 августа 2015. **44. Комаров Ю. А.** Методы оптимизации испытаний на герметичность системы гермооболочки реакторной установки в период ремонтных кампаний АЭС с ВВЭР-1000 / *Ю. А. Комаров, С. И. Косенко, В. И. Скалозубов [и др.]*. // Проблемы безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. Наук.-техн. збірник. – 2008. – Вып. 9. – С. 15–22. **45. Кольханов В. Н.** К вопросу оптимизации системы контроля концентрации борного раствора на энергоблоках с ВВЭР / *В. Н. Кольханов, Ю. А. Комаров, М. Е. Слюсенко [и др.]* // Ядерная и радиационная безопасность. – 2001. – Т. 4, вып. 1. – С. 44–48. **46. Биллей Д. В.** Математическая модель оптимизации системы контроля концентрации борного раствора теплоносителя реакторных установок / *Д. В. Биллей, В. Г. Соловьев, Ю. А. Комаров [и др.]* // Вестник Харьк. национ. ун-та. Сер.: Ядра, частицы, поля. – 2003. – № 601, вып. 2(22). – С. 123–128. **47. Васильченко В. Н.** Основы применения риск-ориентированных подходов оптимизации регламентов технического обслуживания и ремонта оборудования систем, важных для безопасности / *В. Н. Васильченко, Ю. А. Комаров, В. И. Скалозубов [и др.]* // Ядерная и радиационная безопасность. – 2002. – Т. 5, вып. 2. – С. 56–60. **48. Попырин Л. С.** Автоматизация математического моделирования теплоэнергетических установок / *Л. С. Попырин, В. И. Самусев, В. В. Епельштейн*. – М. : Наука, 1981. – 236 с. **49. Апатовский Л. Е.** Расчет тепловых систем паротурбинных установок с секционированием конденсационного устройства на ЭВМ / *Л. Е. Апатовский, М. З. Кривошей, Г. Г. Пурыгина [и др.]* // Энергомашиностроение. – 1982. – № 2. – С. 5–7. **50. Палагин А. А.** Моделирование функционального состояния и диагностика

турбоустановок / А. А. Палагин, А. В. Ефимов, Е. Д. Меньшикова. – К. : Наук, думка, 1991. – 192 с. **51. Палагин А. А.** Совершенствование технологических характеристик турбоустановок АЭС с помощью математических моделей / А. А. Палагин, А. В. Ефимов, Е. Д. Меньшикова [и др.] // Повышение эффективности и технико-экономическая оптимизация атомных электростанций : сб. науч. тр. – Саратов : Сарат. политехн. ин-т, 1984. – С. 28–32. **52. Палагин А. А.** Имитационный эксперимент на математических моделях турбоустановок / А. А. Палагин, А. В. Ефимов. – К. : Наук, думка, 1986. – 130 с. **53. Єфімов О. В.** Конструкції матеріали, процесірозрахунки реакторів і парогенераторів АЕС / О. В. Єфімов, М. М. Пилипенко. – Х. : Підручник НТУ «ХПІ», 2010. – 268 с. **54. Ефимов А. В.** Разработка имитационной модели энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 для решения задач анализа, управления и диагностики / А. В. Ефимов, Т. В. Потанина // Энергетика : экономика, технологии, экология. – К. : НТУУ «ХПИ», 2006. – № 2 (19). – С. 84–91. **55. Лыхвар Н. М.** Моделирование теплоэнергетических установок с использованием интерактивной схемной графики / Н. М. Лыхвар // Проблемы машиностроения. – 2003. – № 1. – С. 30–41. **56. Северин В. П.** Математическое моделирование систем управления паровой турбиной АЭС и синтез регуляторов методами векторной оптимизации / В. П. Северин, Н. Ю. Северина, О. В. Косовская // Повышение эффективности теплоэнергетического оборудования : тезисы докл. II Науч.-техн. конф. – Иваново : ИЭГУ. – С. 43–45. **57. Кузнецов В. Д.** Моделирование аварийных процессов во втором контуре АЭС с ВВЭР / В. Д. Кузнецов, П. Гейзлар // Труды МЭИ. – 1991. – Вып. 646. – С. 57–62. **58. Кисилев А. И.** Разработка и реализация комплексной модели паротурбинной установки для компьютерного тренажера / А. И. Кисилев // Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности : материалы IV Российской науч.-техн. конф. – Ульяновск : УлГТУ, 2003. – С. 52–57. **59. Рабенко В. С.** Имитационное моделирование управляемого состояния турбоустановки / В. С. Рабенко, А. Л. Виноградов, А. И. Кисилев // Повышение эффективности теплоэнергетического оборудования : тезисы докл. II Науч.-техн. конф. – Иваново : ИЭГУ, 2000. – С. 40–41. **60. Рабенко В. С.** Имитационная математическая модель турбоустановки / В. С. Рабенко, А. И. Кисилев // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. – 2002. – Вып. 1. – С. 86–94. **61. Ефимов А. В.** Критические сжимающие силы и формы потери устойчивости направляющих каналов тепловыделяющих сборок ядерных реакторов ВВЭР-1000 / А. В. Ефимов, М. В. Максимов, Ю. В. Ромашов // Энергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». – Х. : НТУ «ХПІ», 2015. – № 17(1126). – С. 53–56. **62. Ромашов Ю. В.** Оценка ресурса эксплуатации и показателей долговечности теплообменных труб пароперегревателей паровых котлов с учетом сплошной коррозии / Ю. В. Ромашов // Энергетика : экономика, технологии, экология. – 2013. – № 1(32). – С. 103–111. **63. Ромашов Ю. В.** Оценка показателей долговечности теплообменных труб парогенераторов АЭС с ВВЭР на основе непрерывной модели коррозионного растрескивания / Ю. В. Ромашов // Ядерная та радіаційна безпека. – 2012. – № 3(55). – С. 16–20. **64. Prisecaru I.** Saturated steam turbine operation modelling with application at NPP Cernavoda / I. Prisecaru, D. Dupleac // Universitatea «Politehnica» Bucuresti «Buletin stiintific», Ser. : C. – 2006. – V. 68, № 3. – P. 3–14. **65. Пикин М. А.** Расчетные исследования переходных режимов работы второго контура блоков АЭС с ВВЭР с учетом систем управления / М. А. Пикин, Ю. В. Нестеров // Электрические станции. – 2007. – № 3. – С. 16–22. **66. Александров Н. Д.** Оптимизация структурных схем и настроек регуляторов с помощью математических моделей / Н. Д. Александров, Н. И. Давыдов, Ю. В. Нестеров [и др.] // Электрические станции. – 2007. – № 8. – С. 18–23. **67. Huimin Gao** A Detailed Nuclear Power Plant Model for Power System Analysis Based on PSS/E / Gao Huimin, Wang Chao, Pan Wulue // Power Systems Conference and Exposition. – 2006. – P. 1582–1586. **68. Каневец Г. Е.** Автоматизация проектирования и оптимизация теплообменного оборудования систем регенерации турбоустановок для ТЭС и АЭС / Г. Е. Каневец, В. С. Новопавловский, Б. Н. Шпунгин // Энергетическое машиностроение. – 1985. – Вып. 5. – 24 с. **69. Ильченко О. Т.** Экспериментальное исследование нестационарных процессов в турбоустановках ТЭС и АЭС / О. Т. Ильченко, А. В. Борисенко, О. Ю. Черноусенко // Проблемы машиностроения. – 1998. – Т. 2, № 3–4. – С. 16–20.

70. Борисенко А. В. Об особенностях переноса тепла от греющего пара к трубной системе регенеративного подогревателя / А. В. Борисенко // Нац. техн. ун-т Украины «Киевский политехнический институт». – К., 1996. – № 504. – 12 с. **71. Крылов Ю. Ю.** Оптимизация величин поверхностей нагрева регенеративных подогревателей турбоустановок на насыщенном паре : автореф. дис. ... канд. техн. наук / Крылов Ю. Ю. – М., 1989. – 19 с. **72. Бродов Ю. М.** Система диагностики теплообменного оборудования турбоустановок / Ю. М. Бродов, К. Э. Аронсон, М. А. Ниренштейн [и др.] // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования : сб. науч. тр. – Х. : ИПМаш НАН Украины, 1997. – С. 87–90. **73. Переверзев Д. А.** Моделирование, алгоритмизация и программирование проектно-исследовательских работ, обоснование применения и оптимизация теплообменников турбоустановок / Д. А. Переверзев, А. Н. Ганжа, А. Г. Лебедев // Совершенствование турбоустановок методами математического и физического моделирования : сб. науч. тр. Междунар. науч.-техн. конф. – Х. : ИПМаш НАН Украины, 2000. – С. 31–34. **74. Ганжа А. Н.** Пароводяные теплообменники энергоустановок ТЭС и АЭС / А. Н. Ганжа. – Х. : НТУ «ХПИ», 2002. – 169 с.

Bibliography (transliterated): 1. Kostenko, A. G. "Informacionnaja sistema (parogeneratory AJeS)." 6-j Mezhdunar. seminar po gorizontaln'nyj parogeneratoram : sb. tez. dokl. Podolsk : FGUP OKB «GIDROPRESS», 2004. 28. Print. 2. Averin, A. S., and I. S. Metal'nikov. "Informacionno-analiticheskaja sistema «Defektnost' trub parogeneratorov»." 6-j Mezhdunar. seminar po gorizontaln'nyj parogeneratoram : sb. tez. dokl. Podolsk : FGUP OKB «GIDROPRESS», 2004. 30. Print. 3. Trunov, N. B. "Issledovanie teplogidravlicheskih processov v parogeneratorah dlja AJeS s VVJeR." *Teplojenergetika*. No. 1. 2006. 27–37. Print. 4. Titov, V. F., V. M. Zorin and V. I. Gorburov. "Mathematical simulation of Processes in Horizontal Steam Generators and the Program of Calculation of Its Characteristics." *Proceedings of third international seminar on horizontal steam generators*. Finland : Lappeenranta, 1995. 64–70. Print. 5. Stevanovic, V. D., et al. "Horizontal steam generator thermal-hydraulics at various steady-state power levels." *American Society of Mechanical Engineers*. ASME : New York, 2002. Print. 6. Margulova, T. X., V. M. Zorin and V. I. Gorburov. "Sovershenstvovanie vnutrikorpusnyh ustrojstv parogenerators PGV-1000." *Teplojenergetika*. No. 11. 1988. 43–47. Print. 7. Gorburov, V. I., and V. M. Zorin. "Modelirovanie na JeVM gidrodinamiki vodjanogo obshema parogenerators PGV-1000." *Teplojenergetika*. No. 5. 1994. 22–29. Print. 8. Gorburov, V. I., and V. M. Zorin. "Ob organizacii vodnogo rezhima v paroproizvodjashih ustanovkah." *Teplojenergetika*. No. 6. 2000. 41–45. Print. 9. Nigmatulin, R. I. *Dinamika mnogofaznyh sred*. Moscow : Nauka, 1987. Print. 10. Beliaev, Ju., et al. "Modelling Horizontal Steam Generator with ATHLET. Verification of different nodalization schemes and implementation of verified constitutive equations." *Proceedings of third international seminar on horizontal steam generators*. Finland : Lappeenranta, 1995. 97–106. Print. 11. Sergeev, V. V., and A. A. Kazancev. "ZD-model' PGV-1000 na osnove koda TRAC." 6-j Mezhdunar. seminar po gorizontaln'nyj parogeneratoram : sb. tez. dokl. – Podolsk : FGUP OKB «GIDROPRESS», 2004. 51. Print. 12. Kocarev, A. V., S. P. Nikonov and G. Lerhl. "Prostranstvennaja model' gorizontaln'no parogenerators reaktora VVJeR-1000 v ramkah komp'juternogo koda ATHLET." 6-j Mezhdunar. seminar po gorizontaln'nyj parogeneratoram : sb. tez. dokl. Podolsk : FGUP OKB «GIDROPRESS», 2004. 53. Print. 13. Trunov, N. B., et al. "Verifikacija programmno kompleksa STEG na osnove teplogidravlichesko rasceta nominal'nogo rezhima raboty PGV-1000M." 6-j Mezhdunar. seminar po gorizontaln'nyj parogeneratoram : sb. tez. dokl. Podolsk : FGUP OKB «GIDROPRESS», 2004. 53–54. Print. 14. Demchenko, V. A. "Razrabotka matematicheskoj modeli dinamiki parogenerators PGV-1000 AJeS." *Avtomatika-97 : pr. 4-i Ukr. konf. z avtomatichnogo upravlinnja*. Cherkassy : ChIT1, 1997. No. 1. 20–23. Print. 15. Ubra, O., and M. Doubek. "Horizontal steam generator PGV-1000 thermal-hydraulic analysis." 7 *Proceedings of third international seminar on horizontal steam generators*. Finland : Lappeenranta, 1995. 107–117. Print. 16. Urban, T. V., B. I. Melihov and O. I. Melihov. "Matematicheskoe modelirovanie teplogidravlicheskih processov v gorizontaln'nom parogenerator PGV-1000." *Teplojenergetika*. No. 5. 2002. 70–74. Print. 17. Melikov, V. L., et al. "Numerical modelling of secondary side thermo hydraulics of horizontal steam generator."

- Proceedings of third international seminar on horizontal steam generators.* Finland : Lappeenranta, 1995. 249–270. Print.
- 18.** Todorova, Nadejda K., and Kostadin N. Ivanov. "Investigation of spatial coupling aspects for coupled code application in PWR safety analysis." *Annals of Nuclear Energy.* No. 30.2. 2003. 189–209. Print.
- 19.** Kolev, N., et al. "Simulation of the VVER-1000 pump start-up experiment of the OECD V1000CT benchmark with CATHARE and TRAC-PF1." *Progress in Nuclear Energy.* No. 48.8. 2006. 922–936. Print.
- 20.** Kozmenkov, Y., Y. Orekhov and U. Grundmann. "Development and Benchmarking of the DYN3D/RELAP5 Code System." *Proceedings of Annular Meetings on Nuclear Technology.* Dresden (Germany), 2001. 15–18. Print.
- 21.** Chavez-Mercado, J. K., and S. M. Hohorst. "Allison National Autonomous University of Mexico RELAP/SCDAPSIM-Based Plant Simulation and Training Applications to the Laguna Verde NPP." *NUTHOS-6 : the 6th International Conference on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations and Safety.* – Nara, Japan, 2004. ID. N6P307. Print.
- 22.** Teschendorff, V., H. Austregesio and G. Lerehl. "Methodology, status and plans for development and assessment of the code ATHLET." *Proceedings of the OECD/CSNI Workshop on Transient Thermal-Hydraulic and Neutronic Codes Requirements.* Issy-les-Moulineaux, France, 1997. No. 4. 112–128. Print.
- 23.** Grundmann, U., D. Lucas and U. Rohde. "Coupling of the Thermohydraulic Code ATHLET with the Neutron Kinetic Core Model DYN31." *Int. Conf. On Mathematics and Computations, Physics and Environmental Analysis.* Portland, Oregon (USA) : Proc., 1995. No. 1. 257–263. Print.
- 24.** Kroshilin, A. E., et al. "Integral'nyj programnyj kompleks dlja ocenki bezopasnosti AJeS." *Teplojenergetika.* No. 1. 2001. 15–21. Print.
- 25.** Veshchunov, M. S. "Code Package SVECHA, Modeling of Core Degradation Phenomena at Severe Accidents." *Proceedings of NUREC-7.* No. 3. 1995. 1914–1929. Print.
- 26.** Kroshilin, A. E., V. E. Kroshilin and R. L. Fuks. "Modelirovanie jekstremal'nyh situacij na AJeS s VVJeR-1000 s pomoshh'ju paketa raschetnyh programm BAGIRA-SAM." *Teplojenergetika.* No. 12. 2001. 11–17. Print.
- 27.** Veselovskij, A. N., et al. "Kompleks programm BAGIRA dlja modelirovanija teplogidrodinamiki mnogofaznyh sred." *Teplojenergetika.* No. 5. 1998. 11–16. Print.
- 28.** Kroshilin, A. E., V. E. Kroshilin and A. V. Smirnov. "Primenenie programmnogo kompleksa BAGIRA dlja raschetnogo analiza avarijnogo rezhima s maloj tech'ju iz I kontura na stende PSB-VVJeR." *Teplojenergetika.* No. 9. 2006. 41–48. Print.
- 29.** Dragunov, Ju. G., et al. "Opyt primeneniya i razvitiya raschetnogo koda KORSAR dlja obosnovaniya bezopasnosti AJeS s VVJeR." *Teplojenergetika.* No. 1. 2006. 43–47. Print.
- 30.** Vasilenko, V. A., et al. "Opyt sozdaniya i osnovnye harakteristiki teplogidravlichesko raschetnogo koda novogo pokoleniya KORSAR." *Teplojenergetika.* No. 11. 2002. 11–16. Print.
- 31.** Judov, Ju. V., S. N. Volkova and Ju. A. Migrov. "Zamykajushhie sootnosheniya teplogidravlicheskoj modeli raschetnogo koda KORSAR." *Teplojenergetika.* No. 11. 2002. 22–29. Print.
- 32.** Beljaev, Ju. V., S. I. Zajcev and S. N. Volkova. "Chislennoe modelirovanie avarijnyh rezhimov reaktornoj ustanovki s VVJeR-1000 s pomoshh'ju raschetnyh kodov TRAP i KORSAR." *Teplojenergetika.* No. 11. 2002. 62–65. Print.
- 33.** Sejed Modzhtaba, Dzh. H. S. *Mnogokriterial'nyj sintez intellektual'nyh sistem upravleniya jenergloblokov AJeS geneticheskimi algoritmami.* Avtoref. dys. na zdobuttja nauk. stupenja d-ra tehn. nauk. Kharkov, 2010. Print.
- 34.** Kalvand, A. *Modelirovanie processov plavljenija-solidifikacii pri ohlazhdenii rasplava koriuma pogrzhennymi legkoplavkimi blokami.* Avtoref. dys. na zdobuttja nauk. stupenja d-ra tehn. nauk. Kiev, 2013. Print.
- 35.** Ait Salem, M. *Uluchshenie jekspluacionnyh harakteristik jenergloblokov s vodo-vodjanyimi reaktorami putem optimizacii programmy regulirovanija.* Avtoref. dys. na zdobuttja nauk. stupenja d-ra tehn. nauk. Saint-Petersburg, 2001. Print.
- 36.** Mogaddam, V. H. *Teplogidravlicheskie osobennosti proniknovenija strui rasplava jadernogo topliva v podreaktornyj bassejn s vodoj v avarijnyh situacijah.* Avtoref. dys. na zdobuttja nauk. stupenja d-ra tehn. nauk. Kiev, 2012. Print.
- 37.** Mogaddam, A. H. *Modelirovanie uderzhanija topliva vnutri kontejnmenta vo vremja tjazhelyh avarij na AJeS.* Avtoref. dys. na zdobuttja nauk. stupenja d-ra tehn. nauk. Kiev, 2009. Print.
- 38.** Komarov, Ju. A. *Obobshhennyj risk-orientirovannyj podhod dlja povysheniya bezopasnosti i jeffektivnosti jekspluacii atomnyh jelektrostantsij.* Avtoref. dys. na zdobuttja nauk. stupenja d-ra tehn. nauk. Kiev, 2014. Print.
- 39.** Komarov, Ju. A., and V. I. Skalozubova. *Razvitiye risk-orientirovannyh podhodov dlja povysheniya bezopasnosti i jeffektivnosti jekspluacii atomnyh jelektrostantsij.* Chernobyl : In-t problem bezopasnosti AJeS, 2014. Print.
- 40.** Billej, D. V., et al. *Risk-orientirovannye podhody optimizacii tehničeskogo obsluzhivaniya i jekspluacionnogo kontrolja sistem, vaznyh dlja bezopasnosti AJeS.* Odessa : TJeS, 2004. Print.
- 41.** Kovrizhkin, Ju. L., et al. *Optimizacija planirovanija remontov i ispytanij sistem bezopasnosti atomnyh jelektrostantsij na osnove risk-orientirovannyh podhodov.* Odessa : TJeS, 2006. Print.
- 42.** Billej, D. V., et al. *Razvitiye i optimizacija sistem kontrolja atomnyh jelektrostantsij s VVJeR.* Chernobyl : In-t problem bezopasnosti AJeS, 2008. Web. 30 August 2015. <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/40/004/40004147.pdf>.
- 43.** Skalozubov, V. I., et al. *Nauchno-tehnicheskie osnovy meroprijatij povysheniya bezopasnosti AJeS s VVJeR.* Chernobyl : In-t problem bezopasnosti AJeS, 2010. Web. 30 August 2015. <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/42/109/42109584.pdf>.
- 44.** Komarov, Ju. A., et al. "Metody optimizacii ispytanij na germetičnost' sistemy germoobolochki reaktornoj ustanovki v period remontnyh kampanij AJeS s VVJeR-1000." *Problemi bezpeki atomnih jelektrostantsij i Chornobilja.* Nauk.-tehn. zbirnik. No. 9. 2008. 15–22. Print.
- 45.** Kolyhanov, V. N., et al. "K voprosu optimizacii sistemy kontrolja koncentracii bornogo rastvora na jenergloblokah s VVJeR." *Jadernaja i radiacionnaja bezopasnost'.* No. 4.1. 2001. 44–48. Print.
- 46.** Billej, D. V., et al. "Matematicheskaja model' optimizacii sistemy kontrolja koncentracii bornogo rastvora teplonositelja reaktivnyh ustanovok." *Vestnik Har'k. nacjon. un-ta. Ser.: Jadra, chasticy, polja.* No. 601.2(22). 2003. 123–128. Print.
- 47.** Vasil'chenko, V. N., et al. "Osnovy primeneniya risk-orientirovannyh podhodov optimizacii reglamentov tehničeskogo obsluzhivaniya i remonta oborudovaniya sistem, vaznyh dlja bezopasnosti." *Jadernaja i radiacionnaja bezopasnost'.* No. 5.2. 2002. 56–60. Print.
- 48.** Popyrin, L. S., V. I. Samusev and V. V. Jepel'shtejn. *Avtomatizacija matematicheskogo modelirovanija teplojenergetičeskijh ustanovok.* Moscow : Nauka, 1981. Print.
- 49.** Apatovskij, L. E., et al. "Raschet teplovyh sistem paroturbinnnyh ustanovok s sekcionirovaniem kondensacionnogo ustrojstva na JeVM." *Jenergomashinostroenie.* No. 2. 1982. 5–7. Print.
- 50.** Palagin, A. A., A. V. Efimov and E. D. Men'shikova. *Modelirovanie funkcional'nogo sostojanija i diagnostika turboustanovok.* Kiev : Nauk. dumka, 1991. Print.
- 51.** Palagin, A. A., et al. "Sovershenstvovanie tehničeskijh harakteristik turboustanovok AJeS s pomoshh'ju matematicheskijh modelej." *Povyshenie jeffektivnosti i tehniko-jekonomicheskaja optimizacija atomnyh jelektrostantsij : sb. nauch. tr. – Saratov : Sarat. politehn. in-t, 1984. 28–32. Print.*
- 52.** Palagin, A. A., and A. V. Efimov. *Imitacionnyj jeksperiment na matematicheskijh modeljah turboustanovok.* Kiev : Nauk. dumka, 1986. Print.
- 53.** Efimov, O. V., and M. M. Pilipenko. *Konstrukcii materialy, processirozrahunki reaktivov i parogeneratoriv AES.* Kharkiv : Pidručnik NTU «HPI», 2010. Print.
- 54.** Efimov, A. V., and T. V. Potanina. "Razrabotka imitacionnoj modeli jenerglobloka AJeS s VVJeR-1000 dlja reshenija zadach analiza, upravlenija i diagnostiki." *Energetika : ekonomika, tehnologii, ekologija.* Kyiv : NTUU «KPI», 2006. No. 2(19). 84–91. Print.
- 55.** Lyhvar, N. M. "Modelirovanie teplojenergetičeskijh ustanovok s ispol'zovaniem interaktivnoj shemnoj grafiki." *Problemy mashinostroenija.* No. 1. 2003. 30–41. Print.
- 56.** Severin, V. P., N. Ju. Severina and O. B. Kosovskaja. "Matematicheskoe modelirovanie sistem upravlenija parovoj turbinoj AJeS i sintez reguljatorov metodami vektornoj optimizacii." *Povyshenie jeffektivnosti teplojenergetičeskogo oborudovaniya : tezisy dokl. II Nauch.-tehn. konf.* Ivanovo : IJeGU. 43–45. Print.
- 57.** Kuznecov, V. D., and P. Gejzlar. "Modelirovanie avarijnyh processov vo vtorom konture AJeS s VVJeR." *Trudy MJeI.* No. 646. 1991. 57–62. Print.
- 58.** Kisilev, A. I. "Razrabotka i realizacija kompleksnoj modeli paroturbinnnoj ustanovki dlja komp'juternogo trenazhera." *Jenergosberezenie v gorodskom hozjajstve, jenergetike, promyshlennosti : materialy IV Rossijskoj nauch.-tehn. konf.* Ulyanovsk : UIGTU, 2003. 52–57. Print.
- 59.** Rabenko, V. S., A. L. Vinogradov and A. I. Kisilev. "Imitacionnoe modelirovanie upravljajemogo sostojanija turboustanovki." *Povyshenie jeffektivnosti teplojenergetičeskogo oborudovaniya : tezisy dokl. II Nauch.-tehn. konf.* Ivanovo : IJeGU, 2000. 40–41. Print.
- 60.** Rabenko, V. S., and A. I. Kisilev. "Imitacionnaja matematicheskaja model' turboustanovki." *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo jenergetičeskogo universiteta.* No. 1. 2002. 86–94. Print.
- 61.** Efimov, A. V., M. V. Maksimov and Ju. V. Romashov. "Kritičeskie szhimajushhie sily i formy poteri ustojčivosti napravljajushhijh kanalov teplovodjajushhijh sborok jaderny reaktorov VVJeR-1000." *Energetični ta teplotehnični procesi j ustakuvannja.* *Visnik Nacional'nogo tehničeskogo universitetu «Harkivs'kij politehničnij institut».* Kharkiv : NTU "HPI", 2015. No. 17(1126). 53–56. Print.
- 62.** Romashov, Ju. V. "Ocenka resursa jekspluacii i pokazatelej dolgovečnosti teploobmennyh trub paroperegrevatelej parovyh kotlov s uchetom splošnoj korrozii." *Energetika : ekonomika,*

tehnologii, ekologija. No. 1(32). 2013. 103–111. Print. 63. Romashov, Ju. V. "Ocenka pokazatelej dolgovechnosti teploobmennih trub parogeneratorov AJeS s VVJeR na osnove kontinual'noj modeli korrozionnogo rastreskivaniya." *Jaderna ta radiacijna bezpeka*. No. 3(55). 2012. 16–20. Print. 64. Prisecaru, I., and D. Dupleac. "Saturated steam turbine operation modelling with application at NPP Cernavoda." *Universitatea «Politehnica» Bucuresti «Buletinstiintific», Ser. : C*. No. 68.3. 2006. 3–14. Print. 65. Pikin, M. A., and Ju. V. Nesterov. "Raschetnye issledovanija perehodnyh rezhimom raboty vtorogo kontura blokov AJeS s VVJeR s uchetom sistem upravlenija." *Jelektricheskie stancii*. No. 3. 2007. 16–22. Print. 66. Aleksandrov, N. D., et al. "Optimizacija strukturnyh shem i nastroek reguljatorov s pomoshhju matematicheskikh modelej." *Jelektricheskie stancii*. No. 8. 2007. 18–23. Print. 67. Huimin, Gao, Wang Chao and Pan Wulue. "A Detailed Nuclear Power Plant Model for Power System Analysis Based on PSS/E." *Power Systems Conference and Exposition*. 2006. 1582–1586. Print. 68. Kanevec, G. E., V. S. Novopavlovskij and B. N. Shpungin "Avtomatizacija proektirovanija i optimizacijateploobmennogo oborudovanija sistem regeneracii turboustanovok dlja TJeS i AES." *Jenergeticheskoe mashinostroenie*. No. 5. 1985. Print. 69. Il'chenko, O. T., A. V. Borisenko and O. Ju. Chernousenko. "Jeksperimental'noe issledovanie nestacionarnyh

processov v turboustanovkah TJeS i AJeS." *Problemy mashinostroenija*. No. 2.3–4. 1998. 16–20. Print. 70. Borisenko, A. V. "Ob osobennostjah perenosa tepla ot grejushhego para k trubnoj sisteme regenerativnogo podogrevatelja." *Nac. tehn. un-t Ukrainy «Kievskij politehnicheskij institut»*. Kiev, 1996. No. 504. Print. 71. Krylov, Ju. Ju. *Optimizacija velichin poverhnostej nagreva regenerativnyh podogrevatelej turboustanovok na насыshhenom pare. Avtoref. dys. na zdobuttja stupenja kand. tehn. nauk*. Moscow, 1989. Print. 72. Brodov, Ju. M., et al. "Sistema diagnostiki teploobmennogo oborudovanija turboustanovok." *Sovershenstvovanie turboustanovok metodami matematicheskogo i fizicheskogo modelirovanija : sb. nauch. tr.* Kharkov : IPMash NAN Ukrainy, 1997. 87–90. Print. 73. Pereverzev, D. A., A. N. Ganzha and A. G. Lebedev. "Modelirovanie, algoritimizacija i programmirovanie proektno-issledovatel'skih rabot, obosnovanie primenenie i optimizacija teploobmennikov turboustanovok." *Sovershenstvovanie turboustanovok metodami matematicheskogo i fizicheskogo modelirovanija : sb. nauch. tr. Mezhdunar. nauch.-tehn. konf.* Kharkov : IPMash NAN Ukrainy, 2000. 31–34. Print. 74. Ganzha, A. N. *Parovodjanye teploobmenniki jenergoustanovok TJeS i AJeS*. Kharkov : NTU «KhPI», 2002. Print.

Поступила (received) 18.09.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кухтин Дмитрій Ігоревич – аспірант, Національний технічний університет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков; тел.: (068) 601-31-66; e-mail: kuhtindc@yandex.ua.

Kukhtin Dmitriy Igorevich – Postgraduate Student, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov; tel.: (068) 601-31-66; e-mail: kuhtindc@yandex.ua.

Ефимов Александр Вячеславович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харьковский политехнический институт», завідує кафедрою «Парогенераторостроение», г. Харьков; тел.: (057) 707-65-55; e-mail: LabSGB(a)kpi.kharkov.ua.

Yefimov Alexander V. – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Head of the Department of "Steam generator boiler", Kharkov; tel.: (057) 707-65-55; e-mail: LabSGB(a)kpi.kharkov.ua.

Потанина Татьяна Владимировна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедри «Парогенераторостроение», г. Харьков; тел.: (057) 707-66-10; e-mail: LabSGB(a)kpi.kharkov.ua.

Potanina Tatiana V. – Candidate of Technical Sciences (Ph. D), Docent, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Associate Professor at the Department of "Steam generator boiler", Kharkov; tel.: (057) 707-66-10; e-mail: LabSGB(a)kpi.kharkov.ua.

Гаркуша Татьяна Анатольевна – Національний технічний університет «Харьковский политехнический институт», научный сотрудник кафедры «Парогенераторостроения», г. Харьков; тел.: (057) 707-66-10; e-mail: LabSGB(a)kpi.kharkov.ua.

Garkusha Tatiana A. – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Research Officer at the Department of "Steam generator boiler", Kharkov; tel.: (057) 707-66-10; e-mail: LabSGB(a)kpi.kharkov.ua.