

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-107-116
УДК 621.039.5

В.П. Балабин¹, М.А. Камнев², Н.Л. Кучин¹, О.В. Тюриков², А.М. Хизбуллин²

¹ ФГУП «Крыловский государственный научный центр», Санкт-Петербург, Россия

² АО «Опытное Конструкторское Бюро Машиностроения им. И.И. Африкантова», Нижний Новгород, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОТИВОАВАРИЙНЫХ СИСТЕМ СНИЖЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКЕ РЕАКТОРНЫХ УСТАНОВОК АТОМНЫХ ОБЪЕКТОВ МОРСКОЙ ТЕХНИКИ

Объект и цель научной работы. Объектом исследования являются спринклерная и барботажная подсистемы противоаварийной системы снижения давления в защитной оболочке (ССАД ЗО) реакторных установок (РУ) атомных объектов морской техники. Цель экспериментальных исследований – обоснование эффективности противоаварийных систем в условиях, близких к реализуемым при развитии аварии с потерей теплоносителя. Цель расчетных исследований – численное моделирование работы подсистем ССАД ЗО и верификация моделей спринклерной системы, барботажного устройства и теплообменника, включенных в состав расчетного кода.

Материалы и методы. Исследования проведены с использованием крупномасштабного стенда СПОТ ЗО и атмосферного стенда БМ 1088. Для численного моделирования работы подсистем ССАД ЗО применен код сосредоточенных параметров КУПОЛ-МТ. Выполнены претестовый и посттестовый анализ экспериментов на стенде СПОТ ЗО, а также верификация находящихся в составе расчетного кода моделей спринклерной системы, барботажного устройства и теплообменника.

Основные результаты. Выполнены исследования параметров четырех типов форсунок (спринклеров). Определены расходные и дисперсионные характеристики форсунок, радиус и высота границы факела, диаметр, объем и количество капель в различных сечениях по радиусам сектора. По результатам выполненных экспериментальных исследований определены мощностные характеристики спринклерной системы с учетом применения форсунок различного типа; проведены исследования совместной работы барботажной, спринклерной и конденсационной подсистем ССАД ЗО. Для этой цели дополнительно исследована работа барботажной (барботаж и пропуск пара) и конденсационной подсистем (работа теплообменника). С использованием кода КУПОЛ-МТ проведены расчеты параметров в ЗО при работе ССАД применительно к перспективным РУ блочного и интегрального типов.

Заключение. Результаты выполненных экспериментальных исследований показали эффективность спринклерных форсунок при авариях с потерей теплоносителя первого контура РУ и были использованы для верификация кода КУПОЛ-МТ.

Ключевые слова: аварии с разрывом трубопровода первого контура ЯЭУ, защитная оболочка ЯЭУ, противоаварийные системы снижения давления, спринклерная, барботажная и конденсационные подсистемы, форсунка (спринклер), эффективность противоаварийных подсистем снижения давления, КУПОЛ-МТ.

Авторы заявляют об отсутствии возможных конфликтов интересов.

DOI: 10.24937/2542-2324-2018-4-386-107-116
UDC 621.039.5

V. Balabin¹, M. Kamnev², N. Kuchin¹, O. Tyurikov², A. Khizbullin²

¹ Krylov State Research Center, St. Petersburg, Russia

² JSC Afrikantov Experimental Design Bureau for Mechanical Engineering, Nizhny Novgorod, Russia

Для цитирования: Балабин В.П., Камнев М.А., Кучин Н.Л., Тюриков О.В., Хизбуллин А.М. Исследование эффективности противоаварийных систем снижения давления в защитной оболочке реакторных установок атомных объектов морской техники. Труды Крыловского государственного научного центра. 2018; 386(4): 107–116.

For citations: Balabin V., Kamnev M., Kuchin N., Tyurikov O., Khizbullin A. Efficiency of emergency depressurization systems for marine nuclear reactor containments. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018; 386(4): 107–116 (in Russian).

EFFICIENCY OF EMERGENCY DEPRESSURIZATION SYSTEMS FOR MARINE NUCLEAR REACTOR CONTAINMENTS

Object and purpose of research. This paper studies sprinkler and barbotage components in emergency depressurization systems of marine power plants. The purpose of this study was to confirm their efficiency in the conditions close to LOCA event, and numerical simulations were intended to study operation of above-mentioned subsystems, as well as verify the models of sprinkler system, barbotage device and heat exchanger implemented in the software.

Materials and methods. The studies were performed at SPOT ZO large-scale test rig and atmospheric test rig BM 1088. Numerical simulation of sprinkler and barbotage subsystems was performed with help of concentrated-parameter code implemented in KUPOL-MT software. Pre-test and post-test parameters of experiments at SPOT ZO test rig were carefully analysed, and above-mentioned software models of sprinkler system, barbotage device and heat exchanger software models have been successfully verified.

Main results. The study was performed for four types of sprinklers (sprayers), with determination of their flow rate, dispersion performance, radius and height of plume boundary, diameter, volume and number of droplets in various sections at the radii of sector. These results were used to calculate sprinkler system capacity depending on sprinkler type. Joint operation of barbotage sprinkler and condenser subsystems has also been studied. To this effect, an additional investigation was performed on barbotage system (to obtain barbotage and steam penetration data) and condenser system (to have more details on heat exchanger operation). KUPOL-MT code was used to calculate containment parameters (with operating emergency depressurization systems) for new designs of modular and integrated reactors.

Conclusion. The results of this study have proven the efficiency of sprinklers in LOCA event management and were used to verify KUPOL-MT code.

Keywords: LOCA, containment, emergency depressurization systems, sprinkler, barbotage, condensation subsystems, sprayer, efficiency of emergency depressurization subsystems, KUPOL-MT.

Authors declare lack of the possible conflicts of interests.

Введение

Introduction

Развитие и безопасная эксплуатация реакторных установок (РУ) атомных объектов морской техники (АОМТ) обеспечивается, в том числе, за счет применения современных и эффективных систем безопасности, выполняющих свои функции в аварийных режимах с целью сохранения целостности ЗО – последнего барьера безопасности на пути выхода радиоактивных продуктов в окружающую среду. В АО «ОКБМ «Африкантов» совместно со специалистами ФГУП «Крыловский государственный научный центр» проведена работа, целью которой являлась разработка высокоэффективных спринклерных систем для РУ АОМТ. Задачи работы включали исследование структуры спринклерного потока форсунок различного типа, оценку влияния спринклерного потока на среду в ЗО, верификацию математических моделей и расчетных кодов, разработку эффективных алгоритмов управления аварией с использованием спринклерной системы.

В рамках данной работы на экспериментальной площадке ОКБМ «Африкантов» с использованием крупномасштабного стенда СПОТ ЗО

и атмосферного стенда БМ 1088 был проведен комплекс исследований, включающий в себя более 30 экспериментальных режимов. Цель исследований состояла в обосновании эффективности противоаварийных систем в условиях, близких к реализуемым при развитии аварии с потерей теплоносителя. В задачи работ входило определение мощностных характеристик спринклерной системы с учетом применения форсунок различного типа, а также исследование совместной работы барботажной, спринклерной и конденсационной подсистем ССАД ЗО. Для этого дополнительно проводились исследования работы барботажной (барботажа и проскок пара) и конденсационной подсистем (работа теплообменника).

Одна из возможных конструкций ССАД ЗО, предусматривающая совместное использование спринклерной и барботажной подсистем, рассмотрена в [1].

Численное моделирование работы подсистем ССАД ЗО проводится с использованием кода сосредоточенных параметров КУПОЛ-МТ. Задачи расчетных исследований включают пре- и постестовый анализ экспериментов на стенде СПОТ ЗО и верификацию моделей спринклерной системы, барботажного устройства и теплообменника

в составе расчетного кода. С использованием кода КУПОЛ-МТ проведены расчеты параметров в 30 при работе ССАД применительно к перспективным РУ блочного и интегрального типов.

Объект исследований

Test object

Объектом экспериментальных исследований на стендах являлась форсунка (спринклер). Исследовались четыре типа форсунок (рис. 1): форсунки с полым конусом факела, обеспечивающие мелко- и среднедисперсный распыл (условное обозначение ДФ [2], ТН [3]), и форсунки с заполненным конусом факела, обеспечивающие средне- и крупнодисперсный распыл (условное обозначение МФ [2] и ТС [3]).

Исследования на атмосферном стенде

Studies at atmospheric test rig

Исследования спектральных характеристик различных типов форсунок были проведены на атмосферном стенде БМ 1088, схематично представленном на рис. 2. Стенд имеет следующие технические характеристики:

- в качестве рабочей среды используется техническая вода;
- давление воды в трассе – до 6 кгс/см^2 ;
- расход воды на форсунку – $0\text{--}2 \text{ м}^3/\text{ч}$;
- температура воды в стенде – около $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

В ходе экспериментов производилась видеосъемка капельного потока и измерялся расход воды на форсунку, давление воды в трассе, радиус границы факела, высота границы факела, масса воды, удельный расход воды на единицу поверхности и расход воды в различных сечениях по радиусам. Данные, полученные в результате видеосъемки, обрабатывались с помощью специализированного программного обеспечения, что позволило определить скорость, угол падения, диаметр, объем и количество капель в различных сечениях по радиусам сектора (рис. 3).

Результаты испытаний на атмосферном стенде показали, что диапазон диаметра капель спринклерного потока форсунок составляет $0,2\text{--}1,9 \text{ мм}$. При этом основная доля капель имеет размер $0,6\text{--}0,9 \text{ мм}$. Согласно полученным расходным характеристикам размеры факела форсунок не превышают диаметра емкости-модели 30 стенда СПОТ 30. Следовательно, на последующих «горячих» испы-



Рис. 1. Исследованные форсунки (слева направо ТС, ТН, ДФ, МФ)

Fig. 1. Types of sprinklers investigated in this study (left to right: TS, TN, DF, MF)

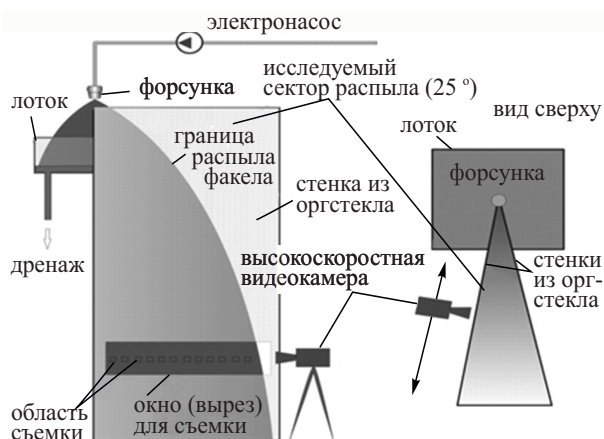


Рис. 2. Схема атмосферного стенда

Fig. 2. Layout of atmospheric test rig

таниях форсунок на стенде СПОТ 30 исключается контакт капель спринклерного потока со стенками и их испарение.

Описание стенда СПОТ 30

Description of SPOT ZO test rig

Для исследования эффективности работы спринклерной системы была проведена модернизация существующего стенда СПОТ 30 с разработкой необходимой расчетно-конструкторской документации. Экспериментальный стенд СПОТ 30 оснащен современной информационной системой с компьютерной обработкой поступающей информации. Схема экспериментального стенда СПОТ 30 для исследования эффективности работы спринклерной системы представлена на рис. 4. Исследования выполнялись с целью обоснования эффек-

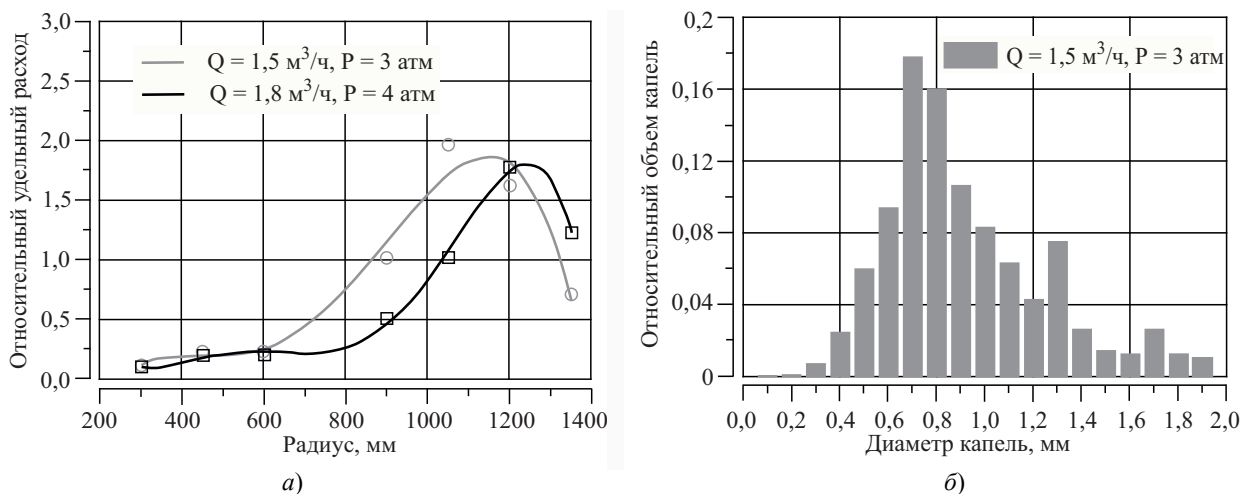


Рис. 3. Распределение относительного удельного расхода по радиусам конуса (а) и спектра капель по размерам (б) для форсунки ТН

Fig. 3. Distribution of relative specific flow rate by cone radii (a) and size distribution of droplets in the spectrum (b) for TN sprinkler

тивности противоаварийных систем в условиях, близких к реализуемым при развитии аварии с потерей теплоносителя. Для этого требовалось определить мощностные характеристики спринклерной системы с учетом применения форсунок различного типа; исследовать совместную работу барботажной, спринклерной и конденсационной подсистем ССАД 30, исследовать параметры проскока пара и паровоздушной смеси при барботаже.

Основные характеристики стенда СПОТ 30 следующие:

- объем емкости-модели 30 ~ 59 м³,
- диаметр – 3,2 м,
- высота ~ 8 м;
- расход спринклерной воды – 0–10 т/ч,
- напор насоса – 60 м;
- номинальная мощность электропарогенератора (ЭПГ) – 0–2400 кВт,
- максимальная температура пара – 180 °С,
- рабочее давление – 0–1 МПа.

Для имитации работы спринклерной системы использовались форсунки, характеристики работы которых были исследованы при атмосферных испытаниях. Подача спринклерной воды на форсунку осуществлялась насосом из специального резервуара.

Для измерения поля температур парогазовой смеси (ПГС) и температуры капель в объеме емкости-модели 30 расположены стойки с термопреобразователями. Термопреобразователи в емкости-модели 30 закреплены на стойках таким

образом, чтобы вносить минимальное возмущение в поток ПГС и струи спринклера. Для оценки влияния неконденсирующихся газов на эффективность работы спринклерной системы предусмотрены системы подачи азота и гелия (имитатор водорода). Для измерения концентраций гелия, пара и компонент воздуха предусмотрены несколько точек отбора проб парогазовой среды с последующей подачей пробы в газоанализатор (хроматограф).

Результаты экспериментальных исследований спринклерной системы

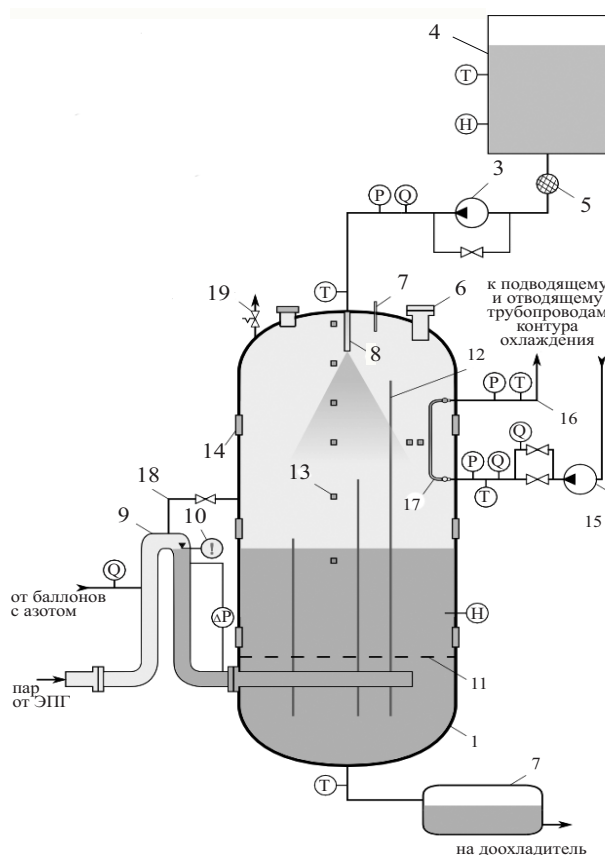
Test data for sprinkler subsystem

На рис. 5 (см. вклейку) представлены графики изменения давления и температуры парогазовой смеси в одном из экспериментальных режимов с работой форсунки типа ТС при различных номинальных расходах воды на спринклер и повышенном парциальном давлении воздуха в модели 30.

На первом этапе эксперимента осуществляется подача пара от ЭПГ в емкость. Происходит прогрев конструкции емкости. После разогрева емкости осуществляется подача воды на спринклер с минимальным номинальным расходом при соответствующей минимальной мощности ЭПГ. Давление в модели 30 стабилизируется, и осуществляется выдержка в статическом режиме. Затем

Рис. 4. Стенд СПОТ 30: 1 – емкость-модель 30; 2 – конденсатосборник; 3 – насос контура спринклера; 4 – бак с запасом воды 40 м³; 5 – фильтр; 6 – трубопровод подачи пара в емкость; 7 – трубопровод подачи гелия в емкость; 8 – спринклер; 9 – модель барботера; 10 – сигнализатор уровня; 11 – дырчатый лист; 12 – стойки с термопреобразователями для измерения температуры капель; 13 – участки отбора проб; 14 – прозрачные окна; 15 – электронасос; 16 – контур охлаждения; 17 – теплообменник; 18 – канал для исключения переопрессовки барботера; 19 – предохранительный клапан

Fig. 4. SPOT ZO test rig: 1 – containment model; 2 – condensate collector; 3 – sprinkler circuit pump; 4 – 40 m³ water supply tank; 5 – filter; 6 – steam feed pipeline; 7 – helium feed pipeline; 8 – sprinkler; 9 – barboter model; 10 – level alarm; 11 – perforated plate; 12 – struts with thermal gauges for droplet temperature measurements; 13 – sampling places; 14 – observation windows; 15 – electric pump; 16 – cooling circuit; 17 – heat exchanger; 18 – barboter over-pressure prevention channel; 19 – safety valve



устанавливается следующий номинальный расход воды на спринклер и производится увеличение мощности ЭПГ до стабилизации давления в емкости. При стабилизированном давлении в емкости и фиксированном уровне мощности ЭПГ осуществляется выдержка по времени. Аналогичные операции выполняются на последующих номинальных расходах воды на спринклер. После проведения всех мощностных полок режим считается завершенным.

На рис. 6 представлены гидравлические и мощностные характеристики форсунок (в зависимости от газосодержания в емкости-модели 30 и мощности форсунок), полученные в ходе экспериментов.

Результаты экспериментальных исследований работы спринклерной системы показали: все форсунки обеспечивают стабилизацию давления в 30; при работе форсунок стратификация ПГС не наблюдается; релаксация капель наблюдается на расстоянии не более 1 м от форсунки; присутствие легкого газа (гелия) не оказывает влияния на тепловую эффективность спринклера.

Результаты экспериментальных исследований барботаж

Test data for barbotage subsystem

Экспериментальные исследования работы барботаж паровоздушного потока через слой воды на стенде СПОТ 30 проводились в следующих условиях: барботаж сухого насыщенного пара без воздуха; барботаж сухого насыщенного пара в смеси с воздухом без газоудаления; барботаж сухого насыщенного пара в смеси с воздухом с газоудалением. На рис. 7 (см. вклейку) представлены результаты экспериментальных исследований работы барботера в части графиков изменения давления и температуры ПГС для одного из характерных режимов с подачей смеси пара с воздухом при газоудалении.

В ходе эксперимента производится подача пара в модель 30 на электрической мощности ЭПГ около 600 кВт. Совместно с подачей пара подается воздух в паропровод с максимальным расходом. Наблюдается рост температуры воды барботажного

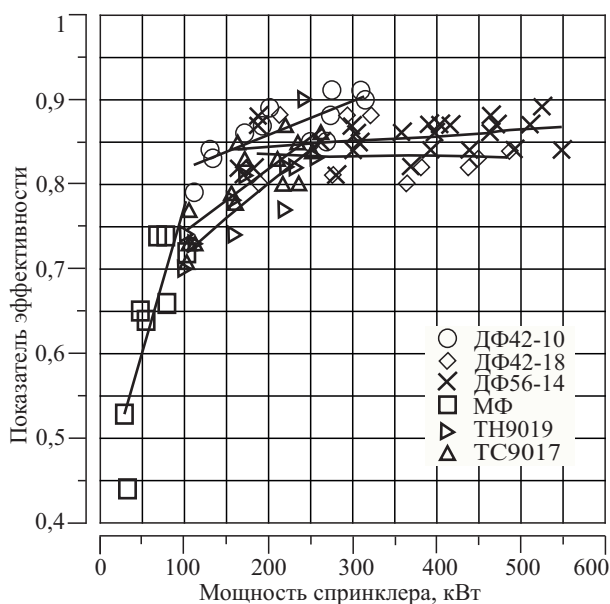
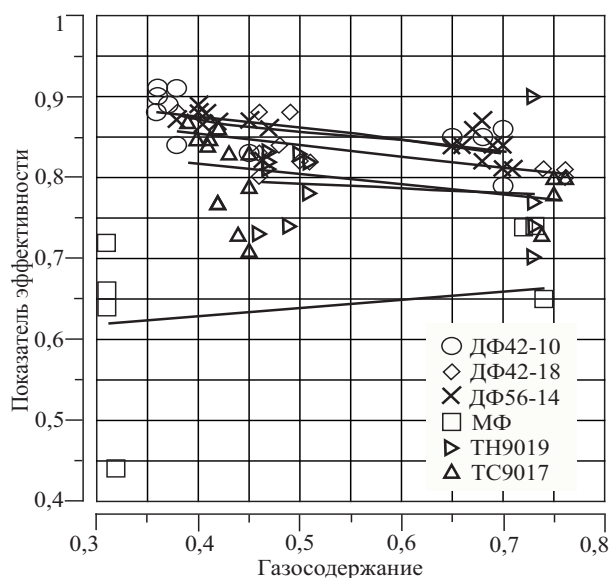
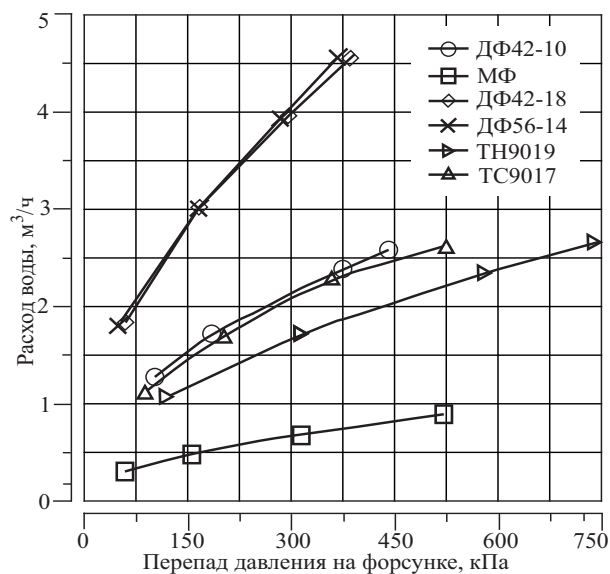


Рис. 6. Гидравлические характеристики и эффективность форсунок

Fig. 6. Hydraulic parameters and efficiency of sprinklers

слоя, средняя температура ПГС в емкости увеличивается до величины, близкой к температуре на линии насыщения.

Результаты экспериментальных исследований барботаж паровоздушной смеси через слой воды показали следующее: наблюдается высокая эффективность барботажного слоя воды без прохождения пара через слой воды; происходит интен-

сивный теплообмен между поверхностью воды и ПГС.

Численное моделирование экспериментов

Numerical simulation of experiments

Расчетное моделирование экспериментов на стенде СПОТ 30 проводилось с использованием ПС КУПОЛ-МТ. Код КУПОЛ-МТ предназначен для расчета параметров среды в объеме защитной оболочки или герметичного ограждения водо-водяных РУ. В состав кода входят контейментный и теплогидравлический блоки, что позволяет рассчитывать изменение во времени давления газа в помещениях, перепадов давления между помещениями, температуры ПГС в помещениях, изменение во времени уровня воды в помещениях, мощности теплоотвода и уровня в баке с запасом воды пассивной системы отвода тепла от ЗО, нестационарное распределение температуры в стенах и оборудовании, временные зависимости концентраций компонент ПГС в помещениях.

С помощью кода возможно моделирование систем безопасности, таких как спринклерная система, система аварийного удаления водорода на основе использования пассивных автокаталитических рекомбинаторов водорода, система отвода тепла от ЗО, вентиляционная система. Моделируется работа барботера и предохранительных клапанов. Верификационная база кода КУПОЛ-МТ включает эксперименты, проведенные на стенде СПОТ 30 приме-

нительно к проектам АЭС-2006 и КЛТ-40С [4, 5], эксперименты на стенде КМС, эксперименты в рамках международного исследовательского проекта ERCOSAM-SAMARA на стендах СПОТ 30, PANDA, MISTRA, TOSQAN [6–8].

Расчетная модель контейнента стенда СПОТ 30 представлена на рис. 8. Модель состоит из 70 расчетных элементов, объединенных 121 газовой связью и 72 связями по воде. Для моделирования работы конденсационной ССАД 30 на основе теплообменника для теплогидравлического модуля кода КУПОЛ-МТ предусмотрена модель контура циркуляции с теплообменником (рис. 9).

Комплекс претестовых расчетов экспериментов включал моделирование работы отдельных систем, их совместной работы, имитацию аварийных режимов.

На рис. 10 (см. вклейку) представлены сценарии экспериментов с имитацией аварии при работе спринклерной системы (а), конденсационной системы с теплообменником (б), а также при изменении парогазового объема помещения (в). Перед началом экспериментов устанавливается необходимый исходный уровень воды в барботере. Исходно модель 30 заполнена воздухом при атмосферном давлении. Воздух и стены емкости-модели 30, а также вода в барботере имеют температуру окружающей среды. На первом этапе экспериментов осуществляется подача пара в барботер. Происходит прогрев воды в барботере.

В эксперименте с изменением объема ПГС на этом этапе выполняется подпитка емкости водой до требуемого уровня воды в емкости, что также приводит к росту параметров в модели 30. На третьем этапе производится дренаж воды из емкости до полного ее осушения. В экспериментах с работой спринклера и теплообменника на данной фазе происходит включение в работу этих систем и осуществляется расхолаживание 30. При этом в эксперименте со спринклером исследуется парциальная работа форсунки при работающей ЭПГ.

На рис. 11–13 (см. вклейку) представлены результаты претестовых расчетов экспериментов в части основных параметров в модели 30 (давления и температуры ПГС). Этап I экспериментальных сценариев (прогревом воды в барботере) не моделировался.

Проведенные претестовые расчеты показывают качественную картину процессов, протекающих в 30. На рис. 13 в сравнении с основными результатами претестовых расчетов представлены экспериментальные данные, а также полученные промежу-



Рис. 8. Расчетная модель контейнента стенда СПОТ 30
 Fig. 8. Analytical model of SPOT ZO test rig containment

точные результаты посттестового расчета режима с изменением объема ПГС.

Сравнительный анализ результатов пре- и посттестовых расчетов эксперимента с изменением объема ПГС в емкости-модели 30 показал, что имеются различия в планируемых и фактических начальных и граничных условиях в эксперименте. Например, большая начальная масса воды и более высокий расход подпитки приводят в эксперименте и посттестовом расчете к более высокому давлению по завершении подпитки. Нелинейный характер изменения давления на этапе подпитки связан с влиянием противодавления на характеристики насоса подпитки, что вызывает снижение расхода подачи воды в емкость.

Также в эксперименте зафиксирован более высокий расход дренажа воды из емкости. При этом в посттестовом расчете наблюдается более резкое снижение давления. Графики изменения температуры в модели 30, включающие данные о температуре воды (в основном t_{50}) и ПГС (в основном t_{43}), показывают более низкие температуры воды в рас-

четах, что связано с неучетом в расчетах температурной стратификации по высоте слоя воды (подпитка в эксперименте осуществлялась водой с температурой порядка 20–30 °С). Тем не менее код качественно позволяет оценить изменения температуры по высоте емкости в процессе заполнения и дренажа, связанные с заливом и оголением термопреобразователей при изменении уровня воды.

Численное моделирование работы спринклерной системы на натурном объекте

Numerical simulation of real sprinkler system operation

Для анализа работы спринклерной системы применительно к натурному объекту было выполнено расчетное моделирование параметров в 30 надводного корабля (НК) с блочной компоновкой и интегральным реактором типа РИТМ. Блочная компоновка предполагает максимально допустимое давление в помещениях 30 до 1 МПа изб. (10 бар изб.). Поэтому расчеты изменения параметров ПГС в подобного типа РУ были выполнены для варианта запроектной аварии разрыва полным сечением одного из трубопроводов трассы «реактор – компенсатор давления» внутри необитаемой выгородки. В расчетах исследовалось влияние различных типов и количества форсунок, диаметра разбрызгиваемых капель, максимального допустимого давления в помещениях 30 на величину необходимого запаса воды в цистерне и количество конденсируемого пара.

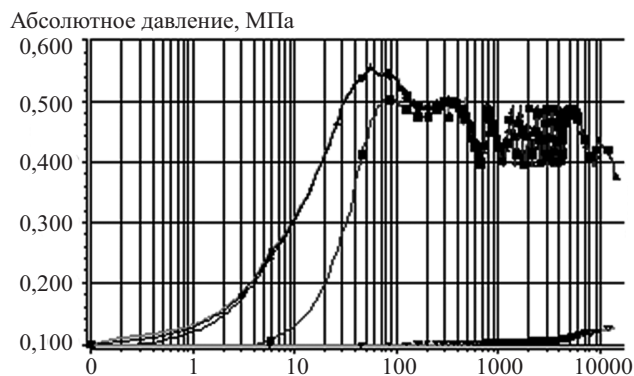


Рис. 14. Численное моделирование работы спринклерной системы на натурном объекте

Fig. 14. Numerical simulation of real sprinkler system operation

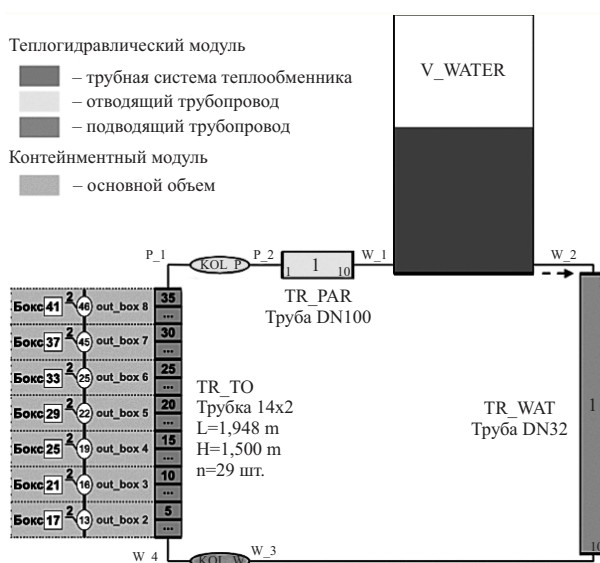
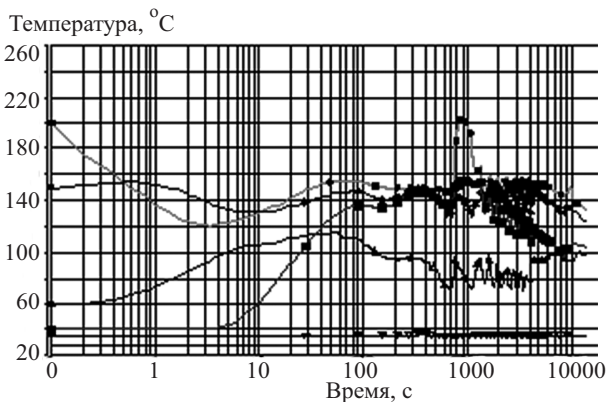


Рис. 9. Расчетная модель контура циркуляции стенда СПОТ 30

Fig. 9. Analytical model of SPOT ZO test rig circulation pipeline

На рис. 14 приведены результаты изменения параметров ПГС в рассматриваемой аварии для варианта расчета с шестью форсунками типа ДФ42-10, обеспечивающими полный конус факела с диаметром капли около 1 мм, с расходом воды 3,07 кг/с на форсунку и диапазоном функционирования спринклерной системы 4–5 атм (абс.). Результаты расчета показали, что парциальная работа спринклеров обеспечивает не превышение установленного давления. За 10 срабатываний спринклер-



- Низ аппаратной выгородки в верхней части рамы
- ▲ Низ аппаратной выгородки над крышей бака МВ3
- ◆ Низ аппаратной выгородки ниже крыши бака МВ3
- Аппаратное помещение
- ▼ Помещение вспомогательного оборудования

ной системы в ЗО поступило около 10 430 кг воды и сконденсировано порядка 1705 кг пара.

Заключение

Conclusion

В статье представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований эффективности противаварийных систем ограничения давления в защитной оболочке корабельных РУ. По результатам проведенных исследований на атмосферном стенде и стенде СПОТ ЗО получены спектральные характеристики капельного потока, а также расходные и мощностные характеристики спринклерных форсунок различных типов и производительности, показана их эффективность при авариях с потерей теплоносителя первого контура РУ. Исследована совместная работа спринклерной, барботажной и конденсационной с теплообменником подсистем снижения аварийного давления в ЗО, показана эффективность работы барботера в широком диапазоне аварийных параметров. Расчетный анализ работы спринклерной системы применительно к натурному объекту, выполненный с использованием ПС КУПОЛ-МТ, показал высокую эффективность для снижения давления в ЗО НК при аварии ЛОСА спринклерных систем, основанных на испытанных типах форсунок. С использованием результатов экспериментальных исследований проведена верификация ПС КУПОЛ-МТ. Объем и качество экспериментов позволяет использовать их при проектировании аварийных систем отвода тепла и верификации современных LP- и CFD-кодов.

Библиографический список

1. Балабин В.П., Богданов Д.М., Вишняков Ю.М., Емельянов С.И., Кучин Н.Л. Расчетное моделирование последствий аварий типа ЛОСА на атомных объектах морской техники при использовании противаварийной барботажно-спринклерной системы снижения давления // Труды Крыловского государственного научного центра. 2018. Вып. 2(384). С. 137–146.
2. Кулагин Л.В., Морошкин М.Я. Форсунки для распыливания тяжелых топлив. М.: Машиностроение, 1973.
3. Каталог центробежных форсунок предприятия ООО «Общемаш» / URL: www.zzu.ru (дата обращения: 28.09.2018).
4. Лукьянов А.А., Зайцев А.А., Хизбуллин А.М. Результаты верификации программного средства КУПОЛ-МТ на базе экспериментальных исследований пассивной системы снижения аварийного давления в защитной оболочке КЛТ-40С // материалы 7-й международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» ОКБ «ГИДРОПРЕСС», Подольск, Россия, 17–20 мая 2011.
5. Бахметьев А.М., Большухин М.А., Хизбуллин А.М., Камнев М.А. Экспериментальное исследование пассивной системы снижения аварийного давления в защитной оболочке реакторной установки КЛТ-40С // Атомная энергия. 2010. № 5. С. 284–288.
6. Хизбуллин А.М., Камнев М.А., Тюриков О.В. Результаты расчетного моделирования экспериментов на установках PANDA и MISTRA с учетом влияния работы рекомбинатора на стратификацию гелия // Материалы 8-й Международной научно-технической конференции «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР» МНТК-2013, г. Подольск, Россия, 28–31 мая 2013.
7. Бахметьев А.М., Большухин М.А., Хизбуллин А.М. и др. Экспериментальное обоснование контура охлаждения системы пассивного отвода тепла из защитной оболочки проекта АЭС-2006 для площадки Ленинградской АЭС // Атомная энергия. 2009. Т. 106. Вып. 3. С. 148–152.
8. Бахметьев А.М., Большухин М.А., Камнев М.А., Хизбуллин А.М., Тюриков О.В. Расчетно-экспериментальные исследования перемешивания легкого газа в рамках проектов ERCOSAMSAMARA // Атомная энергия. 2017. Т. 123. Вып. 1. С. 3–9.

References

1. Balabin V., Bogdanov D., Vishnyakov Yu., Yemelyanov S., Kuchin N. Analytical simulation of LOCA outcomes at nuclear marine facilities using barbotage-sprinkler emergency depressurization system // Transactions of the Krylov State Research Centre. 2018. Issue 2(384). P. 137–146 (in Russian).
2. Kulagin L., Moroshkin M. Sprinklers for heavy fuels. Moscow: Mashinosroyeniye, 1973 (in Russian).
3. Catalogue of JSC Obshemash fuel swirlers // URL: www.zzu.ru (in Russian).
4. Lukyanov A., Zaitsev A., Khizbullin A. Verification results of the KUPOL-MT code on the basis of experimental research of passive system of heat removal from containment for KLT-40C // Materials of the 7th International Scientific and Technical Conference Safety Assurance of NPP with WWER. OKB Hidropress. Podolsk, Russia, May 17–20, 2011 (in Russian).
5. Bakhmetiev A., Bolshukhin M., Khizbullin A., Kamnev M. Experimental study of a passive system for lowering damaging pressure levels in the protective shell of the KLT-40S reactor facility // Atomic Energy. 2010. No. 5. P. 284–288 (in Russian).

6. *Khizbullin A., Kamnev A., Tyurikov O.* Numerical simulation of severe accident development considering recombiner effect on hydrogen stratification in containment // Materials of the 8th International Scientific and Technical Conference Safety Assurance of NPP with WWER. OKB Gidropress. Podolsk, Russia, May 28–31, 2013 (in Russian).
7. *Bakhmetyev A., Bolshukhin M., Khizbullin A.* et al. Experimental validation of the cooling loop for a passive system for removing heat from the AES-2006 protective envelope design for the Leningradskaya nuclear power plant site // Atomic Energy. 2009. Vol. 106. Issue 3. P. 148–152 (in Russian).
8. *Bakhmetyev A., Bolshukhin M., Kamnev M., Khizbullin A., Tyurikov O.* Computational and experimental studies of mixing of a light gas in ERCOSAM-SAMARA projects // Atomic Energy. 2017. Vol. 123. Issue 1. P. 1–9 (in Russian).

Сведения об авторах

Балабин Валерий Павлович, начальник сектора – заместитель руководителя ОСКЦ ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-48-31. E-mail: skc@ksrc.ru.

Камнев Михаил Анатольевич, к.т.н., начальник НИИК АО «ОКБМ «Африкантов». Адрес: 603074, Россия, Нижний Новгород, Бурнаковский пр-д, 15. Тел.: 8 (8312) 75-25-73. E-mail: kamnev@okbm.nnov.ru.

Кучин Николай Леонидович, д.ф.-м.н., начальник отдела – руководитель ОСКЦ ФГУП «Крыловский государственный научный центр». Адрес: 196158, Россия, Санкт-

Петербург, Московское шоссе, 44. Тел.: 8 (812) 415-48-64. E-mail: skc@ksrc.ru.

Тюриков Олег Валерьевич, инженер-конструктор 1 категории АО «ОКБМ «Африкантов». Адрес: 603074, Россия, Нижний Новгород, Бурнаковский пр-д, 15. Тел.: 8 (8312) 75-25-71. E-mail: okbm@okbm.nnov.ru.

Хизбуллин Ахмир Мугинович, к.т.н., заместитель начальник отдела АО «ОКБМ «Африкантов». Адрес: 603074, Россия, Нижний Новгород, Бурнаковский пр-д, 15. Тел.: 8 (8312) 75-25-71. E-mail: khizbullin@okbm.nnov.ru.

About the authors

Valery P. Balabin, Head of Sector – Deputy Head of Joint Emergency Response Centre, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-48-31. E-mail: skc@ksrc.ru.

Mikhail A. Kamnev, Cand. Sci (Eng.), Head of Research & Testing Complex, JSC Afrikantov OKBM. Address: 15, Burnakovsky proezd, Nizhny Novgorod, Russia, post code 603074. Tel. 8 (8312) 75-25-73. E-mail: kamnev@okbm.nnov.ru.

Nikolay L. Kuchin, Dr. Sci. (Eng.) (Phys. & Math.), Head of Department – Head of Joint Emergency Response Centre, Krylov State Research Centre. Address: 44, Moskovskoye sh., St. Petersburg, Russia, post code 196158. Tel.: 8 (812) 415-48-64. E-mail: skc@ksrc.ru.

Oleg V. Tyurikov, 1st Category Design Engineer, JSC Afrikantov OKBM. Address: 15, Burnakovsky proezd, Nizhny Novgorod, Russia, post code 603074. Tel. 8 (8312) 75-25-71. E-mail: okbm@okbm.nnov.ru.

Akhmir M. Khizbullin, Cand. Sci (Eng.), Deputy Head of Department, JSC Afrikantov OKBM. Address: 15, Burnakovsky proezd, Nizhny Novgorod, Russia, post code 603074. Tel. 8 (8312) 75-25-71. E-mail: khizbullin@okbm.nnov.ru.

Поступила / Received: 15.08.18
Принята в печать / Accepted: 06.11.18
© Коллектив авторов, 2018