

СОДЕРЖАНИЕ

	<i>А.Г. Карабаш</i> Исторический форум «50 лет первого испытания ядерного оружия в СССР»3
ЭКОЛОГИЯ ЭНЕРГЕТИКИ	<i>В.Н. Мещеряков, В.И. Бойко, Ф.П. Кошелев</i> Ядерная энергетика в системе энергообеспечения г. Томска6
БЕЗОПАСНОСТЬ, НАДЕЖНОСТЬ И ДИАГНОСТИКА ЯЭУ	<i>А.Ю. Проходцев, Н.Л. Сальников</i> Анализ условий протекания переходного процесса обесточивания энергоблока12
ФИЗИКА И ТЕХНИКА РЕАКТОРОВ	<i>В.А. Галкин, М.А. Забудько</i> Точные и численные решения нелинейных уравнений теплопроводности и кинетических уравнений19 <i>О.В. Шведов, А.С. Герасимов, Г.В. Киселев, В.В. Селиверстов, В.В. Петрунин, В.В. Шидловский</i> Тяжеловодные установки в России29 <i>И.Ю. Шимкевич, М.В. Заезжев, В.В. Кузин, А.Г. Новиков, В.В. Савостин, А.Л. Шимкевич</i> Атомная динамика жидкого калия и расплава калий-кислород из данных молекулярно-динамического моделирования и экспериментов по неупругому рассеянию нейтронов40
ТЕПЛОФИЗИКА	<i>А.Д. Ефанов, В.В. Ложкин, Б.И. Куликов, О.А. Судницын, Ю.А. Безруков, С.Н. Зайцев</i> Экспериментально-расчетное исследование процессов тепло- и массообмена в аварийных ситуациях с потерей теплоносителя49 <i>А.А. Анисин, А.К. Анисин, В.Т. Буглаев</i> Турбулизирующее влияние гладких круговых цилиндрических элементов на интенсификацию теплообмена симметричного коридорного пучка труб64 <i>Е.Ф. Авдеев, В.В. Большунова</i> Диагностика расстояния до места разрыва трубопровода по изменению гидравлических характеристик77 <i>В.И. Мельников, В.В. Контелев, В.В. Иванов, Х.-М. Прассер, В. Циппе</i> Ультразвуковая волноводная многоточечная система визуализации двухфазного теплоносителя81 <i>М.Н. Арнольдov, В.Н. Богомолов, О.Г. Григорьев, В.Н. Замцуский</i> Эффект «зависания» жидкого натрия и его влияние на работу теплообменников испарительно-конденсационного типа89 <i>Г.Н. Власичев, Г.Б. Усынин</i> Расчетная модель длительного аксиального продвижения тепловыделяющей массы при аварии с расплавлением топливных сборок быстрого реактора97
ИЗ ИСТОРИИ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ	<i>А.Г. Карабаш</i> Преломление детонационных волн и повышение направленного действия взрыва применением собирающих линз взрывчатых веществ107

CONTENTS

	A.G. Karabash Historical forum "50 years of the first trial of the nuclear weapon in USSR"3
ENVIROMENTAL ASPECTS OF POWER ENGINEERING	V.N. Mescheryakov, V.I. Boiko, F.P. Koshelev Nuclear Power Engineering in the Power Supply System of Tomsk.....6
SAFETY, RELIABILITY AND DIAGNOSTICS NPP	A.Yu. Prohodtsev, N.L. Sal'nikov The Analysis of Conditions of Transient Process for the De-energization of the Power Unit.....12
REACTOR PHYSICS AND TECHNOLOGY	V.A. Galkin, M.A. Zaboudko Exact and Numerical Solutions of Nonlinear Thermal Conductivity and Kinetic Equations19 O.V. Shvedov, A.S. Gerasimov, G.V. Kiselev, V.V. Seliverstov, V.V. Petrunin, V.V. Shidlovsky Heavy-Water Installations in Russia.....29 I.Yu. Shimkevich, M.V. Zaezjev, V.V. Kuzin, A.G. Novikov, V.V. Savostin, A.L. Shimkevich Atomic Dynamics of Liquid Potassium and Potassium-oxygen Melt from Data of the Molecular-dynamics Simulation and Inelastic Neutron Scattering Experiments.....40
THERMAL PHYSICS	A.D. Efanov, V.V. Lozhkin, B.I. Kulikov, O.A. Sudnitsin, Yu.A. Bezrukov, S.N. Zaitzev Experimental and Numerical Investigations of Mass- and Heat-Exchange Processes under the Loss Coolant Accident49 A.A. Anisin, A.K. Anisin, V.T. Buglaev Turbulizing Influence of Smooth Cylindrical Elements on Intensification of Heat-Exchange of Symmetric Passage Pipe Bundles.....64 E.F. Avdeev, V.V. Bolshunova Diagnostics of Distance up to the Point of Rupture of the Pipe Line Using the Change of Hydraulic Characteristics77 V.I. Melnikov, V.V. Kontelev, V.V. Ivanov, X.-M. Prasser, V. Zippe Ultrasound Waveguide Multipoint System of Visualisation of Two-phase Coolant.....81 M.N. Arnoldov, V.N. Bogomolov, O.G. Grigoriev, V.N. Zamiusskiy Effect of «Hanging» of Liquid Sodium and Its Influence on Operation of Heat Exchangers of an Evaporative-Condensation Type.....89 G.N. Vlasichev, G.B. Usynin Calculation Model of Long-Term Axial Advanced of Heat-generating Mass under LMFR Accident with Fuel Assemblies Melting97
FROM THE HISTORY OF NUCLEAR SCIENCE AND ENGINEERING	A.G. Karabash Refraction of Detonation Waves and Increase of Directional Effect of Explosion by Application of Collecting Lenses of Explosive Substances.....107

ИСТОРИЧЕСКИЙ ФОРУМ

«50 ЛЕТ ПЕРВОГО ИСПЫТАНИЯ ЯДЕРНОГО ОРУЖИЯ В СССР»



50-летие исторического события – успешного испытания первой отечественной атомной бомбы РДС-1 29 августа 1949 г. торжественно и широко отмечено на предприятиях Минатома, а также в Академии наук и в других отраслях накануне 2000 г.

Эта дата имеет особое значение: она воплощает важнейший итог XX века, определяющий перспективы нашей страны, мировой цивилизации и в новом столетии.

Рассказывает участник форума, ветеран атомной отрасли, А.Г. Карабаш.

В честь этого события в ГНЦ РФ-ФЭИ директор А.В.Зродников и его заместитель В.И.Читайкин провели НТС института. 58 участников создания РДС-1 награждены медалями «Ветеран атомной энергетики и промышленности», крупными денежными суммами. Торжественно установлена мемориальная доска на доме семьи Александра Александровича Каратыгина, мужественно предотвратившего в 1949 г. аварию на заводе Б Плутониевого комбината (Челябинск-40). Теплое общение участников продолжалось за праздничным столом. Ветераны надолго запомнят эту волнующую встречу, отмеченную и памятными подарками дирекции.

30 августа в Москве состоялся Научный форум «50 лет первого испытания ядерного оружия в СССР», который организовали Минатом России, Минобороны России, Российская Академия наук. В Большом конференц-зале Российской Академии наук присутствовали около 1000 участников с предприятий, создав-

ших ядерный щит нашей Родины. В звуках и движениях, заполнявших огромный зал, чувствовалась радость товарищеских встреч. Ведь эти люди, связанные единой целью, достигли вершины научного и инженерного поиска.

Впечатляющей была и программа этого исторического форума. Выступление Председателя Научного совета Минатома России академика РАН В.Н.Михайлова и доклады представили многоплановую панораму реализованного Атомного проекта, обозначившего начало мирной атомной эры.

Докладчики – руководители ведущих научных центров, предприятий, министерств: проф. Р.И.Илькаев (РФЯЦ ВНИИЭФ); академик РАН Е.П.Велихов (РНЦ «Курчатовский институт»); чл.-корр. РАН М.И.Солонин (ГНЦ РФ-ВНИИИМ, ПО «МАЯК»); академик РАН Н.П. Лаверов (Российская Академия наук); министр обороны РФ, маршал И.Д. Сергеев; академик РАН Л.А. Ильин (ГНЦ «Институт биофизики»); проф., Герой России В.Б.

Барковский (Служба внешней разведки РФ).

Были освещены главные аспекты и этапы истории, настоящего и будущего ядерного оружия, его роль, как фактора паритета и стабильности в современном мире. Показан основополагающий вклад отечественной науки, выдающихся ученых в решение многогранных фундаментальных проблем использования ядерной энергии.

Ведь и атомное оружие, по существу, - интернациональное произведение гениев науки и техники.

В.И. Вернадский еще в 1910 г. пророчески предсказал проблемы атомного века: «А теперь перед нами открываются в явлениях радиоактивности источники атомной энергии, в миллионы раз превышающие все те источники сил, какие рисовались человеческому воображению...»

На пороге нового века все зримее становится величие атомной эпопеи нашего народа. Ветераны помнят, как после 4-х лет Великой Отечественной войны, унесшей более 20 миллионов жизней, над планетой прогремела новая угроза. Старшее поколение землян не забыло демонстрационный эксперимент, спешно проведенный в августе 1945 г. по приказу президента Трумэна: джинн, вырвавшийся из недр атома в виде чудовищного гриба, сжег в адском пламени более 200 тысяч жителей Хиросимы и Нагасаки. А по плану «Дропшот» 20 наших городов были обречены, как новые жертвы.

После этого адского начала атомной эры, всего за 4 года и 23 дня, наш народ свершил эпохальный подвиг.

В 1945 г. получены первые микрограммы плутония. В 1946 г. И.В. Курчатов осуществил пуск первого в Европе исследовательского ядерного реактора Ф-1 и в 1947 г. получены первые миллиграммы плутония. Июнь 1948 г. – февраль 1949 г.: пуск трех заводов А,Б,В Плутониевого комбината (Челябинск – 40), спроектированных на основе опы-

та реактора Ф-1 и химии «невесомых» количеств элемента 94. Август 1949 г.: изготовление ядерного заряда РДС-1, двух полушарий плутониевого сплава весом несколько килограмм на Плутониевом комбинате (Челябинск – 40). Контрольная сборка атомной бомбы РДС-1, в конструкции которой реализован уникальный вариант имплозии, разработанный в КБ-11 (Саров). 29 августа 1949 г. – на Семипалатинском полигоне командой Главного конструктора Ю.Б. Харитона и его заместителя К.И. Щелкина осуществлен первый в СССР ядерный взрыв РДС-1.

Курчатовский вариант аббревиатуры РДС – «Россия делает сама».

4 года – это мгновения на хронометре истории. Но в них сконцентрирован титанический труд и великий подвиг нашего народа.

Об этом было столько воспоминаний в беседах на встречах ветеранов...

В документальной повести Л.И. Сохиной «Страницы истории Химико-металлургического завода 20 ПО «МАЯК» (Озерск, 1998, 103 с.) летопись уникального завода запечатлена с необычайной силой.

Герои эпопеи 1945–1949 гг. – сотни тысяч советских людей, призванных к срочному созиданию специализированной, невиданной ранее ядерной индустрии. В разных регионах страны, на всех участках крупномасштабного Атомного проекта они трудились самоотверженно, вдохновенно. Везде царил единый творческий ритм – ритм новой Победы.

Следует подчеркнуть выдающуюся роль женщин – ученых и множества молодых специалистов в Атомном проекте. Они составляли большинство авангарда в создании химических и радиохимических производств высокочистых урана и новорожденного в таблице Менделеева элемента 94 – плутония.

Реализация Атомного проекта существенно изменила мир. Атомный джинн ограничился только двумя бомбами

Гарри Трумэна. Но вырос мирный атом-гигант и ему принадлежит будущее. На едином фундаменте мощной атомной промышленности нашей страны родилась и развивается мирная ядерная энергетика. Ее эпицентр – город Обнинск (место выбрал И.В. Курчатов). Дата ее рождения – 27 июня 1954 г. – пуск Первой в мире АЭС, через 5 лет после испытания первой отечественной атомной бомбы.

В заключение участникам Форума демонстрировался документальный кинофильм: «Р.Д.С. К 50-летию первого испытания советской атомной бомбы». Он уникален своей исторической достоверностью. В потоке насыщенных драматизмом кадров чередуются реальные герои, которые ведут простое повествование о великой атомной эпопее.

Динамика всего фильма захватывает зрителя. Мчащийся по железнодорожным путям литерный поезд, задумчивый облик Главного конструктора РДС Юлия Борисовича Харитона в купе устремлены к конечной цели – Семипалатинскому полигону, к финалу эпопеи.

Идет отсчет (голосом А.Я.Мальского) часов, минут, секунд...

Сам финал поражает воображение.

Вечером ветераны присутствовали на Торжественном заседании в Центральном театре Российской Армии. Участников Форума приветствовали министр РФ по атомной энергии Е.О. Адамов, министр обороны РФ маршал И.Д. Сергеев, Президент РАН Ю.С. Осипов. В президиуме - Премьер-министр Российской Федерации В.В. Путин и другие первые государственные лица.

Величие исторической встречи отражают слова первого заместителя министра Л.Д. Рябева: «Трудовой подвиг первопроходцев атомной эры навсегда останется в памяти благодарных сограждан».

Встреча завершилась блестящим концертом. Все участники Форума получили драгоценный подарок: фундаментальное издание «Человек столетия. Юлий Борисович Харитон» и видео-касsetу уникального фильма.

У кортежа автобусов звучали прощальные приветствия участников Форума.

До новых встреч в 2000 году!

Память об историческом Форуме следует запечатлеть золотыми буквами в летописи Отечества.

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА В СИСТЕМЕ ЭНЕРГООБЕСПЕЧЕНИЯ г. ТОМСКА

В.Н. Мещеряков*, В.И. Бойко, Ф.П. Кошелев****

* *Сибирский химический комбинат, г. Северск*

** *Томский политехнический университет, г. Томск*



Проведено сравнение эколого-экономических аспектов использования угля и ядерной энергии в системе энергообеспечения г. Томска. Рассмотрены эколого-экономические последствия гипотетической ситуации, при которой АЭС-1 и АЭС-2 Сибирского химического комбината были бы заменены на ТЭС, работающую на угле.

С учетом темпов роста численности населения планеты и улучшения качества жизни будущих поколений Мировой энергетический конгресс прогнозирует увеличение потребления энергии в мире на 50÷100% к 2020 г. и на 140÷320% к 2050 г. по сравнению с потреблением в середине 90-х гг.

В современных условиях энергетика является одним из факторов, которые определяют устойчивость развития общества и возможность улучшения жизни людей.

В XXI в. истощение энергоресурсов не будет первым ограничивающим фактором. Главным становится фактор ограничения предела экологической емкости среды обитания. Более того, только 5% изымаемых природных ресурсов человечество потребляет, остальное выбрасывается в окружающую среду в виде различного вида отходов.

Экологические проблемы по масштабности можно разделить на глобальные, региональные и локальные.

К глобальным можно отнести последствия ядерных испытаний и аварий, проблемы парникового эффекта, озоновых дыр, загрязнения мирового океана нефтепродуктами и т.д.

К региональным проблемам относятся: перенос выбросов химических и металлургических производств на расстояние в сотни километров, образование кислотных дождей и уничтожение растительного покрова, аварии на нефтегазопроводах и т.д.

Локальные проблемы характеризуются масштабами в несколько десятков километров, но при наличии значительного количества населения. Это выбросы энергетических, с/х комплексов, промышленных предприятий.

При планировании развития систем энергоснабжения необходимо использовать аналитические сравнения экономических, экологических, социальных аспектов различных источников энергии.

Потребление энергоресурсов и электроэнергии в Томской области более чем на 60% зависит от поставок извне. Поэтому энергетическая независимость Томского региона является ключевым вопросом, а взятие курса на достижение регио-

нальной энергетической самостоятельности - далеко не простым делом.

Бедность энергоресурсами и забота об экологии побуждают к сооружению такого типа энергоисточника, экономические показатели которого не зависят ни от его дефицитности, ни от топливной конъюнктуры, ни от места расположения.

Согласно данным современных социально-гигиенических исследований, непосредственный вклад загрязнения окружающей среды в ухудшение состояния здоровья населения города составляет более 25%.

По данным экологического обзора, выполненного Государственным комитетом экологии и природных ресурсов Томской области [1], несмотря на значительную занимаемую площадь (около 320 км²), низкую численность населения (~ 1,1 млн. чел.) и относительно невысокий народнохозяйственный потенциал, экологическая обстановка в области является напряженной.

Основными загрязнителями атмосферного воздуха в области являются предприятия Нефтегазпрома (99,6 тыс.т в год), Минжилкомхоза (22,9), Минэнерготоба (~15,4). На территории г.Томска и области расположено 8 крупных объектов теплоэнергетического комплекса и 635 мелких котельных, что приводит к химическому и тепловому загрязнению атмосферы и воды, изъятию природных ресурсов, накоплению отходов. Кроме того, за счет особенностей климатических условий Сибири, потенциальные способности атмосферы к рассеиванию существенно меньше, чем в других регионах.

Золоотвалы занимают земельное пространство площадью 250 га и являются источниками многокомпонентного загрязнения подземных вод и атмосферного воздуха. На каждого жителя области в 1993 г. пришлось около 960 кг отходов, из них 630 кг опасных.

В работе приводятся результаты моделирования распределения концентраций вредных химических и радиоактивных выбросов во времени и пространстве на территории Томска и прилегающих районов для различных вариантов теплоэнергоснабжения города. В основу расчетных данных положен материальный баланс современной угольной ТЭС мощностью 1000 МВт с эффективностью очистки выбросов от твердых веществ 99%.

Основными параметрами, определяющими состояние пространственного распределения техногенной примеси в атмосфере (оксиды азота, оксиды серы, радионуклиды) и на подстилающей поверхности являются: высота выброса, направление среднего ветра, температура воздуха, наличие осадков, класс устойчивости атмосферы, облачность, характеристики радионуклидов, параметры турбулентного осаждения и вымывания примеси.

Пакет прикладных программ имеет несколько файлов исходных данных:

- файл, характеризующий метеообстановку на территории, прилегающей к источнику выброса (6 параметров);
- файл, характеризующий параметры источника выброса (10 параметров);
- файл, ориентирующий расчетную сетку по географической карте (2 параметра);
- файл, характеризующий параметры местности, окружающей источник выброса (2 параметра).

Программа позволяет быстро реагировать на изменение входных параметров.

Пакет прикладных программ и разработанная методика расчета, основанная на модели Пасквилла-Гиффорда, тестировались. Моделировалась ситуация, образованная технологическим инцидентом на Сибирском химическом комбинате (СХК) 13 апреля 1993 г. Результаты численных экспериментов сравнивались с данными приборных экспериментов по определению плотности радиоактивного загрязне-

ния отдельными радионуклидами на участках, попавших в контур следа. Согласие результатов более чем удовлетворительное. Сравнение проводилось с результатами, полученными в приборных экспериментах другими группами (гамма- и бета-спектрометрия).

Расчеты показывают, что на рассматриваемой территории имеются зоны существенного превышения ПДК по золе и диоксиду азота, создаваемые источниками централизованного теплоснабжения г.Томска.

Максимальные концентрации при самых неблагоприятных условиях могут достигать по золе – до 4.0 ПДК, по диоксиду азота – до 3.0 ПДК.

При работе ГРЭС-2 на угле превышение допустимых концентраций по золе нежелательно, т.к. ГРЭС-2 расположена в центре города. Выбросы по тяжелым металлам не превышают допустимые концентрации, но следует помнить, что эти металлы постоянно накапливаются и через растительную и животную цепочки оказывают влияние непосредственно на человека.

С учетом парниковых газов (CO_2) нагрузка на биосферу возрастает. По мнению специалистов, до 90% всего объема диоксида углерода может быть уловлено с помощью химических абсорбционных процессов. При этом к.п.д. станции снизится до 29%, а себестоимость производства электроэнергии увеличится примерно на 2/3. Таким образом, улавливание CO_2 обойдется дороже, чем очистка газов от золы, оксидов серы и азота и очистка сточных вод вместе взятые [2].

Тепловая станция электрической мощностью 1000 МВт выбрасывает в окружающую среду свыше 6,5 млн.т CO_2 в год.

По мнению 49 ученых – лауреатов Нобелевской премии – последствия усиления парникового эффекта на планете могут быть сравнимы лишь с последствиями глобальной ядерной войны. Средняя температура на планете к 2010 г. может повыситься на 1,3 °С, что приведет к повышению уровня Мирового океана, перераспределению осадков и изменению климатических систем.

Использование ядерной энергии уже в настоящее время позволяет почти на 10% снизить выбросы в атмосферу углекислого газа в электроэнергетике.

Экологическая проблема при развитии ТЭЦ могла бы быть частично решена за счет перевода ТЭЦ на природный газ. При всех достоинствах газа нельзя забывать, что с его использованием связано очень много проблем, возникающих при его добыче, транспортировке и конечном потреблении. Кроме того, Томская область все еще пользуется “чужим” газом и в смысле запасов органического сырья является неперспективной (газа хватит на 35 лет, нефти – на 20 лет). Цены на газ сегодня в результате государственного регулирования ниже цен на отечественный уголь и существенно ниже зарубежных цен (~1,5 – 2 раза), поэтому в ближайшее время они будут подтянуты до мировых, как произошло с углем.

Строительство атомной станции теплоснабжения с двумя реакторными установками нового поколения АСТ-500 предусмотрено в качестве первого этапа создания замещающих мощностей взамен останавливаемых в 2008 г. реакторов АДЭ-4,5.

Строительство АЭС на базе двух реакторных установок нового поколения ВВЭР-640 является вторым этапом, и с ее сооружением будет решена проблема обеспечения электроэнергией Томского региона. Поэтому были оценены концентрации аэрозольных радионуклидов, присутствующих в атмосферных выбросах АЭС указанных типов. Особое внимание среди аэрозольных радионуклидов было уделено биологически значимым: тритию ($T_{1/2}=12,3$ г.) и углероду-14 ($T_{1/2}=5730$ лет), т.к. они активно участвуют во всех обменных процессах. Газоаэрозольные выбросы перед поступлением в атмосферу очищаются от радиоактивных аэрозолей,

временно задерживаются для распада короткоживущих радионуклидов и выбрасываются через высокую трубу, что способствует лучшему их рассеиванию и уменьшению концентрации в приземном воздухе. Результаты расчетов показали, что концентрации углерода-14 и трития в приземном слое атмосферы на 5-6 порядков ниже, чем установленные для этих нуклидов предельно допустимые концентрации. Согласно многолетним данным радиационного мониторинга, при нормальной эксплуатации влияние АЭС на радиоактивность природной среды мало по сравнению с естественным фоном. Для сравнения, доза от годовых выбросов радионуклидов естественного происхождения при эксплуатации ТЭС на угле в 6-10 раз превышает дозу, обусловленную выбросами АЭС [3-7]. По оценкам ученых при работе одной новой АЭС в Европе в течение года должен наблюдаться примерно один фатальный рак, в то время как ежегодно в Европе умирают от рака ~ 800 тыс. чел.

На СХК с 1958 по 1992 гг. работала первая в Сибири атомная электростанция. С 1973 г. источник дальнего теплоснабжения работает на базе АЭС-2. Попробуем оценить последствия гипотетической ситуации, при которой АЭС-1 и АЭС-2 были бы заменены на ТЭС, работающую на березовском угле. Мощность АЭС-1 - 250 МВт (эл). Мощность АЭС-2 - 300 МВт (эл) и 570 Гкал/ч (тепловая).

Результаты расчетов показали, что, если в течение 34 лет вместо АЭС-1 работала бы ТЭС на березовском угле, то:

- понадобилось бы добыть и перевезти около 26 млн. т угля (430 тыс. 60-тонных вагонов);
- в окружающую среду поступило бы более 13 млн. т углекислого газа, 80 тыс. т оксидов серы, 12 тыс. т оксидов азота, а также примерно 4 Ки радиоактивных веществ;
- накопилось бы около 2 млн. т золы, причем в окружающую среду поступило бы 40 тыс. т золы, не уловленной фильтрами;
- накопившаяся масса тяжелых металлов в золе составила бы 744 т, в том числе 23 т токсичных элементов;
- объем потребленного кислорода составил бы 60 млн. т.

В 1973 г. первая очередь теплоснабжения на базе АЭС-2 была принята в постоянную эксплуатацию. Томские энергетики с малыми заботами получили готовое тепло, построенные сооружения и разводящие тепломагистраль, получили теплоноситель по цене 1 руб. 30 коп. за гигакалорию, тогда как свой с ГРЭС-2 получали по 3 руб. 40 коп., реализуя его получателям по 4 руб. Ежегодная прибыль от реализации обещала быть до 8 млн. руб. (цены 1974 г.).

Теплоснабжение, за счет которого обеспечивалось более 20% потребностей в тепле г.Томска, служило и продолжает служить интересам населения города и области.

Если бы это количество тепла вырабатывала ТЭС аналогичной тепловой мощности, то с 1974 по 1999 гг.:

- понадобилось бы добыть, перевезти и сжечь около 59 млн.т угля (2,26 млн.т угля в год) (980 тыс. 60-тонных вагонов);
- в окружающую среду поступило бы более 234 млн. т углекислого газа, 177 тыс. т оксидов серы, 64 тыс. т оксидов азота, а также примерно 9 Ки радиоактивных веществ;
- накопилось бы около 5 млн. т золы, причем в окружающую среду поступило бы 90 тыс. т золы, не уловленной фильтрами;
- накопившаяся масса тяжелых металлов в золе составила бы 1677 т, в том числе 53 т токсичных элементов;

- объем потребленного кислорода составил бы 137 млн. т.

В мировой практике существуют различные экономические оценки экологических ущербов. Для угольных ТЭС экологический ущерб от выбросов в денежном выражении, как правило, значительно превышает стоимость электроэнергии. Так, если в США на уровне 2000 г. она ожидается 4,8 цент/кВт·ч, то ущерб от выбросов при ее производстве оценивается в 6,6 - 8,1 цент/кВт·ч.

В ряде зарубежных исследований разработаны экономические эквиваленты удельных экологических ущербов от различных загрязнителей атмосферы.

Например, стандартные экономические эквиваленты выбросов в атмосферу, разработанные в рамках программы TEMIS (Total Emission Model for Integrated System, Институт прикладной экологии, Германия, 1993 г.), составляют за 1 т выбросов оксидов серы - 5000 нем. марок; оксидов азота - 4000 и т.д.

Следует иметь в виду, что приводимые данные относятся к современным западным энергетическим технологиям, от которых, как известно, Россия отстает по экологическим показателям.

На основании этих показателей рассчитаны экономические значения экологических ущербов, если бы АЭС-1 и АЭС-2 были замещены на ТЭС аналогичной мощности:

- АЭС-1 за свой срок работы сэкономила 1,2 млрд. экологических долларов;
- АЭС-2 - 13,6 млрд. экологических долларов.

Некоторые факторы, которые здесь количественно не оцениваются, должны значительно увеличить эколого-экономический эффект от развития атомной энергетики: потребление тепловой энергетикой кислорода и природоохранные мероприятия для его восстановления, выбросы тяжелых элементов на ТЭС и нарастание парникового эффекта, последствия которого в настоящее время широко обсуждаются и ощущаются. Большое значение имеет также экологический ущерб, связанный с временным или постоянным отчуждением земельных ресурсов. Томск пока не входит в перечень городов РФ с наибольшим уровнем загрязнения атмосферного воздуха. По индексу загрязнения воздуха по городам Западной Сибири г.Томск резко контрастирует со следующими городами: г.Томск - 9,55; Искитим - 73,16; Прокопьевск - 62; Кемерово - 32; Новосибирск - 24,25. Созданный томичами "Атлас раковой клетки" установил четкую зависимость развития онкологии от загрязнения внешней среды. По сравнению с другими городами, где и не "пахнет" ядерно-топливным циклом (Канск, Барнаул, Бийск, Кемерово, Новокузнецк и др.), томичи находятся в лучшем положении. Но такое положение может резко измениться в худшую сторону при ошибках в выборе стратегии энергообеспечения Томского региона.

В Томске разработана областная программа энергосбережения, которая получила высокую оценку на федеральном уровне. Но, по нашему мнению, в ней недостаточное внимание уделено развитию ядерной энергетики. А ведь она является энергосберегающей технологией, т.к. удовлетворяет основным требованиям минимального потребления энергии на собственные нужды (около 4% в ядерном топливном цикле), а отработанное топливо используется в качестве вторичных ресурсов.

Если сравнивать с другими технологиями, то, например, 20% всех добываемых газовых энергоресурсов тратится на доставку к местам потребления, а 10% - на аварийные выбросы и утечки. Кроме того следует учитывать еще экологические факторы и ограниченность запасов газа. А имеющиеся запасы добытого урана обладают энергопотенциалом в 15 трл. кВт·ч плюс энергопотенциал оружейного ядерного материала в 12÷14 трл. кВт·ч. Подобное количество энергии все элект-

ростанции России будут вырабатывать в течение 35 лет. С другой стороны, это количество энергии эквивалентно экономии 7 трлн. м³ газа, которого хватило бы для экспорта нынешнего ежегодного объема в Западную Европу в течение 110 лет.

С учетом проблематичности строительства и ввода в строй в ближайшие сроки достаточных мощностей на природном газе, ориентация должна быть сделана на строительство АЭС с наиболее надежными реакторными установками нового поколения наряду со строительством тепловых ТЭС с ограничением их мощностей пределами, которые определяются допустимым их влиянием на природную среду и непосредственно на человека.

Список литературы

1. Экологическое состояние, использование природных ресурсов, охрана окружающей среды Томской области в 1994 г. – Томск: Государственный комитет экологии и природных ресурсов Томской области, 1993.
2. Бюллетень ЦНИИАтоминформ. – 1993. - № 3.
3. Атомная энергия. – 1998. - Т. 85. - Вып. 2.
4. *Крышев И.И., Алексахин Р.М., Сазыкина Т.Г. и др.* Радиоактивность районов АЭС. - М.: Ядерное общество СССР, 1991.
5. *Гусев Н.Г., Головкин М.Ю., Шамов О.И. и др.* Выброс радиоактивных газов и аэрозолей серийными атомными станциями // Атомная энергия. – 1993. - Т. 74. - Вып. 4. - С. 360—364.
6. *Косинский В.В., Орлов М.И., Шамов В.П.* Образование трития на атомных электростанциях с РБМК и его поступление в окружающую среду. - М.: ЦНИИАтоминформ, 1987.
7. *Блинова Л.Д., Недбаевская Н.М.* Ленинградская АЭС: радиоэкологический мониторинг. В сб.: Научный информ.-метод. бюл. – 1995. - № 2/3. - (Ядерное общество России).

Поступила в редакцию 5.01.2000.

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ПРОТЕКАНИЯ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ОБЕСТОЧИВАНИЯ ЭНЕРГБЛОКА

А.Ю.Проходцев*, Н.Л.Сальников**

* Южно-Украинская АЭС, Украина

** Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск



Рассмотрено формирование начальных и граничных условий для использования расчетного кода RELAP5 при анализе переходных процессов при обесточивании блока ВВЭР-1000. Показано, что для проектных аварий с обесточиванием наихудшие условия по безопасности создаются при отказе БРУ-А на срабатывание.

ВВЕДЕНИЕ

Для корректного проведения расчетов переходных процессов в реакторной установке с применением теплогидравлических компьютерных кодов типа RELAP, MELCOR, ATHLET большое значение имеет правильный выбор граничных и начальных условий. Под граничными условиями подразумеваются наборы конфигураций систем и оборудования реакторной установки, т.е. количество срабатывающих каналов систем, моделирование отказов оборудования и персонала.

Начальные условия включают в себя параметры, характеризующие состояние энергоблока, которые непосредственно измеряются на станции (например, давление, температура, и т.д.), либо могут быть рассчитаны (например, коэффициенты реактивности, эффективность органов СУЗ и т.д.). Кроме этого, к начальным условиям относятся некоторые проектные условия, такие как эффективная доля запаздывающих нейтронов, предельные значения коэффициентов неравномерности. Обычно, в качестве начальных условий выбирают предельные значения параметров (с учетом погрешности системы измерения) из диапазона, характеризующего нормальную эксплуатацию энергоблока (эксплуатационные пределы)

[эксплуатационный предел] = [номинальное значение] + [отклонение],

где [отклонение] - допустимое отклонение значения параметра от номинальной величины, вызванное работой систем контроля и управления и/или работой оборудования (погрешность измерения и/или регулирования) [1].

Начальные условия представляют собой отправную точку для создания стационарного (иными словами исходного) состояния реакторной установки. Из этого стационарного состояния, которое, как правило, представляет собой расчет работы реакторной установки на номинальном уровне мощности, начинается расчет любых переходных процессов. Переходными процессами, анализируемыми с применением, теплогидравлических кодов типа RELAP, ATHLET, могут быть течи

I и II контуров, срабатывания систем безопасности, отключения насосов или любые другие процессы в реакторной установке.

При применении теплогидравлических расчетных кодов, для подготовки входных данных для расчетов составляются расчетные матрицы, включающие варианты конфигураций оборудования. Рассмотрим три варианта поведения модели реакторной установки при использовании расчетного кода RELAP5 такого, часто встречающегося переходного процесса, как потеря внешнего электроснабжения [2]. Цель данных расчетов – определить такой отказ, воздействие которого на параметры внутри реакторной установки наиболее значительно.

ОПИСАНИЕ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА

Анализ ситуации, связанной с потерей внешнего электроснабжения, представляет большой интерес, т.к. его возникновение связано с так называемыми *внешними рисками*, которые имеют для АЭС существенное значение. Ситуация осложняется тем, что внешние риски возникают вследствие таких событий, на возникновение которых атомная станция не может оказывать какое-либо влияние. Например, наводнение, лесные пожары, социальные риски и другие. В данном классе событий к наиболее вероятным рискам можно отнести отключения турбогенератора от системы в результате, например, падения частоты в энергосистеме ниже установленного для безопасной эксплуатации значения, а также замыкание или обрыв в высоковольтных сетях. Частота возникновения исходных событий, приводящих к потере внешнего электроснабжения, составляет $1 \cdot 10^{-2}$ реактор/лет [3].

Обесточивание энергоблока приводит к нарушению нормального отвода тепла по первому и второму контурам вследствие отключения ГЦН, останова ТГ и потери одного из конечных источников поглощения тепла – системы циркуляционной воды. Временное обесточивание данных систем происходит, поскольку аварийное питание от дизель-генераторов поступает, с учетом времени запуска автоматики ступенчатого пуска и времени на разворот ДГ, через 17 сек. после обесточивания АЭС. Но и после запуска ДГ, отключенные ГЦН не включаются. Это не предусмотрено регламентом. Так же, как и остаются выключенными до восстановления нормального электропитания и другие системы, кроме систем безопасности. Далее возможны варианты с отказами систем безопасности.

На дальнейшее развитие событий оказывают влияние ряд различных факторов, формирующих перечень граничных условий, используемый при моделировании переходных процессов. Различия в граничных условиях обуславливают конечное состояние энергоблока, параметры реакторной установки и прочие характеристики процесса. Среди условий, влияющих на протекание аварийного переходного процесса, возникающего в результате исходного события “Потеря внешнего электроснабжения”, можно назвать следующие:

- срабатывание паросбросных устройств второго контура (БРУ-А, БРУ-К, предохранительные клапаны ПГ и КД);
- застревание наиболее эффективного кластера СУЗ (консервативное условие);
- срабатывание автоматики ступенчатого пуска (АСП);
- запуск дизель-генераторов;
- работа каналов систем безопасности;
- начало/конец кампании реактора;
- работа нагревателей КД и другие.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОГО ЕДИНИЧНОГО ОТКАЗА НА ОСНОВЕ РАСЧЕТОВ

Подобная зависимость поведения объекта моделирования (т.е. реакторной установки) от граничных условий, отражающая изменение конфигурации объекта, имеет сложный характер. Поэтому необходимо явное моделирование всех отказов систем, оказывающих влияние на переходной процесс. На рис.1 приведены результаты расчетов с применением RELAP5 для исходного события – потеря внешнего электроснабжения АЭС. Рисунок иллюстрирует различие в поведении давления II (верхняя часть) и I (нижняя часть рис.1) контуров для случаев проектной

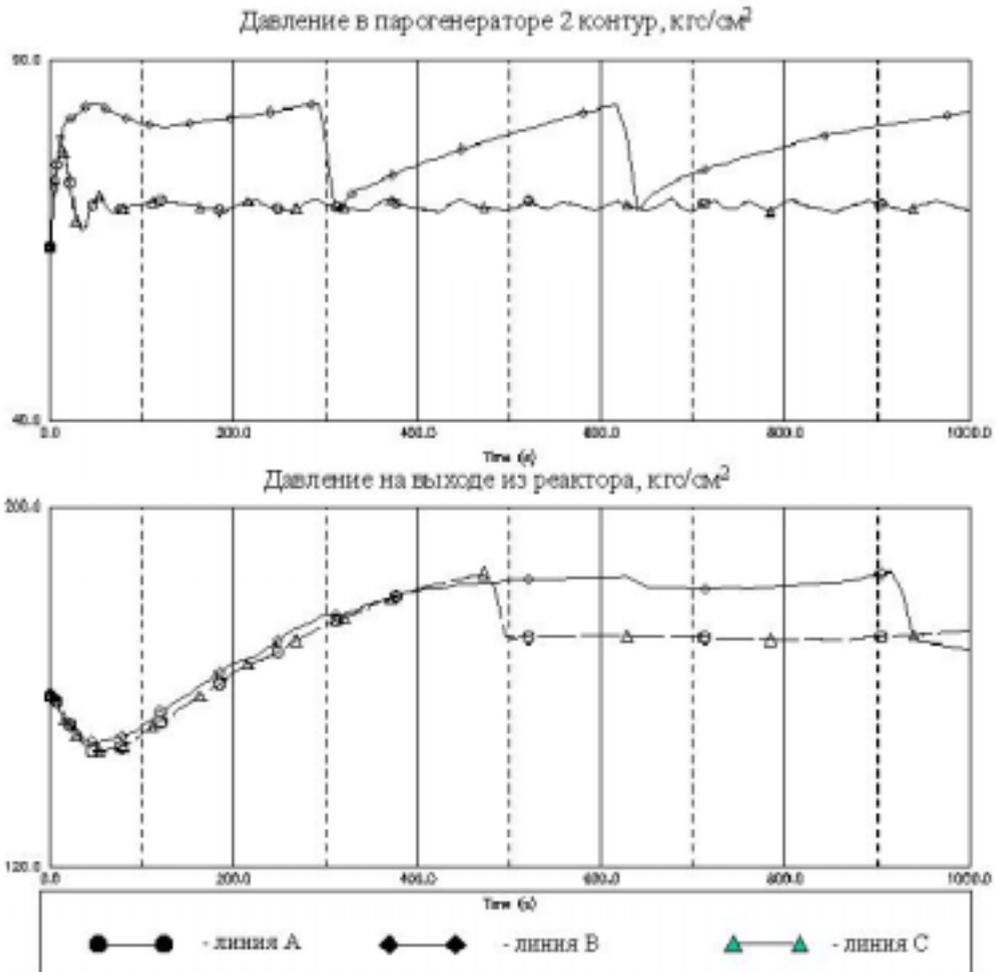


Рис.1.

работы всех систем (кривая В), отказа БРУ-А одной из петель (кривая А), отказа на запуск СА03 ВД (кривая С).

Отказы систем БРУ-А и СА03 - наиболее важные, с точки зрения воздействия на параметры реакторной установки, отказы в работе систем. Это связано с тем, что нормальное функционирование БРУ-А и СА03 необходимо для приведения реакторной установки в устойчивое безопасное состояние после срабатывания ава-

рийной защиты. Работой БРУ-А обеспечивается предохранение II контура от превышения давления, а СА03 ВД в данном случае обеспечивает подкритичность реактора вводом раствора борной кислоты. Здесь рассмотрены отказы только одного из каналов каждой из систем. Таким образом, рассчитанные переходные процессы представляют собой пример расчета *проектной аварии*, и демонстрируют реакцию энергоблока на *единичный отказ*.

Проектной считается авария, для которой проектом определены исходные события, конечные состояния и предусмотрены системы безопасности, обеспечивающие с учетом принципа *единичного отказа* систем безопасности или одной, не зависимой от исходного события, ошибки персонала, ограничение ее последствий установленными для таких аварий пределами [4].

Под принципом *единичного отказа* понимается принцип, в соответствии с которым система должна выполнять заданные функции при любом, требующем ее работы, исходном событии и при не зависимом от исходного события отказе одного из активных или пассивных элементов, имеющих механические движущиеся части [4].

Цель формирования расчетной матрицы, содержащей максимальные достигаемые значения параметров в РУ, заключается в определении такого единичного отказа, который создает наихудшие условия для оборудования энергоблока. Для этого оцениваются параметры теплоносителя и количество срабатывающих систем безопасности. В частности, необходимо оценить давление и температуру в первом контуре, давление II контура, момент достижения уставок срабатывания паросбросных устройств I и II контуров, уровни в парогенераторах и т.д. Чем более высокие параметры теплоносителя достигаются, тем большее значение приобретает соответствующий отказ, который был причиной отклонения параметров.

Проведем анализ результатов расчетов по коду RELAP5, который представлен в табл.1

При отказе БРУ-А одной из петель достигается максимальное значение давления II контура в соответствующем паропроводе, равное 84 кгс/см², что приводит к срабатыванию предохранительного клапана парогенератора, а при работе БРУ-А без отказов давление не достигает максимума и предохранительные клапаны не срабатывают.

Отказ одного из каналов СА03 не сказывается сколько-нибудь заметно на поведении давления II контура. Все параметры объекта при отказе СА03 ВД ведут себя практически так же, как если бы никаких отказов не было, что говорит о том, что для данной аварии достаточно оставшихся двух каналов СА03 ВД для обеспечения выполняемой ими функции.

Отказ БРУ-А, следовательно, может рассматриваться как наиболее важный еди-

Таблица 1

Максимальные параметры РУ, достигаемые во время переходных процессов (рассчитаны с применением RELAP5/МОД3)

Процесс	Максимальная T _{контур} , °С	Максимальное P _{1контур} , кгс/см ²	Максимальное P _{2контур} , гс/см ²	Максимальная T оболочки твэл, °С
Обесточивание с отказом БРУ-А	311	185	84	347
Обесточивание с отказом СА03 ВД	307	185	77	347
Обесточивание без отказов	307	185	77	347

ничный отказ, поэтому данный отказ может быть использован для анализа *группы проектных аварий* данного класса.

Несмотря на повышение параметров реакторной установки, давление в I и II контурах и температура оболочки твэл остается ниже максимально допустимой (максимальное давление в I и II контуре – 190 и 86 кгс/см² соответственно, максимальная температура поверхности оболочки твэл – 350°C [5]) во всех случаях. Поэтому повреждения оборудования первого и второго контуров не наблюдается. Сверхнормативного выхода продуктов деления нет, а срабатывание предохранительных устройств I и II контуров носит кратковременный характер и не приводит к повреждению оборудования.

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ В РАСЧЕТЕ ОБЕСТОЧИВАНИЯ С ОТКАЗОМ БРУ-А

Рассматриваемый случай с отказом БРУ-А подтверждает, что превышения проектных пределов и условий работы оборудования первого и второго контуров не происходит. Тем не менее, для обеспечения безопасного останова реактора потребуется работа ряда систем безопасности. В том числе, аварийная защита, предохранительные клапаны парогенератора и компенсатора давления, САОЗ и др. Граничные условия, отражающие принятую для расчета процесса обесточивания с отказом БРУ-А конфигурацию оборудования (в сокращенном виде), представлены в табл. 2. Граничные условия для обесточивания с отказом САОЗ ВД формируются аналогично, но отказ БРУ-А, соответственно, исключается, а вводится отказ одного из каналов САОЗ ВД.

В табл. 2 приведены все системы, которые могут потребоваться в ходе переходного процесса. Предварительно для того, чтобы уменьшить количество необходимых расчетов, можно исключить из рассмотрения в качестве единичного отказа некоторые из систем. Часть из систем в табл. 2 будет отключена обесточиванием (ГЦН, БРУ-К, ТПН, ВПЭН). Другие, такие как АЗ, АПЭН, САОЗ, ПККД имеют многократное резервирование, поэтому отказ одного из каналов для них не критичен.

В коде RELAP5 [6] существует возможность использовать также некоторые дополнительные граничные условия. В частности, застревание наиболее эффективного кластера органов регулирования в верхнем положении и эффекты реактивности. В некоторых случаях это обеспечивает большую степень гибкости граничных условий [7].

В связи с тем, что сценарий с отказом БРУ-А приводит к наибольшему отклонению режима второго контура от номинального, то этот сценарий образует “границу” наихудшего сценария из всех возможных. Поскольку при всех иных единичных отказах, параметры реакторной установки отклоняются менее значительно, то в дальнейшем это позволяет утверждать, что все остальные варианты развития аварии приведут к заведомо меньшим последствиям для безопасности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При определении граничных условий (наборов конфигурации систем и оборудования) большую роль играет цель, для которой будут проводиться расчеты. Расчеты для проектных аварий имеют характерную особенность, которая заключается в использовании принципа единичного отказа. Эта особенность накладывает ограничение на количество одновременно отказывающихся систем.

Однако в анализе запроектных аварий, как и в вероятностном анализе безопасности, принцип единичного отказа не применяется. В результате существенно возрастает число рассматриваемых комбинаций отказов и состояний реакторной

Таблица 2

Граничные условия переходного процесса с отказом БРУ-А

Элемент/Система Модели	Проект	Отказ
Контроль мощности реактора (АРМ, РОМ, АЗ)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Контроль давления в I контуре (система КД)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Контроль запаса теплоносителя в I контуре (продувка/подпитка)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Контроль расхода теплоносителя в I контуре (ГЦН, ГЗЗ)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Контроль давления во II контуре		
БРУ-К	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
БРУ-А		
“аварийного” ПГ	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
“нормального” ПГ	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
“двойного” ПГ	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
ПК-ПГ	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Подпитка ПГ (ТПН, ВПЭН, АПЭН)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Контроль расхода пара из ПГ	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Система аварийного охлаждения		
Гидроемкости САОЗ	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
САОЗ-ВД (ЦН-150/110)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
САОЗ-ВД (ПТ-6)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
САОЗ-НД	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Дополнительные условия		
Застревание наиболее эффективного кластера в верхнем положении	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Обесточивание	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Расхолаживание	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
Контроль давления в ГО	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Эффекты реактивности:		
- плотностной	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
- температурный	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
- борный	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Паро-циркониевая реакция	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>

установки. В таких случаях количество необходимых теплогидравлических расчетов для каждого класса исходных событий значительно возрастает.

ВЫВОДЫ

- Проведенные расчеты подтверждают важность тщательного подбора условий протекания аварийного процесса для корректного отображения реакции энергоблока на возникновение ИСА.
- Входные данные для расчета проектных аварий с помощью компьютерных кодов должны быть адаптированы с учетом начальных и граничных условий.
- Для проектных аварий с обесточиванием наихудшие условия создаются при отказах на срабатывание БРУ-А

- Превышения проектных пределов для состояния оборудования при этом не наблюдается.
- Принцип единичного отказа, заложенный в определении проектной аварии, накладывает существенные ограничения на условия протекания аварии и суживает спектр анализируемых отказов систем реакторной установки в сравнении с анализом запроектных аварий и вероятностным анализом безопасности.

Список литературы

1. Проект углубленного анализа безопасности энергоблока №1 ЮУАЭС. Руководство по проекту SUPG-13. Анализ проектных аварий. - Южноукраинск, 1999.
2. Проект углубленного анализа безопасности энергоблока №1 ЮУАЭС. Финальный отчет. - Южноукраинск, 1999.
3. Проект углубленного анализа безопасности энергоблока №1 ЮУАЭС. Идентификация и группирование ИСА. - Южноукраинск, 1999.
4. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций (ОПБ-88). Утверждены постановлением Госатомэнергонадзора СССР 06.06.89 №9.
5. Технологический регламент безопасной эксплуатации энергоблока №1 Южно-Украинской АЭС. – Южноукраинск, 1998.
6. NUREG/CR-5535, INEL-95/0174. RELAP5/MOD3 Code Manual, User's Guide and Input Requirements. - Idaho Falls, Idaho. August, 1995.
7. IAEA-EBP-WWER-01, Guidelines for Accident Analysis of WWER Nuclear Power Plants, 1995.

Поступила в редакцию 30.12.99.

УДК 539.17.013

ТОЧНЫЕ И ЧИСЛЕННЫЕ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ И КИНЕТИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ

В.А. Галкин, М.А. Забудько

Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск



В статье рассматриваются методы решения нелинейных уравнений теплопроводности и кинетических уравнений, возникающих при моделировании задачи о кристаллизации вещества. Получено точное решение задачи Стефана. Численная регуляризация проводится на основании метода Галеркина. Исследованы вопросы сходимости.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из проблем, с которыми связано создание и эксплуатация реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем свинец-висмут, является проблема замораживания-размораживания I контура.

При замораживании сплава, его нагреве и охлаждении в твердом состоянии могут возникать значительные механические воздействия на конструкции, обусловленные несогласованностью перемещений объемов сплава с перемещениями конструкций и соизмеримостью механических свойств сплава в твердом состоянии со свойствами конструкционных материалов.

С целью максимального исключения подобных ситуаций в установках предусматривалось постоянное поддержание контура в «горячем» состоянии как теплом реакции деления, так и с помощью системы внешнего обогрева. Однако даже это не исключало вероятность замораживания контура в некоторых ситуациях.

В связи с этим, практически с первых шагов проектирования установок проводились работы по обоснованию режимов замораживания-размораживания. Решение проблемы шло как по пути прямой экспериментальной отработки режимов на моделях, макетах, элементах оборудования и агрегатах в целом, так и по пути изучения характеристик сплава.

Большим стимулом к дальнейшему решению проблемы замораживания-размораживания явились разработки установок новых поколений, для которых ставилась задача - снять многие ограничения, связанные с режимами кристаллизации.

Поэтому чрезвычайно полезным в этой ситуации оказывается математическое моделирование, позволяющее определять и прогнозировать параметры процесса кристаллизации.

Исторически сложилось, что исследования процесса кристаллизации ведутся в двух практически самостоятельных направлениях. Первое ограничивается рассмотрением тепловой стороны процесса, т.к. при выращивании монокристаллов

из расплава важнейшими факторами, определяющими их качество являются температурные условия: градиенты температуры в монокристалле определяют уровень термомеханических напряжений и концентрацию дислокаций; распределение температуры в расплаве определяет интенсивность конвективных течений, уровень пульсаций температур и характер распределения примесей на фронте кристаллизации и т.д. Таким образом, изучается влияние различных условий теплоотвода от фронта кристаллизации на скорость изменения размеров области, занятой твердой фазой. При этом температура на границе раздела фаз считается совпадающей с температурой их равновесия, фронт кристаллизации считается единым и непрерывным, а возможность возникновения кристаллов в объеме расплава не учитывается. В такой постановке вся проблема может трактоваться как задача математической теории теплопроводности (так называемая, задача Стефана [1]-[4]).

Что касается второго направления в теоретических исследованиях кристаллизации, то его представители обычно ограничиваются изучением собственно кинетики процесса. Они исходят из понятий скорости зарождения и скорости роста кристаллов. Соответствующие математические модели описывают процесс образования и роста поликристаллов (т.е. кристаллов, состоящих из множества мелких частиц-кристаллов) в объеме переохлажденного расплава.

Следует заметить, что как аналитическое, так и численное решение этих двух групп задач представляет собой довольно сложную проблему из-за негладкости коэффициентов и нелинейности уравнений. В данной статье предлагаются некоторые новые подходы к их решению основанные на применении метода Галеркина. Кроме того, получено частное точное решение двумерной задачи Стефана.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ СТЕФАНА

Пусть требуется найти $U^1(x,t), U^2(x,t)$ - температуры в различных фазах вещества и поверхность S_T - фронт раздела фаз. Поверхность S_T является простой незамкнутой гладкой поверхностью. В качестве области определения независимых переменных $x=(x_1, x_2, x_3)$ и t берется область $D \times [0, T]$, причем U^1, U^2 и S_T должны быть найдены из условий:

$$\alpha(U^n)U_t^n - \sum_{i,j} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(k(U^n) \frac{\partial U^n}{\partial x_i} \right) = 0, \quad n=1,2; \quad i, j=1,2,3, \quad (1)$$

где $\alpha(U), k(U)$ - коэффициенты, зависящие от свойств кристаллизующегося вещества. Здесь следует заметить, что данные коэффициенты не являются гладкими в общем случае и могут иметь разрывы первого рода.

$$U|_{t=0} = \varphi(x), \quad U|_{\partial D} = 0. \quad (2)$$

$$[U]_{S_T} = 0. \quad (3)$$

Условие (3) обозначает равенство температур U^1 и U^2 на линии фронта кристаллизации. Знак $[]$ обозначает скачок ($[U]=U^1-U^2$).

Кроме того, на границе раздела фаз выполнено условие Стефана (4), являющееся следствием закона сохранения энергии.

$$\lambda \rho \frac{\partial x_i}{\partial t} = k_1 \frac{\partial U^1}{\partial x_i} \Big|_{S_T} - k_2 \frac{\partial U^2}{\partial x_i} \Big|_{S_T} = [kU_{x_i}]_{S_T}, \quad (4)$$

где ρ - плотность вещества; λ - скрытая теплота кристаллизации; k_1, k_2 - коэффициенты теплопроводности в разных фазах вещества.

Было доказано, что данное условие аналогично условию Гюгиони для уравнений газовой динамики. Таким образом, при решении тепловой задачи о кристаллизации вещества учет этого условия не является обязательным.

Для двумерной задачи (1)-(4) при случае сферической геометрии и когда $k(U^1) = a_1^2, k(U^2) = a_2^2$, удалось получить точное решение:

$$U^1(r, z, t) = C_1^1 J_0(\sqrt{v^2} r) \exp(a_1^2(\gamma - v)t - \gamma^2 z) + C_2^1,$$

$$U^2(r, z, t) = C_1^2 J_0(\sqrt{v^2} r) \exp(a_2^2(\gamma - v)t - \gamma^2 z) + C_2^2,$$

где r, z - пространственные переменные, t - температура, $U^1(r, z, t), U^2(r, z, t)$ - температуры в разных фазах, $C_1^1, C_1^2, C_2^1, C_2^2, \gamma, v$ - const.

ОБОБЩЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ (1)-(3)

Задаче Стефана посвящена обширная литература (например, [1] - [4]). Однако вопрос о существовании классического решения задачи Стефана для многомерного случая остается нерешенным до последнего времени. Причина этого, как уже говорилось во введении, это - нелинейность самой задачи и разрывность коэффициентов $\alpha(U), k(U)$ на границе раздела фаз. Для численного решения задач такого типа очень эффективным оказывается введение понятия обобщенного решения в смысле Филлипова [5].

Пусть $Q = R^3; \Omega = R^1$. Рассмотрим: \mathcal{B}^k - счетную систему борелевых функций; \mathcal{B}^∞ - бесконечно дифференцируемые функции по переменным $(x, t) \in R^n \times R^1$; $L(A, \nu)$ - множество борелевых функций на множестве A , локально суммируемых по борелевой мере ν , где $\nu = dx \otimes dt$. На множестве функций

$$M = \{U \in L_1(Q, \nu) : k(U) \in L_1^{loc}(Q, \nu)\}$$

рассматривается система интегральных уравнений относительно неизвестной переменной $U \in M$

$$\int_Q [U g_t + \sum_i \tilde{k}(U) g_{x_i x_i}] dx dt + \int_\Omega g(x, 0) \varphi(x) dx = 0 \quad (5)$$

$$\forall g(x, t) \in \mathcal{B}^\infty.$$

Система (5) служит для определения обобщенного решения $U \in M$ задачи Стефана (1)-(3).

В работах [6], [7] построены разностные методы решения системы (5), которые, однако, обладают рядом недостатков. Во-первых, для расчета по таким методам многомерных задач требуются очень большие аппаратные ресурсы и много времени. Во-вторых, такие методы позволяют рассчитывать либо некоторые интегральные характеристики процесса, например, потенциал теплового поля, либо используют какое-то сглаживание разрывных коэффициентов уравнений. Поэтому они не позволяют вычислить с достаточной точностью положение фронта кристаллизации, что является совершенно необходимым с практической точки зрения.

Предлагаемое в работах [8] - [9] расширение понятия решения (функциональное решение) позволяет обосновать сходимость приближенных методов при наличии равномерной по параметру априорной оценки аппроксимаций в пространствах $L_p^{loc}, 1 \leq p \leq \infty$.

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ (1)-(3)

Обозначим ε как векторное пространство, состоящее из линейных комбинаций

$$F_{g,g_1} = U g_t + \sum_i \tilde{k}(U) g_{x_i} + U g_1$$

с произвольными $g_1 \in \mathbb{B}$, $g \in \mathbb{B}^\infty$. Для каждого вектора $F \in \varepsilon$ определим операторы π, π_0 следующими соотношениями:

$$\pi(F_{g,g_1}) = F_{g,0}, \pi_0(F_{g,g_1}) = F_{0,g|_{t=0}}.$$

Пусть $\varepsilon^+ = \{l\}$ - алгебраически сопряженное пространство к ε . На ε^+ зададим топологию $\sigma(\varepsilon^+, \varepsilon)$ посредством системы полунорм $\{p_F\}_{F \in \varepsilon}$, где $p_F(l) = |l(F)|, F \in \varepsilon, \forall l \in \varepsilon^+$. Рассмотрим вложение множества M в ε^+ , которое определим формулой

$$\forall U \in M: U \alpha \quad l_U \in \varepsilon^+, \quad l_U = \int_Q (F \circ U)(dQ), F \in \varepsilon.$$

В работе [9] доказано, что это вложение мономорфно на классах эквивалентности функций из M . Обозначим $[M]$ - замыкание образа вложения множества M в ε . На множестве $[M]$ рассмотрим индуцированную тихоновскую топологию $\sigma(\varepsilon^+, \varepsilon)$.

Определение 1. Элемент $l \in [M]$ назовем функциональным решением уравнения (1), если для каждого элемента $F \in \varepsilon$ справедливо равенство

$$l(\pi(F)) + l_{U_0}^{(0)}(\pi_0(F)) = 0. \tag{6}$$

Определение 2. Приближенный метод **AM** решения задачи (5) слабо аппроксимирует задачу (6), если можно указать заданную этим методом обобщенную последовательность приближений $U_{\alpha_n} \in M$, для которой значения невязки

$$\delta_n(F) = \left| l_{U_{\alpha_n}}(\pi(F)) + l_{U_{\alpha_n}|_{t=0}}(\pi_0(F)) \right| + \left| \left(l_{U_0}^{(0)} - l_{U_{\alpha_n}|_{t=0}}^{(0)} \right) \pi_0(F) \right|, F \in \varepsilon, n \in \mathbb{N}$$

стремятся к нулю при каждом $F \in \varepsilon$ когда $n \rightarrow \infty$

Определение 3. Приближенный метод **AM** сходится, если он определяет сходящуюся последовательность $l_{U_{\alpha_n}}$ в пространстве $[M]$, пределом которой является функциональное решение задачи (6).

Определение 4. Назовем приближенный метод **AM** слабо устойчивым, если

$$\sup_{\alpha \in A_K} \int |U_\alpha| v(dQ) < \infty$$

для каждого компакта $K \subset Q$.

Эффективность введенных понятий обусловлена их проверяемостью и возможностью доказательства существования в целом функциональных решений, являющихся предельными точками методов со свойствами слабой аппроксимации и слабой устойчивости. В работе [9] была доказана следующая теорема на основании которой ниже будет обоснована применимость метода Галеркина для решения задачи Стефана.

Теорема 1. Пусть приближенный метод **AM** слабо аппроксимирует задачу (6) и является слабо устойчивым. Тогда он сходится к регулярному функциональному решению задачи (6).

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД ГАЛЕРКИНА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ (1)-(3)

Рассмотрим счетную систему борелевых функций $\{\phi_j\}$. Определим приближенный метод решения задачи (1)-(3) посредством следующих соотношений:

$$U^m = \sum_{j=1}^m C_j^m(t)\phi_j(x), m \geq 1, \quad (7)$$

$$\int_Q [U^m \phi_k + \sum_i \tilde{k}(U^m)\phi_{k;x_i x_i}] dx dt = 0, \quad (8)$$

$$U^m|_{t=0} = U_0^m. \quad (9)$$

Для доказательства сходимости этого метода достаточно проверить свойства слабой аппроксимации и слабой устойчивости. Доказательство того, что невязка метода стремится к нулю аналогично приведенному в книге [10]. Слабая устойчивость метода обосновывается на основании априорных оценок, из которых следует свойство равномерной локальной суммируемости для U^m . Таким образом, справедлива следующая теорема.

Теорема 2. Приближенный метод (7)-(9) сходится к регулярному функциональному решению задачи (1)-(3).

ТОЧНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА

При помощи метода, описанного в предыдущем пункте, можно приближенно найти значения температур в обеих фазах вещества. Дальнейшее точное восстановление поверхности фазового перехода осуществляется на основании решения следующего дифференциального уравнения:

$$\Phi_t + (k_1 \text{grad} U^1 - k_2 \text{grad} U^2, \text{grad} \Phi) = 0, \quad (10)$$

где $k_1 = \text{const} > 0$, $k_2 = \text{const} > 0$, $F(x, t) = 0$ - уравнение поверхности фазового перехода.

Уравнение (10) может быть легко получено из классического условия Стефана (4). Как можно видеть уравнение (10) эквивалентно следующему уравнению:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(V\Phi) = 0, \quad (11)$$

где V - скорость фронта кристаллизации, причем очевидно, что она не обладает свойством гладкости.

Как видно из (11) расчет поверхности фазового перехода можно вести, зная только скорость кристаллизации. Современные средства ультразвукового зондирования позволяют измерять эту скорость непосредственно во время ростового эксперимента. Таким образом возможно управление параметрами эксперимента на основании данных о положении и форме фронта.

Для приближенного решения уравнения (11) используем метод исчезающей вязкости, на основании решения следующих аппроксимирующих задач:

$$\frac{\partial \Phi_\alpha}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(V\Phi_\alpha) = \alpha_i \frac{\partial^2 \Phi_\alpha}{\partial x^2}, \Phi|_{t=0} = \Phi_0. \quad (12)$$

Сходимость метода обоснована в работе [9].

Теорема 3. Пусть при $\forall \alpha = \{\alpha_i\}_1^m$ задача (12) имеет гладкое решение, которое удовлетворяет требованию равномерной локальной суммируемости

$$\sup_{\alpha_i} \int_0^T \int_{R^3} \|\Phi_\alpha\| dx dt < \infty$$

на каждом компакте $K \subset R_3 \times R_1^+$. Тогда для некоторой обобщенной подпоследовательности $\alpha^{(k)} \rightarrow 0$ приближения Φ_α сходятся к функциональному решению задачи (12).

Для численного решения уравнения (12) снова используется метод Галеркина, применимость которого для параболического уравнения такого вида обоснована в [11].

КИНЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОЦЕССА ОБЪЕМНОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

При полном математическом моделировании процессов тепло- и массопереноса при кристаллизации возникают значительные трудности из-за того, что на течение расплава влияет тонкий слой между твердой и жидкой фазами вещества. Этот слой не является ни жидкостью, ни твердым телом, и поэтому все его физические свойства не определены. Предлагаемая математическая модель описывает поведение такого слоя на основании гипотезы, что он состоит из частичек, зародышей кристаллизации (твердой фазы вещества) и переохлажденного расплава (жидкой фазы).

Рассмотрим в ограниченном объеме механическую смесь частичек и расплава. Частичек достаточно много, и они движутся хаотически. Состояние этой системы в каждый момент времени t описывается плотностью вероятности распределения частиц $f(m,t)$ по массам m . В начальный момент времени состояние системы задается плотностью вероятности распределения f_0 . Новые частицы могут поступать в нашу систему за счет источника, который действует с интенсивностью $q(m,t)$. На практике источником может быть, например, неоднородность среды, т.е. мы помещаем в нашу систему ионы какого-либо вещества, на них немедленно конденсируется расплав и образуются новые частицы. Функция Φ - это интенсивность столкновений частиц.

Гипотеза, на основе которой написано уравнение (13), предполагает коагуляционный характер кристаллизации. Для пояснения рассмотрим пробную частицу, которая проходит через расплав. Во время этого прохождения масса частицы увеличивается за счет ее движения в спектре. Это отражает второе слагаемое в левой части нашего уравнения (13), т.е. второе слагаемое - это эволюция в фазовом пространстве за счет «поедания» других частиц. Это слагаемое отражает власовский подход в нашем уравнении, но в отличие от модели Власова, где нет соударений, у нас соударения есть. Следовательно, в процессе движения пробная частица при столкновении может либо погибнуть, либо поглотить частицу, с которой она столкнулась. Интенсивность гибели частиц спектра отражает первое слагаемое в правой части уравнения (13). И, наконец, первое слагаемое в левой части отражает изменение спектра.

Таким образом, наша модель кристаллизации описывается уравнением (13), которое есть уравнение Лиувилля для системы частиц, где учитывается их гибель, т.е. изменение фазового пространства.

$$\frac{\partial f(m,t)}{\partial t} + \frac{\partial mf(m,t)}{\partial t} = -\frac{1}{2} f(m,t) \int_0^\infty \Phi(m,y) f(y,t) dy + q(m,t), t > 0. \quad (13)$$

Начальное условие:

$$f|_{t=0} = f_0 \geq 0. \tag{14}$$

Считаем, что интенсивность столкновений частичек $F(m, t)$ является гладкой функцией и $0 \leq \Phi(m, y) = \Phi(y, m) < \infty$. Функция $q(m, t)$ также является ограниченной. Вдоль характеристик уравнения (13) имеем:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = -\gamma f + q, \tag{15}$$

где

$$\begin{aligned} \gamma(f) &= \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial m_0} \int_0^\infty \Phi(m, y) f(y, t) y dy + \frac{1}{2} \int_0^\infty \Phi(m, y) f(y, t) dy, \\ \dot{m} &= \frac{1}{2} \int_0^\infty \Phi(m, y) f(y, t) y dy. \end{aligned}$$

Отсюда легко видно, что задача Коши (15),(14) имеет следующее решение:

$$f = f_0 \exp \left[- \int_0^t \gamma(f) d\tau \right] + \int_0^t \exp \left[- \int_\tau^t \gamma(f) ds \right] q(\tau) d\tau. \tag{16}$$

На основании ряда априорных оценок для (16) можно доказать следующую теорему.

Теорема 4. Пусть $f_0, q \in C$, ограничены при $0 \leq t \leq T$. Тогда существует единственное решение задачи (13),(14) при $0 \leq t \leq T$.

Из уравнения (16) видно, что неотрицательным начальным данным соответствует неотрицательное, ограниченное локальное решение. Следовательно, это решение может быть продолжено на все неотрицательные времена.

Теорема 5 (продолжение локального решения). Для условий теоремы 4 решение задачи (13),(14) существует и единственно при $t \geq 0$.

Построим приближенный метод решения задачи (13), (14), взяв за основу метод Галеркина. Рассмотрим систему финитных функций $\{\phi_i\} \in W_2^1$. Приближенное решение ищем в виде:

$$f^n(m, t) = \sum_{i=0}^n \xi_i(t) \phi_i(m). \tag{17}$$

Коэффициенты определяются из следующей системы:

$$\iint \left[f^n \frac{\partial \phi}{\partial t} + \dot{m} f^n \frac{\partial \phi}{\partial m} + \sigma(f^n) \phi - q \phi \right] dm dt, \tag{18}$$

где

$$\sigma(f^n) = \frac{1}{2} f^n(m, t) \int_0^\infty \Phi(m, y) f^n(y, t) dy.$$

Воспользовавшись законами диссипации, выполненными для нашего уравнения (13), и свойством неотрицательности решения f^n можно получить следующую оценку:

$$\sup_{0 \leq t \leq T} \int_0^\infty |f^n| dm \leq TQ, \text{ где } Q = \sup_{0 \leq t \leq T} \int_0^\infty q(m, t) dm. \tag{19}$$

Оценка (19) означает слабую устойчивость приближенного метода (17)-(18). Поэтому легко убедиться в справедливости следующей теоремы.

Теорема 6. Приближенный метод (17)-(19) сходится к регулярному функциональному решению задачи (13)-(14).

Для задачи Коши (13)-(14) были получены некоторые точные решения.

Рассмотрим уравнение (13). Возьмем $\Phi \equiv 0; q \equiv 0$. Используя метод характеристик, получим:

$$\frac{df}{dt} = -\frac{1}{2}fN(t); \quad \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2}M(t),$$

где $N(t)$ – число частиц системы в момент времени t , $N(t) = \int_0^{\infty} f(x,t)dx$; $M(t)$ – пол-

ная масса частиц системы в момент времени t , $M(t) = \int_0^{\infty} f(x,t)x dx$.

Легко найти, что

$$x(t) = \frac{1}{2}M(t)t + x(0).$$

Используя уравнение (13) и свойство финитности функции f , можно получить следующее соотношение:

$$N(t) = \frac{2N(0)}{2+t}.$$

Таким образом получаем искомое точное решение

$$f(x,t) = f_0\left(x - \frac{1}{2}M(0)t\right) \frac{2N(0)}{2+t}.$$

На рис. 1-4 представлены точные решения и моменты $N(t)$, $M(t)$, а также решения и моменты, найденные приближенно с помощью метода (17)-(19).

Рассмотрим теперь уравнение (13) с ядром $\Phi \equiv 0$ и источником $q(x) = A\delta_{x_0}(dx)$.

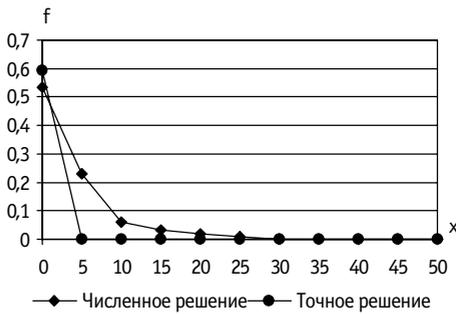


Рис.1. Функция f в момент времени $t=1,4$

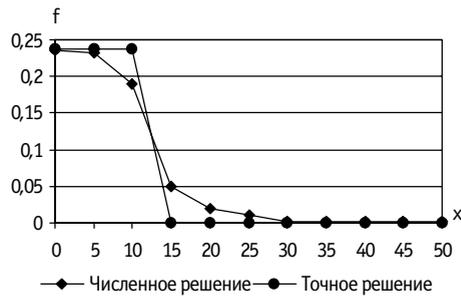


Рис.2. Функция f в момент времени $t=6,4$

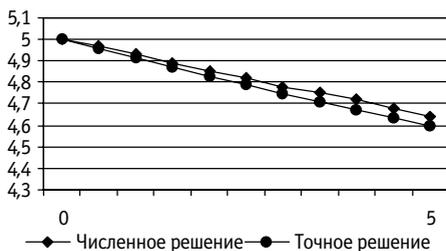


Рис.3. Функция $N(t)$

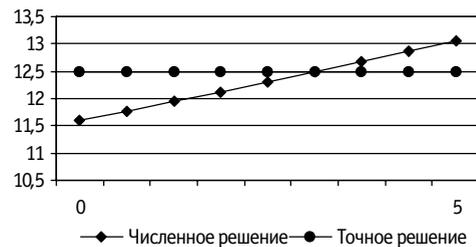


Рис.4. Функция $M(t)$

Метод характеристик дает:

$$\frac{df}{dt} = -\frac{1}{2}fN(t) + q(x(t)); \quad \frac{dx}{dt} = \frac{1}{2}M(t),$$

где $N(t)$ – число частиц системы в момент времени t , $M(t)$ – полная масса частиц системы в момент времени t .

Используя уравнение (13) и свойство финитности функции f , можно получить следующие соотношения:

$$\dot{N}(t) = -\frac{1}{2}N^2(t) + A, \quad \dot{M}(t) = Ax_0.$$

Таким образом находим:

$$N(t) = \frac{\sqrt{2A}(e^{\sqrt{2A}t} + C + 1)}{(e^{\sqrt{2A}t} + C - 1)}, \quad M(t) = Ax_0t + M(0),$$

где $C = \frac{2\sqrt{2A}}{N(0) - \sqrt{2A}}$.

Характеристики выглядят следующим образом: $x(t) = x(0) + \frac{1}{4}Ax_0t^2 + \frac{1}{2}M(0)t$.

Выражение для точного решения вдоль характеристик можно записать в виде:

$$f(x, t) = \exp\left(-\frac{1}{2}\int_0^t N(\tau)d\tau\right) \cdot \int_0^t f_0(x(0)) + \exp\left(\frac{1}{2}\int_0^s N(\tau)d\tau\right) q(x(s))ds.$$

Окончательно получаем:

$$f(x, t) = \exp\left(-\frac{1}{2}\int_0^t N(\tau)d\tau\right) \cdot \left[f_0\left(x - \frac{A}{4}x_0t^2 - \frac{M(0)}{2}t\right) + \right.$$

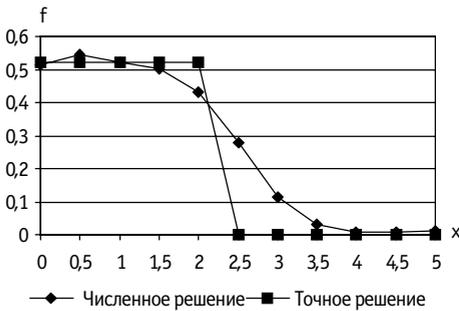


Рис.5. Функция f в момент времени $t=0,48$

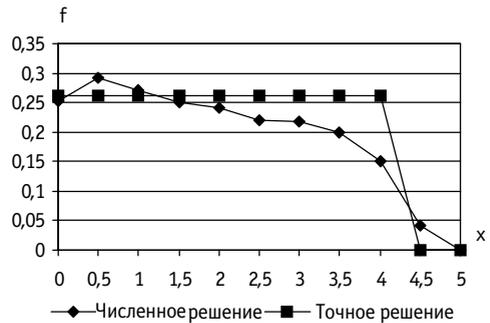


Рис.6. Функция f в момент времени $t=1,44$

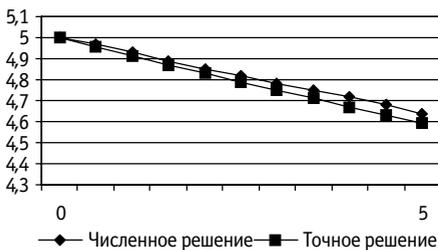


Рис.7. Функция $N(t)$

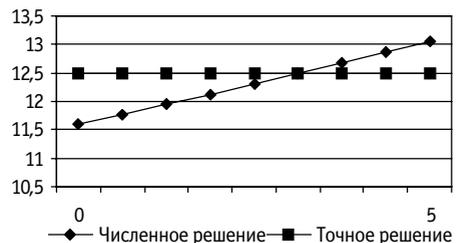


Рис.8. Функция $M(t)$

$$+ \exp\left(\frac{1}{2} \int_0^{\bar{t}(x,t)} N(\tau) d\tau\right) \int_0^{\bar{t}} q\left(x_0 - \frac{A}{4}x_0\tau^2 - \frac{M(0)}{2}\tau + \frac{A}{4}x_0s^2 + \frac{M(0)}{2}s\right) ds,$$

где $\bar{t}(x,t)$ находится из вида характеристик для данного уравнения

$$\bar{t}(x,t) = \frac{-M(0) + M^2(0)/2 + Ax_0t}{Ax_0}.$$

На рис. 5-8 представлены точные решения и моменты $N(t)$, $M(t)$, а также решения и моменты, найденные приближенно с помощью метода (17)-(19) для уравнения (13) с ядром $\Phi \equiv 0$ и источником $q(x) = A\delta_{x_0}(dx)$.

Список литературы

1. Любов Б.Я. Теория кристаллизации в больших объемах. - М.: Наука, 1975.
2. Будак Б.М., Москал М.Б. О классическом решении I-ой краевой задачи Стефана для многомерного уравнения теплопроводности в координатном параллелепипеде: Труды вычислительного центра. - М.: МГУ, 1971. - С.87-114.
3. Будак Б.М., Гапоненко Ю.Л. О решении задачи Стефана для квазилинейного параболического уравнения с квазилинейными граничными условиями: Труды вычислительного центра. - М.: МГУ, 1971. - С.235-284.
4. Самарский А.А., Моисеенко Б.Д. Экономичная схема сквозного счета для многомерной задачи Стефана // Журн. вычисл. математики и мат. физики. - 1965. - Т. 5. - № 5. С. 816-827.
5. Филипов А. Ф. Обыкновенные дифференциальные уравнения с разрывными правыми частями // Математический сборник. - 1960. - Т.51. - №4. - С.101-128.
6. Бородин М.А. Двухфазная контактная задача Стефана // Укр. мат. журн. - 1995. - Т.47. - №2. - С. 158-167.
7. Марченко М.П., Фрязинов И.В. Комплекс программ Карма 1 решения нестационарных задач выращивания монокристаллов в ампулах // Журн. вычисл. математики и мат. физики. - 1997. - Т.37. - №8. - С. 988-998.
8. Галкин В.А. Методы решения задач физической кинетики. - Обнинск: ИАТЭ, 1995. - 171 с.
9. Galkin V. A. Global correctness of Cauchy problem for nonlinear conservation laws systems and one example for the gas dynamics // International series of numerical mathematics. - 1999. - V. 129. - P. 361-367.
10. Марчук Г.И., Агошков В.И. Введение в проекционно-сеточные методы. - М.: Наука, 1981. - 416 с.
11. Ладыженская О.А., Солонилов В.В., Уральцева Н.Н. Линейные и квазилинейные уравнения параболического типа. - М.: Наука, 1967.

Поступила в редакцию 28.01.2000.

ТЯЖЕЛОВОДНЫЕ УСТАНОВКИ В РОССИИ

**О.В. Шведов*, А.С. Герасимов*, Г.В. Киселев*, В.В. Селиверстов*,
В.В.Петрунин**, В.В. Шидловский*****

* ГНЦ РФ-ИТЭФ

** ОКБМ

*** Минатом



В статье представлен обзор деятельности ГНЦ РФ-ИТЭФ, являющегося научным руководителем проблемы тяжеловодных реакторов, совместно с другими российскими организациями: ОКБМ, комбинатом «Маяк», НПО ВНИПИЭТ, ГНЦ ВНИИНМ и другими по созданию тяжеловодных реакторов различного назначения. Описываются результаты эксплуатации промышленного тяжеловодного реактора Л-2, работающего в изотопном режиме. Сообщается о концептуальных предложениях по разработке нового изотопного тяжеловодного реактора нового поколения для обеспечения потребностей в радионуклидах. Кратко изложены результаты исследования подкритических систем для уничтожения долгоживущих радиоактивных отходов и производства энергии. Значительная часть статьи посвящена разработке концепции предельной безопасности энергетических реакторов и принципам ее достижения в проекте ТР-1000 ПБ - тяжеловодный реактор предельной безопасности электрической мощностью нетто 1000 МВт.

ВВЕДЕНИЕ

За годы существования ИТЭФ (ныне ГНЦ РФ-ИТЭФ) в СССР были разработаны физические и технологические основы для создания серии промышленных тяжеловодных реакторов типа ОК-180 и ОК-190, служащих для производства изотопов различного народнохозяйственного назначения. По истечении ресурса они выведены из эксплуатации. В настоящее время на комбинате «Маяк» эксплуатируется тяжеловодный изотопный реактор Л-2 («Людмила»), который обеспечивает основные потребности России в реакторных изотопах [1]. В то же время специалистами ГНЦ РФ-ИТЭФ, ОКБМ и комбината «Маяк» разработана концепция тяжеловодного изотопного реактора нового поколения повышенной безопасности [2], краткая информация о котором приводится ниже.

Данная работа посвящена результатам концептуального изучения подкритических тяжеловодных систем, предназначенных для уничтожения долгоживущих радиоактивных отходов (ДРАО) на основе бланкета с твердым топливом [3], а также разработанной в ИТЭФ концепции предельной безопасности и принципах ее обоснования в реакторе ТР-1000ПБ.

ЭКСПЛУАТАЦИЯ РЕАКТОРА Л-2 ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ «МАЯК»

Реактор Л-2 является последним в серии тяжеловодных реакторов ОК-180, ОК-190, ОК-190М, разработанных и запущенных в СССР. Физический пуск реактора Л-2 был осуществлен в январе 1988 г. Реактор проектировался и пускался для наработки продукции оборонного назначения, однако возникли обстоятельства, предопределившие необходимость его конверсии. На ПО «МАЯК» был остановлен последний из уран-графитовых реакторов, в котором нарабатывались радионуклиды для изготовления радиоактивных источников. Спрос на них в СССР и за рубежом перестал удовлетворяться. Практически единственным выходом из создавшегося положения была конверсия реактора Л-2 при условии обеспечения безопасности. Исходную базу для конверсии составили:

- имеющийся опыт изготовления и облучения изотопных блоков в уран-графитовых реакторах и в реакторе ОК-190М;
- полученные в ходе проектирования, пуска и первой кампании данные о нейтронно-физических характеристиках активной зоны;
- имеющиеся расчетные программы и экспериментальные методики для обоснования параметров загрузок активной зоны Л-2, а также полномасштабный критстенд «МАКЕТ» в ГНЦ РФ-ИТЭФ.

Основные три этапа осуществленной конверсии:

- в 1990-1992 гг. внедрен режим массовой наработки кобальта-60 производительностью 10 МКи/год;
- в 1992-1994 гг. разработаны и внедрены режимы наработки радиоизотопов в зоне бокового отражателя;
- в 1994-1996 гг. разработаны и внедрены высокопоточные полячейки «ловушки» для наработки радионуклидов с высокой удельной активностью (Ir-192, Co-60).

Расчетные и экспериментальные работы в обоснование конверсии активной зоны основывались на принципе минимального возмущения (изменения) проектных нейтронно-физических и теплогидравлических характеристик активной зоны. Задача в каждом конкретном случае заключалась в создании изотопного блока и канала, эквивалентного по поглощающим свойствам проектному каналу с блоками-поглотителями. В этом случае оставались неизменными характеристики топливных блоков и каналов, которые и определяют пределы безопасной эксплуатации реактора в целом.

Для выбора необходимых параметров изотопных блоков проводился комплекс работ, который включал:

- предварительные нейтронно-физические расчеты с целью определения навески мишенного вещества и параметров облученных мишеней;
- разработку проекта экспериментального блока и канала для его облучения, включая создание конструкций, выполнение нейтронно-физических и теплогидравлических расчетов в обоснование безопасности реакторных испытаний (обычно эти расчеты проводились параллельно и независимо на ПО «МАЯК», в ГНЦ РФ-ИТЭФ и ОКБМ);
- экспериментальные работы на критстенде «МАКЕТ» ИТЭФ по определению эффектов реактивности, распределения энерговыделения в полячейке и др.

Необходимо отметить, что в начале 90-х гг. произошло резкое (в 2-3) раза увеличение требований к получаемой удельной активности мишеней, что обусловило необходимость доработки уже имеющихся, а в отдельных случаях и разработку новых конструкций блоков. Необходимость иметь достаточно широкую гамму ти-

поразмеров мишеней потребовала разработки нескольких вариантов конструкций блоков для одного радионуклида. Например, для наработки таллия-204 и сурьмы-124 разработано по три типа блоков, для наработки кобальта-60 - 8 типов.

Об объемах производства рассматриваемых радионуклидов можно судить по следующим цифрам: наработка кобальта-60 составляет порядка 10 МКи/г, селена-75 - порядка 1000 Ки/г. В больших количествах нарабатывают углерод-14, для производства которого разработано 4 типа блоков. В настоящее время разрабатываются блоки для наработки в промышленных масштабах препаратов йода, молибдена, фосфора и некоторых других.

Для повышения плотности потока тепловых нейтронов и наработки высокоактивных нуклидов (иридий-192, тулий-170, селен-75 и т.д.) в «плато» активной зоны было создано 6 так называемых «ловушек». Это позволяет нарабатывать тулий-170 и селен-75 с удельной активностью 800-900 Ки/г, а кобальт-60 с удельной активностью более 250 Ки/г.

КОНЦЕПЦИЯ ТЯЖЕЛОВОДНОГО ИЗОТОПНОГО РЕАКТОРА НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Специалисты ОКБМ, ГНЦ РФ-ИТЭФ и ПО «Маяк» разработали концепцию тяжеловодного изотопного реактора нового поколения с повышенными характеристиками безопасности [2].

Предлагаемая тяжеловодная реакторная установка (РУ) с улучшенными технико-экономическими показателями и повышенными характеристиками безопасности предназначена для производства различного типа радиоизотопов гражданского и медицинского назначения, радиационного легирования материалов и наработки новых делящихся изотопов. Высокопоточный режим реактора может быть использован для получения трансплутониевых элементов (главным образом Cf-252) и трансмутации продуктов деления и младших актинидов (МА).

РУ может эксплуатироваться в одном из двух режимов:

- изотопный режим для производства изотопов гражданского и медицинского назначения; используется двухвтулочная топливная сборка;
- высокопоточный режим работы для наработки трансплутониевых элементов или трансмутации продуктов деления и МА; этот режим может быть реализован в случае разрешения инженерных проблем, связанных с повышением скорости теплоносителя в топливной сборке до 15 м/с и тепловой нагрузки теплоотдающей поверхности до $6 \cdot 10^6$ Вт/м; при высокопоточном режиме может быть достигнута максимальная величина потока тепловых нейтронов ($4 \text{--} 8 \cdot 10^{14}$ н/(см²·с) в зависимости от загрузки топлива.

Проведенное изучение концепции нового тяжеловодного изотопного реактора нового поколения позволяет сделать следующие выводы:

1. Установка нового поколения является многоцелевой с точки зрения номенклатуры производимых на ней изотопов и новых делящихся материалов, обеспечивая необходимое их качество и количество.
2. Установка обладает высокой степенью безопасности и учитывает опыт эксплуатации тяжеловодных установок как в России, так и за рубежом.
3. Создание установки базируется на испытанных реакторных технологиях, расчетно-теоретических методах и существующей экспериментальной базе.
4. Производимое установкой тепло возможно утилизировать, но при этом необходимо повысить выходные параметры теплоносителя (температуру и давление), что в сочетании с необходимостью ведения частых перегрузок изотопной продукции приведет к снижению безопасности установки, а короткая кампания и частые ППР сделают малоэффективным использование последней в качестве энергетической.

РАЗРАБОТКА ВЫСОКОПОТОЧНЫХ ПОДКРИТИЧЕСКИХ БЛАНКЕТОВ ЭЛЕКТРОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ

В последние годы во многих российских и зарубежных ядерных центрах проводились поисковые концептуальные исследования по электроядерным установкам (ЭЛЯУ). Исследования выполнялись по 2 направлениям. Первое связано с уничтожением (трансмутацией) долгоживущих радиоактивных отходов (ДРАО) с попутным производством энергии, второе - с разработкой ЭЛЯУ, главным образом, для производства электроэнергии и, по возможности, для уничтожения ДРАО. Совершенно очевидно, что требования к основным характеристикам ЭЛЯУ будут различаться в зависимости от целевого назначения установок. Учитывая актуальность проблемы обращения с ДРАО и необходимость радикального снижения их количества, подлежащего длительному хранению, специалисты ГНЦ РФ-ИТЭФ провели расчетные исследования эффективности уничтожения ДРАО, в первую очередь, долгоживущих (МА), как наиболее радиационно опасных среди ДРАО, для различных вариантов подкритических бланкетов ЭЛЯУ [3]. В качестве критерия для сравнения была выбрана разница в уровне радиотоксичности перед загрузкой в облучательный объем бланкета и после выгрузки при однократном и многократном циклах облучения в зависимости от спектра и плотности потока нейтронов. Для сравнения были выбраны различные варианты бланкета с тяжелой водой в качестве теплоносителя и замедлителя и вариант с гомогенным тяжеловодным бланкетом, исследованными в рамках проекта № 17 МНТЦ, а также реакторы типа ВВЭР и БН-800. Такое сравнение является необходимым, чтобы выявить принципиальные возможности различных РУ для уничтожения ДРАО. Представленные в настоящей статье результаты могут быть основой для принятия решения о разработке эффективной ЭЛЯУ и соответствующей программы экспериментальных работ, если Минатом и другие руководящие органы сочтут целесообразным реализацию этого альтернативного направления по уничтожению ДРАО, которое позволяет уменьшить количество ДРАО, поступающих на захоронение.

КОНЦЕПЦИЯ ПРЕДЕЛЬНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО РЕАКТОРА И ПРОЕКТ ТР-1000ПБ

В течение более 20 лет в ИТЭФ ведется работа над проектом тяжеловодного энергетического реактора предельной безопасности ТР-1000ПБ. В настоящее время проект доведен до стадии расширенного технического предложения. Основные элементы проекта приведены в [4]. В настоящей работе основное внимание уделено разработанной в ИТЭФ концепции предельной безопасности и принципам ее обеспечения и прозрачного обоснования, использованных в ТР-1000ПБ.

Цель разработки реактора ТР-1000ПБ - создание реактора нового поколения, отличительными особенностями которого являются:

- предельная, основанная на естественных процессах, безопасность;
- высокий нейтронный баланс, обеспечивающий высокую эффективность использования природного топлива, существенно превышающую эффективность всех существующих и проектируемых типов тепловых реакторов;
- возможность создания на базе современных технологий без необходимости проведения крупномасштабных экспериментов, разработки и эксплуатации прототипа;
- сохранение капитальных и эксплуатационных затрат на уровне, не превышающем уровень для современных легководных реакторов.

Под терминами, относящимися к безопасности, подразумеваются следующие понятия (в скобках приведен общепринятый английский эквивалент термина).

Реактор естественной безопасности (Natural Safety Reactor) - реактор, безопасность которого основана на естественных процессах (естественных законах природы и естественных свойствах материалов).

Предельная безопасность (Ultimate Safety) - безопасность по **предельному критерию безопасности**. Предельным критерием безопасности является недопущение выхода радиоактивности в окружающую среду сверхустановленных пределов при всех условиях и событиях, кроме крайне маловероятных (например, падение метеорита). При сохранении предельного критерия, в принципе, допускается нарушение всех остальных, более строгих критериев безопасности и, в частности, допускается разрушение топлива, переоблучение персонала, разрушение реактора до степени, исключающей возможность его восстановления и т.п. Разумеется, вероятность нарушения этих критериев должна быть достаточно низкой с точки зрения как финансового риска, так и негативного влияния на общественное мнение.

Термин **«Реактор предельной безопасности»** (Ultimate Safety Reactor) не означает реактор с неким гипотетическим предельным уровнем безопасности, а означает **«Реактор безопасный по предельному критерию безопасности»**. В принципе, могла бы быть правомерная постановка вопроса о достижении реактором предельного уровня предельной безопасности, если бы этот предельный уровень можно было определить.

Естественные процессы (Natural Processes) и, соответственно, системы безопасности на них основанные, подразделяются на:

- **внутренне присущую безопасность** (Inherent Safety) - безопасность, основанную на естественных процессах, имеющих место и принимающих непосредственное участие в механизме выработки энергии реактором в штатном режиме (внутренне присущие механизму выработки энергии процессы), которые при возникновении внештатных ситуаций смягчают их последствия (доплер-эффект, отрицательный мощностной эффект и т.п.);

- **пассивную безопасность** (Passive Safety) - безопасность, основанную на естественных процессах, в штатном режиме не участвующих в механизме выработки энергии и естественным образом инципируемых при возникновении внештатных ситуаций и смягчающих их последствия без применения внешнего источника энергии для инициирования и поддержания самих этих процессов (естественная циркуляция, разрывные мембраны и т.п.).

Пример: **естественный процесс аварийного теплоотвода** является в реакторе

1) с принудительной циркуляцией в штатном режиме и естественной циркуляцией в аварийном - **пассивным**;

2) с естественной циркуляцией в штатном режиме и естественной циркуляцией в аварийном - **внутренне безопасным**;

3) с принудительной циркуляцией в штатном режиме и отсутствием циркуляции к аварийному (теплоотвод конвекцией с последующим испарением: принято в PIUS) - **внутренне безопасным**.

Реактор TP-1000ПБ есть, по-существу - реактор естественной предельной безопасности (Process Natural Ultimate Safety Reactor) - т.е. реактор, в котором предельная безопасность (невыход радиоактивности) обеспечивается естественными процессами. Аналогом термина является широко известная концепция реактора PIUS (Process Inherent Ultimate Safety) с тем отличием, что в последней предельная безопасность основана не просто на естественных, но именно на внутренне присущих процессах.

ПРИНЦИПЫ ОБОСНОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ РЕАКТОРА ТР-1000ПБ

Обоснование безопасности базируется на анализе двух основных критериев:

- 1) **публичный риск** (public risk) - выход радиоактивности в окружающую среду сверхдопустимых пределов;
- 2) **финансовый риск** (financial risk) - различные виды аварий и разрушений АЭС, вплоть до степени, исключающей возможность ее восстановления.

Главным принципом обеспечения безопасности ТР-1000ПБ является полное исключение публичного риска при снижении финансового риска до приемлемого уровня.

ПУБЛИЧНЫЙ РИСК

Публичный риск полностью исключается применением реактора естественной предельной безопасности. Основным принципом обоснования предельной безопасности является достижение ее **прозрачности** (transparency).

В реальности есть реактор, в котором для исключения выхода радиоактивности предусмотрены меры, основанные на естественных процессах.

Необходимо иметь реактор, в котором предусмотренные меры полностью исключают возможность выхода радиоактивности.

Переход от «предусмотрены меры по исключению» к «предусмотренные меры исключают» составляет сущность обоснования предельной безопасности.

Такой переход никогда не может быть выполнен со стопроцентной гарантией (гарантированная безопасность) так же, как и с некоторой конечной вероятностью (детерминистская безопасность). Поэтому переход должен быть прозрачным, (вполне или совершенно очевидным), т.е. конечный итог обоснования предельной безопасности должен подтвердить, что *предусмотренные меры по исключению выхода радиоактивности со всей очевидностью исключают возможность выхода радиоактивности в окружающую среду.*

Понятие «совершенно очевидный» весьма относительно. То, что совершенно очевидно для одних, может оказаться далеко не очевидным для других. Поэтому переход от «предусмотрено» к «обеспечивает» должен быть совершенно очевидным не только для самих разработчиков и специалистов, но и для широкой общественности, т.е. и для непрофессионалов.

Одно только применение естественных систем для безопасности ни в коей мере не обеспечивает прозрачности перехода от «предусмотрено» к «обеспечено». То, что естественные процессы обеспечения безопасности не могут отказать при возмущении, отнюдь не означает, что их интенсивность окажется достаточной для выполнения предопределенной функции. Например, аварийный теплоотвод естественной циркуляцией всегда будет инициироваться при аварии, но его интенсивность может оказаться недостаточной для сохранения целостности топлива как из-за возможных случайных или преднамеренных (наличие человеческого фактора на стадии эксплуатации) нарушений во внешнем теплообмене, так и вследствие ошибок в расчетах (наличие человеческого фактора на стадии проектирования).

Это означает, что обоснование предельной безопасности на основании результатов многочисленных и весьма сложных расчетов не может обеспечить необходимой степени прозрачности. В этом случае переход от «предусмотрено» к «обеспечено» окажется совершенно очевидным только для самих разработчиков, и, скорее всего, далеко не для всех специалистов, не говоря уже о непрофессионалах. Разумеется, обоснование предельной безопасности не может быть осуществлено совсем без привлечения расчетной базы, однако более чем желательно, чтобы сложность используемых методик и алгоритмов не слишком превышала уро-

вень школьного курса физики.

Обоснование сохранения целостности активной зоны при возможных авариях в принципе никогда не может быть прозрачным, поскольку это неизбежно включает расчетный анализ сложных взаимодействующих нейтронных, теплогидравлических, механических и других процессов при наличии многочисленных обратных связей. Поэтому в обоснование предельной безопасности ТР-1000ПБ положен принцип: «Разрушение активной зоны и полное расплавление топлива рассматриваются как исходные события».

При этих исходных событиях выход радиоактивности в окружающую среду исключается только естественными процессами и совершенно прозрачным образом.

ФИНАНСОВЫЙ РИСК

Эта категория включает все возможные виды аварий, вплоть до самых тяжелых, приводящих к невозможности дальнейшей эксплуатации АЭС. Снижение вероятности аварий достигается на ТР-1000ПБ применением традиционных систем безопасности, как активных, так и пассивных. Обоснование достижения приемлемого уровня безопасности осуществляется расчетным анализом и определением вероятности различных типов аварий.

С точки зрения финансового риска допустимая вероятность наиболее тяжелой аварии с полным расплавлением топлива и невозможностью дальнейшей эксплуатации оценивается $\sim 10^{-4}$ год. Однако такая вероятность представляется слишком высокой с точки зрения негативной реакции общественного мнения на столь тяжелую аварию. Поэтому в обосновании безопасности ТР-1000ПБ допустимая вероятность тяжелых аварий с расплавлением и разрушением активной зоны принимается $\sim 10^{-6}$ год.

Концепция исключения публичного риска в ТР-1000ПБ

В проекте ТР-1000ПБ предусмотрено шесть барьеров для выхода радиоактивности в окружающую среду: 1) матрица топлива; 2) покрытие топлива; 3) граница давления контура теплоносителя (корпус реактора из предварительно напряженного железобетона (ПНЖБ)); 4) внутренняя герметичная оболочка (прочноплотная обстройка корпуса); 5) внешняя герметичная оболочка; 6) внешняя прочная оболочка (контейнмент).

Публичный риск (выход радиоактивности сверхдопустимых пределов) может быть исключен, если при всех условиях и событиях гарантированно сохранится целостность хотя бы одного из барьеров для выхода радиоактивности, предусмотренных на АЭС.

Разрушение и расплавление топлива означает разрушение первых двух барьеров. Возможность гарантированного обеспечения сохранности этих барьеров, так же как и границы контура теплоносителя, при всех возможных событиях, условиях и их комбинациях, по мнению авторов, является более чем проблематичной. Хотя это положение может быть оспорено, в любом случае обоснование сохранения целостности топлива никогда не может быть выполнено прозрачным образом. Поэтому в обоснование предельной безопасности ТР-1000ПБ различные сценарии разрушения топлива (разрушения матрицы и покрытия топлива), сопровождаемые нарушением границы контура теплоносителя, независимо от возможности и вероятности таких событий, принимаются как исходные события. При этих условиях исключение публичного риска означает гарантированное сохранение хотя бы одного из оставшихся барьеров. Эта задача должна решаться за счет только естественных процессов и совершенно прозрачным образом.

Отмеченные цели достигаются применением реактора естественной предель-

ной безопасности. Главной особенностью такого реактора является то, что его естественные, внутренне присущие свойства таковы, что при разрушении первых трех барьеров (разрушении матрицы и покрытия топлива и нарушении границы контура теплоносителя) за счет только внутренне присущих реактору свойств и вполне прозрачным образом полностью исключается возможность возникновения внутренних разрушающих воздействий на остальные внешние барьеры любого типа с нарушением их целостности и герметичности.

Внутренними механизмами разрушения внешних защитных барьеров при разрушении первых трех барьеров могут быть:

- I. Ударное воздействие, вследствие резкого повышения давления при:
 - тепловом взрыве реактора вследствие либо разгона на мгновенных нейтронах с целой или разрушенной активной зоной, либо резкого повышения мощности реактора за счет положительного мощностного эффекта реактивности;
 - резком выделении накопленной, главным образом, в первичном теплоносителе энергии в результате либо хрупкого разрушения корпуса давления, либо разгерметизации I контура по достаточно большому сечению;
 - взрывном характере протекания химических процессов при аварии.
- II. Медленное повышение давления за пределы прочности барьера.
- III. Проплавление барьера расплавленным топливом.

Для гарантированного исключения возможности возникновения этих воздействий реактор естественной предельной безопасности должен обладать внутренне присущими свойствами, исключаящими:

- разгон реактора на мгновенных нейтронах;
- возникновение вторичной критичности в разрушенной активной зоне;
- наличие положительного мощностного эффекта реактивности в любом режиме работы реактора;
- хрупкое разрушение корпуса давления;
- разгерметизацию I контура по сечению, способному привести к быстрому росту давления под внешним барьером;
- взрывной характер протекания химических процессов при аварии;
- выход разрушенного топлива за пределы корпуса реактора;
- медленный рост давления за счет нарушения теплоотвода от разрушенного топлива и газовыделения при химических реакциях с разрушенным топливом.

Основные элементы концепции ТР-10000ПБ

Ключевыми элементами концепции являются:

- применение интегральной компоновки первого контура внутри корпуса из ПНЖБ, несущего давление теплоносителя;
- применение низкотемпературного тяжеловодного замедлителя;
- применение топлива с низкой концентрацией делящихся изотопов;
- применение газового теплоносителя.

Сочетание этих элементов создает уникальную комбинацию, обеспечивающую выполнение требований к реакторам предельной безопасности и достижение исключительно высоких характеристик топливного цикла наивысших, из достигнутых для всех существующих и предлагаемых типов тепловых реакторов. Наиболее наглядно это проявляется в сравнении с широко известной концепцией тяжеловодных реакторов типа CANDU.

Применение интегральной компоновки внутри несущего давление корпуса из ПНЖБ, в отличие от канальной конструкции CANDU, где давление теплоносителя

должны выдерживать каналы, обеспечивает дополнительные преимущества:

- **с точки зрения безопасности** исключена возможность аварии с большой потерей теплоносителя, поскольку особенностью корпуса из ПНЖБ является невозможность его хрупкого разрушения; конструкционные характеристики корпуса допускают возможность разгерметизации лишь с сечением небольшого (~30 см.) диаметра, что исключает возможность резкого выхода накопленной энергии;

- **с точки зрения топливного цикла** несущий давление корпус разгружает от давления каналы ТВС, что позволяет существенно, по сравнению с CANDU, снизить их толщину, что, в свою очередь, заметно снижает паразитное поглощение нейтронов в каналах, улучшая нейтронный баланс в реакторе и его топливные характеристики.

Применение в предлагаемой концепции газового теплоносителя, в отличие от CANDU, где теплоносителем является тяжелая вода под давлением, также обеспечивает преимущества:

- **с точки зрения безопасности** газовый теплоноситель практически не поглощает и не замедляет нейтроны; наличие или отсутствие теплоносителя практически не изменяет реактивность реактора; таким образом, потеря теплоносителя не является реактивной аварией, в отличие от CANDU, где, вследствие существенного положительного пустотного эффекта по теплоносителю $\sim(1,1-1,5)\beta$, для предотвращения разгона на мгновенных нейтронах при аварии с потерей теплоносителя необходимо вмешательство быстродействующих активных систем АЗ;

- **с точки зрения топливного цикла** незамедляющий газовый теплоноситель в сочетании с кластерной структурой ТВС сравнительно большого (~10 см) радиуса, приводит к высокой вероятности для нейтрона деления вызвать новые деления до выхода из ТВС; это обеспечивает уникальную комбинацию сугубо теплового спектра, благоприятного для эффективного использования делящихся изотопов, с весьма высокой (~10%) долей деления на воспроизводящих изотопах, что заметно повышает нейтронный баланс и топливные характеристики реактора.

Концепция ТР-1000ПБ позволяет полностью удовлетворить требованиям к реакторам предельной безопасности, рассмотренным выше.

1. Разгон на мгновенных нейтронах исключен за счет отсутствия возможности ввода необходимой для этого положительной реактивности:

- потеря газового теплоносителя не приводит к вводу положительной реактивности;

- попадание воды в теплоноситель приводит к снижению реактивности за счет соответствующего повышения замедления внутри ТВС, что снижает размножение на быстрых нейтронах и повышает резонансный захват вследствие разблокирования резонансов;

- аварийный выброс всех находящихся в активной зоне стержней СУЗ приводит к вводу малой положительной реактивности, легко компенсируемой отрицательным мощностным эффектом реактивности реактора.

Это обеспечивается малым изменением реактивности в быстрых процессах, обусловленных практически нулевым эффектом по теплоносителю и замедлителю, и применением для компенсации медленных процессов (выгорание и ксенон) систем борного отравления замедлителя, что позволяет оставить в стержнях СУЗ весьма малый, не более $\sim 0,5\beta$, запас реактивности.

Выбор оптимальной по реактивности геометрии позволяет обеспечить снижение реактивности при любых изменениях геометрии ТВС и активной зоны.

2. Возникновение вторичной критичности исключено вследствие малой концентрации делящихся изотопов в топливе, благодаря применению слабопоглоща-

ющего тяжеловодного замедлителя.

3. Вследствие практически нулевых эффектов реактивности по теплоносителю и замедлителю мощностной эффект практически полностью определяется доплер-эффектом и является отрицательным при любых режимах.

4. Хрупкое разрушение корпуса давления исключено благодаря применению ПНЖБ. При медленном росте давления в корпусе избыточное давление стравливается через образующиеся щели, и такой корпус может быть разрушен только тепловым взрывом реактора, невозможным вследствие его внутренних свойств.

5. Быстрое повышение давления под герметичной оболочкой исключено интегральной компоновкой первого контура внутри ПНЖБК, что ограничивает максимально возможное сечение разгерметизации, а также применением газового теплоносителя, обеспечивающего отсутствие фазовых переходов при снижении давления.

По сравнению с водным теплоносителем отсутствие фазовых переходов при разгерметизации контура теплоносителя обеспечивает:

- существенное снижение скорости роста давления под оболочкой при одинаковом сечении разгерметизации;
- существенное снижение объема, необходимого для принятия всего теплоносителя при одинаковом росте давления в принимающем объеме.

Последнее обстоятельство позволило применить в данной концепции дополнительный защитный барьер, а именно, прочно-плотную герметичную обстройку корпуса давления, позволяющую принять и сохранить весь теплоноситель первого контура. Наличие между корпусом давления и внешней герметичной оболочкой промежуточного защитного барьера, доступ внутрь которого всегда закрыт, является дополнительной гарантией невыхода радиоактивности в окружающую среду при возможном случайном или умышленном открытии проходов во внешней оболочке.

6. Невозможность взрывного характера химических процессов при авариях достигается соответствующим подбором материалов активной зоны и реактора, включающим, в частности, взрыв водорода.

Применение корпуса из ПНЖБ, целостность которого сохраняется при всех возможных аварийных процессах, позволяет создать находящиеся внутри самого корпуса системы улавливания и удержания расплавленного топлива, а также надежные пассивные системы охлаждения корпуса и расплавленного топлива. Это позволяет обеспечить следующие требования к реактору предельной безопасности:

- обеспечить гарантию невыхода расплавленного топлива в окружающую среду за счет гарантированного неразрушения расплавленным топливом защитного барьера - корпуса реактора, являющегося в настоящем случае и границей контура теплоносителя;
- снизить газовыделение в процессе аварии, в том числе образование водорода, за счет исключения взаимодействия расплавленного топлива с бетоном, что заметно снижает скорость роста давления под оболочкой, а также исключает образование под оболочкой взрывоопасных концентраций водорода.

В этих условиях рост давления под оболочкой может быть обусловлен, в основном, только остаточным энерговыделением в топливе, гарантированно снимаемым системами пассивного расхолаживания, размещенными в корпусе из ПНЖБ.

Таким образом, концепция реактора ТР-1000ПБ позволяет удовлетворить всем требованиям к реактору предельной безопасности и обеспечить исключительно высокие характеристики нейтронного баланса.

Список литературы

1. Додонов А.Д., Петрунин В.В. и др. Научно-технические аспекты производства нуклидов гражданского назначения на тяжеловодном реакторе Л-2: Сб. докл. на конф. «Усовершенствованные тяжеловодные реакторы» (Москва, ГНЦ РФ-ИТЭФ, 18-20.11.1997). - М., 1997. - С. 87-92.
2. Кирюшина А.И., Ажнин Е.И. и др. Концепция тяжеловодного изотопного реактора нового поколения: Сб. докл. на конф. «Усовершенствованные тяжеловодные реакторы» (Москва, ГНЦ РФ-ИТЭФ, 18-20.11.1997). - М., 1997. - С.25-44.
3. Бергельсон Б.Р., Герасимов А.С. и др. О необходимости разработки тяжеловодного blankets ЭЛЯУ с высокой плотностью потока нейтронов: Сб. докл. на конф. «Усовершенствованные тяжеловодные реакторы» (Москва, ГНЦ РФ-ИТЭФ, 18-20.11.1997). - М., 1997. - С. 139-160.
4. Ильичев Б.И., Селиверстов В.В. и др. Энергетический реактор предельной безопасности с газовым теплоносителем и тяжеловодным замедлителем: Сб. докл. на конф. «Усовершенствованные тяжеловодные реакторы» (Москва, ГНЦ РФ-ИТЭФ, 18-20.11.1997). - М., 1997. - С.45-59.

Поступила в редакцию 23.11.99.

АТОМНАЯ ДИНАМИКА ЖИДКОГО КАЛИЯ И РАСПЛАВА КАЛИЙ-КИСЛОРОД ИЗ ДАННЫХ МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО НЕУПРУГОМУ РАССЕЯНИЮ НЕЙТРОНОВ

И.Ю.Шимкевич, М.В.Заезжев, В.В.Кузин, А.Г.Новиков, В.В.Савостин, А.Л.Шимкевич

ГНЦ РФ - Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



В работе изложены алгоритм и процедура молекулярно-динамического (МД) моделирования расплавов чистого калия и системы калий-кислород, а также проведено сравнение этих данных с результатами экспериментов по неупругому рассеянию нейтронов. Такой подход является наиболее эффективным методом исследования структурных и динамических свойств конденсированных сред на микроскопическом уровне.

ВВЕДЕНИЕ

Расплавы щелочных металлов находят широкое применение в качестве теплоносителей ядерных энергетических установок [1]. На практике все они являются многокомпонентными растворами, так что вопросы коррозии конструкционных материалов и проблемы массопереноса становятся основными при разработке технологии щелочно-металлических теплоносителей [2]. Определяющую роль здесь играет кислород. Поэтому традиционная технология щелочных металлов основывается на глубокой очистке расплава от этой примеси, что не всегда удается сделать достаточно эффективно [3, 4]. В этой связи при разработке методов очистки щелочных металлов от кислорода важно иметь однозначное и достоверное представление о структурных и динамических свойствах двойных расплавов.

Между тем, теория и экспериментальные исследования примесного состояния кислорода в щелочных металлах не дают исчерпывающего ответа на вопрос о природе этого состояния, о формах существования кислорода в расплавах и о том, как это состояние меняется при изменении температуры и концентрации других примесей. Для ответа на поставленные вопросы, наряду с термодинамикой, необходимо исследовать раствор кислорода в щелочном металле на микроскопическом уровне, т.е. изучить как структуру бинарного расплава, так и движение атомов обеих компонент с помощью МД-моделирования двухкомпонентного раствора и рассеяния на нем медленных нейтронов.

Сравнение результатов молекулярно-динамического моделирования расплавов и

© *И.Ю. Шимкевич, М.В. Заезжев, В.В. Кузин, А.Г. Новиков, В.В. Савостин, А.Л. Шимкевич, 2000*

данных эксперимента по неупругому рассеянию нейтронов представляет особый интерес и может рассматриваться, как наиболее убедительный способ проверки физических моделей и математических процедур, используемых в МД-расчетах [5,6].

МД-МОДЕЛИРОВАНИЕ

Благодаря адекватности молекулярно-динамических моделей реальным системам, МД-расчеты стали эффективным методом исследования жидких металлов [7].

Для изучения структурных и кинетических свойств расплава калия и системы калий-кислород разработан пакет расчетных программ [8], который позволяет построить модели одно-, двух- и трехкомпонентных неупорядоченных систем, исследовать атомные конфигурации с помощью многогранников Вороного [9].

МД-моделирование проводилось в рамках NVT ансамбля, когда число N атомов рассматриваемой системы при температуре T и заданной плотности частиц ρ определяют объем $V = L^3$ кубической ячейки (с длиной ребра L), на которую накладываются периодические граничные условия. Для решения уравнений движения используется алгоритм Верле. Начальная конфигурация частиц задается случайным размещением атомов в ячейке. Результатом моделирования такого типа является серия мгновенных «снимков» конфигурации частиц, отделенных друг от друга интервалом времени Δt . После выхода системы в равновесие каждая атомная конфигурация рассматривалась как микроканонический ансамбль для расчета термодинамических свойств исследуемой системы.

С помощью программного комплекса MOLDY [8] вычислялись радиальные функции распределения $g_{\alpha\beta}(r)$ β -атомов около α -атомов и соответствующие им структурные факторы $S_{\alpha\beta}(k)$, парциальные автокорреляционные функции скоростей $Z_{\alpha}(t)$, нормализованные спектры $f_{\alpha}^{\alpha}(\omega)$, среднеквадратичное смещение $\langle r^2(t) \rangle_{\alpha}$ и коэффициенты диффузии D_{α} α -атомов [5].

Для контроля сходимости результатов периодически через k_t временных шагов вычислялись температура, кинетическая и потенциальная энергия, давление системы, а также статистические ошибки расчета.

Атомная динамика системы исследовалась путем расчета и анализа временных функций ван Хова $G(\vec{r}, t)$, $G_s(\vec{r}, t)$, $G_d(\vec{r}, t)$ и их Фурье-образов в виде промежуточных корреляционных функций когерентного $F(\vec{k}, t)$ и некогерентного $F_s(\vec{k}, t)$ рассеяния и динамических структурных факторов когерентного $S(\vec{k}, \omega)$ и некогерентного $S_s(\vec{k}, \omega)$ рассеяния [6]:

$$F(\vec{k}, t) = \langle \int [G(\vec{r}, t) - \rho] \exp(i\vec{k}\vec{r}) d\vec{r} \rangle, \quad (1)$$

$$S(\vec{k}, \omega) = \langle \frac{1}{2\pi} \int \exp(i\omega t) F(\vec{k}, t) dt \rangle, \quad (2)$$

где \vec{k} - волновой вектор, а ω - частота. Статистическое усреднение $\langle \dots \rangle$ временных функций проводилось по ансамблю частиц и начальному моменту времени.

МД-исследование жидкого калия и системы калий-кислород проводилось на моделях простой жидкости со сферически симметричным парным потенциалом. Для моделирования жидкого калия при $T = 340, 440$ и 550 К использовались два типа потенциала взаимодействия, часто применяемых при теоретическом исследовании металлических расплавов, - это модифицированный потенциал Леннарда-Джонса [10] и межионный псевдопотенциал [11, 12] пустого ионного остова Ашкрофта [13] с диэлектрической функцией Гелбарда и Воско [14], который Миранда (КЗ) применил для МД-моделирования жидкого калия при $T = 340$ К [15].

Исследование характеристик жидкого калия: $g(r)$, $S(k)$, $Z(t)$, $f_n(\omega)$, $\langle r^2(t) \rangle$ и коэффициентов самодиффузии D , для числа частиц в МД-ячейке $N = 250, 1024, 2000$ и 3456 и $T = 340, 440$ и 550 К при варьировании радиуса пустого ионного остова Ашкрофта R_c позволило оптимизировать параметры потенциала для наилучшего согласования расчетных и экспериментальных данных [5, 8]. Это было достигнуто при использовании модифицированного потенциала Леннарда-Джонса с $r_0 = 4.836 \text{ \AA}$ и межйонного потенциала при $R_c = 1.185 \text{ \AA}$ для радиальной функции $g(r)$ и структурного фактора $S(k)$ и спектра автокорреляционной функции скоростей (см. разд. 3).

Что касается коэффициента самодиффузии D атомов калия, то межйонный потенциал с $R_c = 1.185 \text{ \AA}$ наилучшим образом согласовывает результаты МД-расчета с экспериментальными данными [16] при всех температурах. Модифицированный потенциал Леннарда-Джонса с $r_0 = 4.836 \text{ \AA}$ дает удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных значений D только при $T = 340$ К.

Следует отметить, что оптимизация параметров потенциала по положению и высоте пиков функций $g(r)$ и $S(k)$ не достаточна для получения нужных значений коэффициента самодиффузии. Требуется более тщательная подгонка искоемых параметров путем согласования динамических характеристик, подверженных сильному влиянию потенциала. Особенно это относится к модифицированному потенциалу Леннарда-Джонса, который нуждался в подгонке практически для каждой вычисляемой характеристики. Поэтому при вычислении автокорреляционных функций жидкого калия [6] в дальнейшем использовали только межйонный потенциал.

Функцию ван Хофа $G_s(r, t)$, промежуточную корреляционную функцию $F_s(k, t)$ и динамический структурный фактор $S_s(k, \omega)$ некогерентного рассеяния исследовали на изотропной модели $N=2000$ с $L=53.904 \text{ \AA}$ при $T=340$ К и $L=55.081 \text{ \AA}$ при $T = 550$ К. При этом функцию $F_s(k, t)$ определяли непосредственно в МД-расчетах и только для фиксированных значений модуля волнового вектора (из-за периодических граничных условий): $k = (2\pi/L)\sqrt{l_1^2 + l_2^2 + l_3^2}$, где l_1, l_2, l_3 - целые числа.

При $k > 1 \text{ \AA}^{-1}$ $F_s(k, t)$ быстро затухает как функция времени. В таком случае структурный фактор $S_s(k, \omega)$ можно вычислять с помощью преобразования Фурье в виде определенного интеграла [17], неприменимого для $k < 1 \text{ \AA}^{-1}$ (где $F_s(k, t)$ как функция времени изменяется медленно), поскольку косинус-интеграл Фурье на конечном отрезке времени дает модуляции и в целом неадекватный спектр $S_s(k, \omega)$.

Чтобы исключить эти эффекты, в программе MOLDY предусмотрена доработка "хвоста" функции $F_s(k, t)$ экспоненциальным приближением $F_s^{\text{exp}}(k, t) = \exp(-k^2Dt)$ при $t \rightarrow \infty$ и Фурье-преобразование модифицированной $F_s^{\text{res}}(k, t)$ в спектры $S_s^{\text{res}}(k, \omega)$ для малых значений модуля волнового вектора (см. рис.1).

При МД-исследовании примеси кислорода в жидком калии использовалась модель тройной системы $(1-3x)K+2xK^{q+}+xO^{2q-}$, где $x = 0.085$ - атомная доля кислорода в смеси, q - величина заряда катиона калия [18]. Моделирование проводилось при 550 К для $q = 1$ на модели из $N = N_K + N_{K^+} + N_{O^{2-}}$ частиц в кубической ячейке с периодическими граничными условиями. Учитывая зарядовую нейтральность системы, получаем $N_{K^+} = 2N_{O^{2-}}$. При этом объем кубической МД-ячейки $V = L^3$ выби-

рался из условия плотности жидкого калия $\rho_K = 777 \text{ кг/м}^3$ и 8.5% кислорода в виде микровключений с плотностью $\rho_{K_2O} = 2320 \text{ кг/м}^3$.

Для парного взаимодействия частиц: (K^+, K^+) , (K^+, O^{2-}) , (O^{2-}, O^{2-}) и (K, O^{2-}) использовали потенциал Борна-Мейера без дисперсионных членов [19]

$$U_{\bar{a}\bar{a}}(r) = \frac{Z_{\bar{a}} Z_{\bar{a}} e^2}{r} + C_{\bar{a}\bar{a}} B \left(1 + \frac{Z_{\bar{a}}}{n_{\bar{a}}} + \frac{Z_{\bar{a}}}{n_{\bar{a}}} \right) \exp[A(\sigma_{\bar{a}} + \sigma_{\bar{a}} - r)], \quad (3)$$

где e - заряд электрона, $C_{K+K+} = 1.25$, $C_{K+O^{2-}} = 1.0$, $C_{O^{2-}O^{2-}} = 0.75$ - коэффициенты Паулинга, $B = 0.211 \text{ эВ}$ и $A = 3.45 \text{ \AA}^{-1}$ - параметры отталкивания ионных остовов и экранирования соответственно, $\sigma_{K+} = 1.39 \text{ \AA}$, $\sigma_{O^{2-}} = 1.33 \text{ \AA}$ - радиусы ионов, $Z_{K+} = +1$, $Z_{O^{2-}} = -2$ - заряд катиона и аниона соответственно, $n_{K+} = n_{O^{2-}} = 8$ - число электронов на внешней оболочке ионных остовов. Нейтральный атом калия взаимодействует с анионом кислорода по тому же потенциалу при $Z_K = 0$.

Для описания взаимодействия атомов калия (K, K) и катиона (K, K^+) использовали описанный выше межйонный потенциал с $R_c = 1.185$ [5].

При МД-расчете действие потенциала анионов кислорода ограничивалось половиной длины ребра кубической ячейки. Учитывая малое число атомов кислорода в смеси и катионное экранирование анионов, можно надеяться, что это ограничение не изменило существенно модель рассматриваемой системы.

Моделирование проводилось при жесткой "привязке" заряда к ионам калия [18] и с обменом заряда между соседними K и K^+ [20, 21] по следующей схеме.

Через каждые 50 временных шагов МД-расчета производили одновременный обмен зарядом ($K \leftrightarrow K^+$) между соседними атомами (K) и катионами (K^+) калия. После этого систему приводили в равновесное состояние обычным образом и затем рассчитывали интересующие нас характеристики. Процедура зарядового обмена позволила избежать недостатков МД-моделирования диффузионно-лимитированной агрегации заряженных частиц.

Для каждой компоненты смеси рассчитывались функции $g_{\alpha\beta}(r)$, $S_{\alpha\beta}(k)$, $Z_{\alpha}(t)$, $f_n^{\alpha}(\omega)$ и коэффициенты диффузии D_{α} α -частиц в различные моменты времени t_i . Соответствующие этим моментам времени атомные конфигурации анализировались с помощью методов статистической геометрии.

Было установлено, что все функции $g_{\alpha\beta}(r)$, $\Psi_{\alpha\beta}(t)$, $f_n^{\alpha}(\omega)$ для нейтрального калия практически не меняются при $t > 3.0 \cdot 10^{-11} \text{ с}$ в отличие от парциальных функций ионов, для которых характерно медленное изменение параметров на больших временах, что, по-видимому, связано со структурными (диффузионными) изменениями системы калий-кислород.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО НЕУПРУГОМУ РАССЕЯНИЮ НЕЙТРОНОВ

Эксперименты по неупругому рассеянию нейтронов на жидком калии и сплаве калий-кислород подробно описаны в работах [22-24]. Они проводились на спектрометре ДИН-2ПИ, использующем один из нейтронных пучков быстрого импульсного реактора ИБР-2 лаборатории нейтронной физики им. И.М. Франка (ОИЯИ, Дубна). Образец исследуемого расплава был выполнен в виде циркуляционной петли, что позволяло изменять и контролировать концентрацию кислорода без остановки эксперимента.

Измерения на чистом калии проведены при трех температурах: 340, 440 и 550 К. Расплав калий-кислород исследовался при 550 К и трех концентрациях кислоро-

да: 1.8, 5.1 и 8.5% ат. Согласно данным по растворимости этой примеси в жидком калии [4], при выбранной температуре никаких оксидных фаз в расплаве не существовало.

Из полученного в эксперименте полного дважды дифференциального сечения рассеяния (ДДСР) выделялись две его составляющие, соответствующие квазиупругому и неупругому рассеянию. Первая из них содержит информацию о характере диффузии в исследуемой жидкости (эти данные для чистого калия представлены в [25], а для расплава калий-кислород в [23, 26]), тогда как вторая используется для анализа колебательного движения частиц в силовом поле соседей. Такая информация выражается обычно в форме частотного спектра колебаний атомов расплава и является ключевой характеристикой вещества, определяющей как его микроскопические, так и термодинамические свойства [27]. Детали, связанные с процедурой обработки нейтронного эксперимента, и основные соотношения, используемые при этом, можно найти в [28].

СРАВНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ С МД-РАСЧЕТАМИ

Чистый калий

На рис. 1 сравниваются расчетные и экспериментальные пики квазиупругого рассеяния для двух температур, из чего следует вывод о хорошем согласии полученных результатов. О том же свидетельствует и рис. 2, где показаны частотные спектры колебаний атомов калия для двух температур. Небольшое отличие экспериментальных спектров от расчетных при энергиях возбуждения $\hbar\omega \sim 5-6$ МэВ

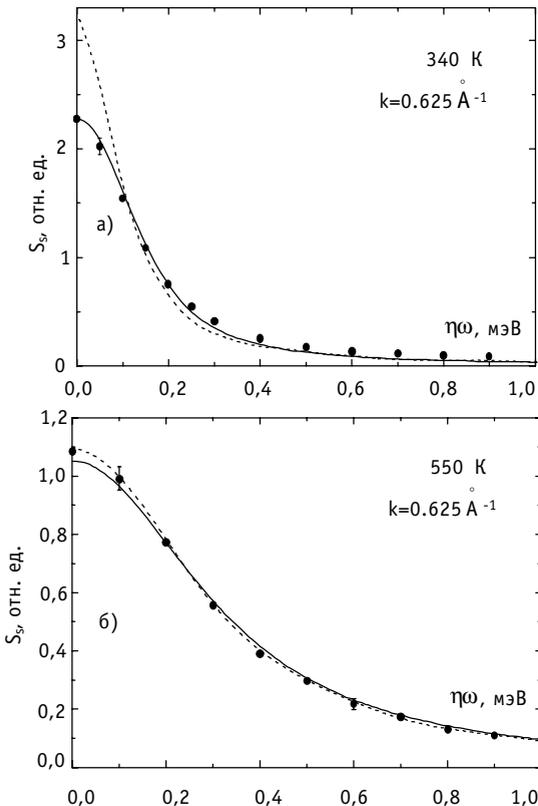


Рис. 1. Расчетные $S_S(k, \omega)$ (---), $S_S^{res}(k, \omega)$ (—) и экспериментальные $S_S^{exp}(k, \omega)$ (••), пики квазиупругого рассеяния при $k = 0.625 \text{ \AA}^{-1}$ и двух температурах: 340 К (а) и 550 К (б)

можно отнести на счет неполного учета когерентных эффектов при обработке данных эксперимента.

Расчитанные и измеренные значения коэффициентов самодиффузии калия: $D_3 = 3.85 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ и $D_p = 3.70 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ при $T = 340 \text{ К}$, $D_3 = 12.50 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ и $D_p = 11.96 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ при $T = 550 \text{ К}$, позволяют заявить об адекватности выбранного для калия парного потенциала взаимодействия и корректности использованных расчетных процедур.

Расплав калий-кислород

Анализ неупругих составляющих экспериментальных ДДСР, полученных на расплаве К-О, подробно изложен в [24]. Результатом такого анализа был частичный частотный спектр элементарных колебаний кислорода в расплаве, извлечение которого осуществлялось двумя способами:

1) ДДСР чистого калия после нормировки вычиталось из ДДСР расплава;

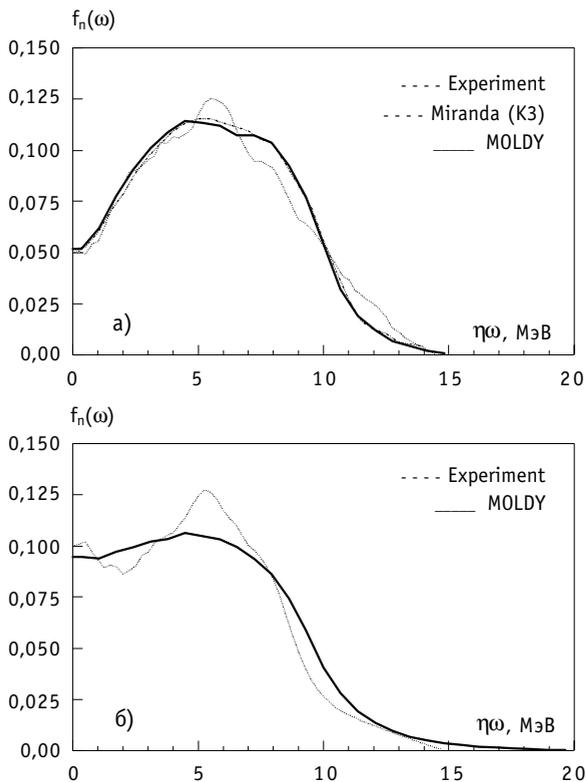


Рис. 2. Частотные спектры жидкого калия при 340 К (а) и 550 К (б), полученные в эксперименте (---) и МД-расчетах (—)

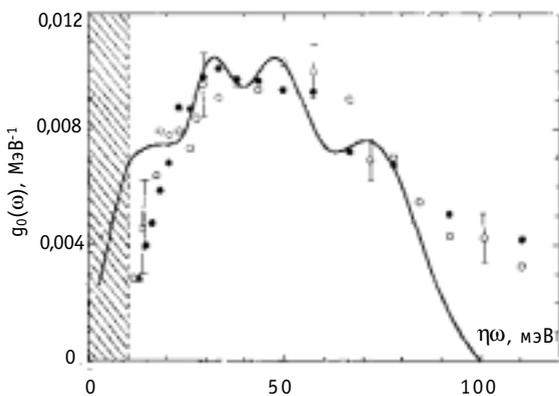


Рис. 3. Частотный спектр кислорода в расплаве К-О при 550 К, полученный МД-методом (—) и при анализе экспериментальных данных с использованием ДДСР чистого калия (•) и разностных по кислороду ДДСР системы К-О (○). Извлечение частотного спектра на отрезке $0 \le \hbar\omega \le 10$ МэВ (заштрихованная область) не проводилось

нием частот колебаний атомов жидкого калия [32] на МД-расчет при зарядовом обмене $K \leftrightarrow K^+$ (см. выше).

Анализ структуры модельного расплава методами статистической геометрии показал, что анионы кислорода имеют тенденцию группироваться в разветвленные кластеры $(K_2O)_n$, один из которых показан на рис. 4.

2) ДДСР расплава, соответствующие разным концентрациям кислорода, вычитались друг из друга и анализировались.

Предполагалось [24], что полученные разным образом спектры относятся только к кислороду. Именно поэтому на практике они оказались близки друг другу, что подтверждается рис. 3.

Видно, что экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с результатами МД-моделирования для средних энергий возбуждения $20 < \hbar\omega < 80$ МэВ. На краях же имеет место явное расхождение данных. МД-расчет демонстрирует отсутствие каких-либо мод при $\hbar\omega \geq 100$ МэВ, тогда как в эксперименте эта область спектра имеет монотонно спадающую интенсивность. Правда, статистическая точность экспериментальных данных здесь весьма низкая. Более того, измеренные фоновые спектры некоторых оксидов (MgO [29], CuO [30]) свидетельствуют о том, что верхняя граница этих спектров не превосходит уровня энергии 60–80 МэВ. Сравнивая термодинамические свойства этих веществ с такими же данными для оксида калия [31], следует заключить, что для последнего эта граница не может быть выше. Возможно, “хвост” экспериментальной кривой носит методический характер и связан с некорректным учетом эффектов многократного рассеяния.

Расхождение результатов численного моделирования и данных эксперимента при $\hbar\omega \leq 15$ МэВ, по-видимому, обусловлено влиянием частот колебаний атомов жидкого калия [32] на МД-расчет при зарядовом обмене $K \leftrightarrow K^+$ (см. выше).

Существование кислорода в форме двухзарядного аниона в расплавах щелочных металлов обнаружено давно [33-36]. В последней работе приводится единственный, известный нам, частотный спектр колебаний кислорода в расплаве Cs-O, полученный в эксперименте по рамановскому рассеянию света. Что же касается строения и свойств комплексов $(K_2O)_n$, возникающих в жидком калии, то такие данные в научной литературе нам неизвестны.

Структурная модель кислорода (рис. 4) в жидком калии подтверждается видом функций радиального распределения g_{K+K+} и g_{O2-O2-} , представленных на рис. 5.

Из анализа этих кривых следует, что число ближайших соседей у катиона калия в форме $K^+ \sim 2$ и у кислородного аниона в форме O^{2-} тоже ~ 2 . При этом расщепление главного пика функции g_{K+K+} можно интерпретировать как результат поворота части молекулярных комплексов K_2O на 90° вокруг ветви кластера, так что теперь расстояние между ближайшими катионами калия имеет два значения, равные 2.9 и 4.5 Å согласно рис. 5. Из "заселенности" субпиков следует, что повернутый молекулярный комплекс появляется реже.

Расщепление главного пика функции g_{O2-O2-} является, по-видимому, следствием упомянутого эффекта: поворот комплексов относительно ветви кластера приводит к уменьшению расстояния между анионами кислорода. Из рис. 5 видно, что эти расстояния равны, соответственно, 3.7 и 4.4 Å; т.к. первый субпик заселен меньше, то он относится к молекулярным комплексам, повернутым относительно других на 90° . Заметим при этом, что в МД-расчетах [5] получен аномально узкий пик функции g_{K+O2-} , который указывает на фиксированное расстояние между противоположными зарядами в молекулярном комплексе K_2O и, следовательно, на сильную связь между ними.

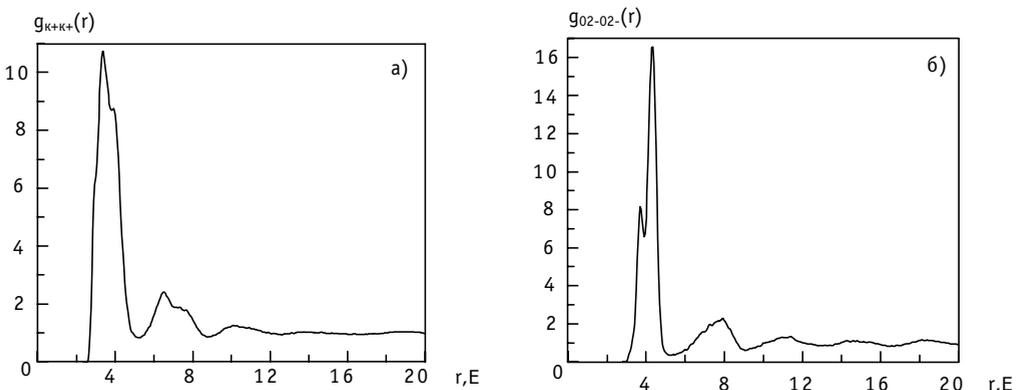


Рис. 5. Функции радиального распределения g_{K+K+} (а) и g_{O2-O2-} (б), полученные при МД-моделировании системы калий-кислород

Рис. 4. Типичный кластер $(K_2O)_n$ в МД-модели расплаве K-O при 550 K, состоящий из разветвленных цепей анионов кислорода (большие кружки) и катионов калия (малые кружки)

Вышеприведенное сравнение расчетных и экспериментальных частотных спектров кислорода, представленное на рис. 3, говорит о некотором сходстве между ними. Что касается интерпретации самого вида частотного спектра, то пока это может быть сделано сугубо качественно. Колебательные моды анионов кислорода условно можно разделить на “оптическую” и “акустическую” области. Первая из них (высокочастотная) включает колебания аниона внутри молекулярного комплекса K_2O в двух направлениях: перпендикулярно ветви кластера (наиболее высокочастотные моды) и вдоль ее оси. Низкочастотная (“акустическая”) область частотного спектра кислорода, по-видимому, связана с колебаниями молекулярного комплекса K_2O . Аналитические оценки колебательного спектра комплекса планируются нами в ближайшее время.

ВЫВОДЫ

Проведен большой цикл МД-расчетов по моделированию структурных и динамических характеристик жидкого калия и расплава калий-кислород.

Представлен редкий случай прямого сравнения данных МД-моделирования и эксперимента по неупругому рассеянию нейтронов для указанных систем.

Хорошее согласие данных МД-моделирования и нейтронного эксперимента на чистом калии свидетельствует об адекватности использованных физических моделей и корректности расчетных процедур.

Сравнение расчетных и экспериментальных частотных спектров колебаний кислорода в расплаве демонстрирует их согласие в области средних энергий ($20 < \hbar\omega < 80$ МэВ). Выявление причин расхождения экспериментальных и расчетных данных на краях спектра требует более глубокого изучения процессов, протекающих в расплаве, а также более тщательной постановки эксперимента и обработки его данных.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 96-02-16315) и ГНТП “Актуальные направления в физике конденсированных сред”, направление “Нейтронные исследования”.

Авторы благодарны профессору М.Н. Ивановскому и В.А. Морозову за полезное обсуждение работы и признательны Т.А. Кувшинчиковой за помощь при оформлении рукописи.

Список литературы

1. Субботин В.И., Арнольд М.Н., Ивановский М.Н. Физико-химические основы применения жидкометаллических теплоносителей. - М.: Атомиздат, 1970.
2. Коррозия конструкционных материалов в жидких щелочных металлах / Под ред. Б.А. Невзорова. - М.: Атомиздат, 1977.
3. Ивановский М.Н., Морозов В.А., Шимкевич А.Л., Шматко Б.А. О термодинамической устойчивости сложных окислов в щелочных металлах // Теплофизика высоких температур. - 1982. - Т. 20. - № 6. - С. 1098.
4. Ивановский М.Н., Морозов В.А., Шимкевич А.Л., Шматко Б.А. О растворимости кислорода в щелочных металлах // Теплофизика высоких температур. - 1983. - Т. 21. - № 5. - С. 909.
5. Шимкевич И.Ю., Новиков А.Г., Савостин В.В., Шимкевич А.Л. Структурные и динамические свойства МД-модели жидкого калия: Препринт ГНЦ РФ - ФЭИ, № 2437. - Обнинск, 1995.
6. Шимкевич И.Ю., Новиков А.Г., Савостин В.В., Шимкевич А.Л. Молекулярно-динамическое исследование автокорреляционных функций жидкого калия: Препринт ГНЦ РФ - ФЭИ, № 2645. - Обнинск, 1997.
7. Полухин В.А., Ухов В.Ф., Дзугутов М.М. Компьютерное моделирование динамики и структуры жидких металлов. - М.: Наука, 1981.
8. Шимкевич И.Ю., Шимкевич А.Л. МДММК (Молекулярная динамика и метод Монте-Карло)-программа для построения кристаллических и неупорядоченных систем: Препринт ГНЦ РФ - ФЭИ, № 2524. - Обнинск, 1996.

9. Кузин В.В., Морозов В.А., Шимкевич А.Л., Шимкевич И.Ю. О структуре молекулярно-динамической модели жидкого калия: Препринт ГНЦ РФ - ФЭИ, № 2415. - Обнинск, 1994.
10. Shu Zhen, Davies G.J. Calculation of the Lennard-Jones n - m Potential Energy Parameters for Metals // Phys. Stat. Sol. (A). - 1983. - V. 78. - P. 595.
11. Shyu Wei-Mei, Singwi K.S., Tosi M.P. Many-Electron Correlation Effects on the Metallic Interionic Potential // Phys. Rev. B. - 1971. - V. 3. - P. 281.
12. Berezhkovsky L.M., Drozdov A.N., Zitserman V.Yu., Lagar'kov A.N., Triger S.A. Molecular Dynamics Simulation of the Transport Properties of Liquid Sodium and Potassium // J. Phys. F. - 1984. - V. 14. - P. 2315.
13. Ashcroft N.W. Electron-Ion Pseudopotentials in Metals // Phys. Lett. - 1966. - V. 23. - P. 48.
14. Gelbart D.J.W., Vosko S.H. The Screening Function of an Interacting Electron Gas // Can. J. Phys. - 1966. - V. 44. - P. 2137.
15. Miranda Gonzalez J.M. A Molecular Dynamics Study of Liquid Potassium at 340K // J. Phys. F. - 1986. - V. 16. - P. 1.
16. Handbook of Thermodynamic and Transport Properties of Alkali Metals / Ed. R.Ohse. - Oxford: Blackwell Sci. Publ., 1980.
17. Lado F. Numerical Fourier Transforms in One, Two, and Three Dimensions for Liquid State Calculations // Journal of Computational Physics. - 1971. - V. 8. - P. 417.
18. Шимкевич И.Ю., Кузин В.В., Шимкевич А.Л. Исследование тройной системы $K + K^{q+} + O^{2q-}$ методом молекулярной динамики и статистической геометрии: Препринт ГНЦ РФ - ФЭИ, № 2724. - Обнинск, 1998.
19. Tissen J.T.W.M., Janssen G.J.M. Molecular-Dynamics Simulation of Molten Alkali Carbonates. // Molecular Physics. - 1990. - V. 71. - P. 413.
20. Shimkevich A.L., Shimkevich I.Yu., Kuzin V.V. Molecular Dynamics Study of Ternary System $K + K^q + O^{2q}$ // Condensed Matter Physics. - 1999. - V. 2. - P. 329.
21. Shimkevich I.Yu., Kuzin V.V., Shimkevich A.L. Dynamic Structure of Oxygen in Liquid Potassium Studied by MD Method and Statistical Geometry // Journal of Non-Crystalline Solids. - 1999. - V. 250-252. - P. 129.
22. Заезжев М.В., Ивановский М.Н., Новиков А.Г., Савостин В.В., Шимкевич А.Л. Атомная динамика жидкого калия в температурном режиме 340-550 K // Теплофизика высоких температур. - 1994. - Т. 32. - № 5. - С. 749.
23. Заезжев М.В. и др. Диффузия кислорода в расплаве калий-кислород: Препринт ГНЦ РФ - ФЭИ, № 2336. - Обнинск, 1993.
24. Заезжев М.В., Новиков А.Г., Савостин В.В., Шимкевич А.Л. Микродинамика расплава калий-кислород: Препринт ГНЦ РФ - ФЭИ, № 2713. - Обнинск, 1998.
25. Novikov A.G. et al. // J. Phys.: Cond. Matter. - 1996. - V. 8. - № 20. - P. 3525.
26. Zaezjev M.V., Ivanovsky M.N., Karymov D.I., Novikov A.G., Savostin V.V. // Physica B. - 1997. - V. 234-236. - P. 919.
27. Гуревич И.И., Тарасов Л.В. Физика нейтронов низких энергий. - М.: Наука, 1965.
28. Лисичкин Ю.В. и др. Вопросы атомной науки и техники // Ядерные константы. - 1979. - Вып. 2. - С. 12.
29. Sangster M., Peckham G., Saunderson D. // J. Phys. C. - 1970. - V. 3. - № 5. - P. 1026.
30. Паршин П.П., Землянов М.Г., Солдатов П.И. // ЖЭТФ. - 1992. - Т. 101. - Вып. 2. - С. 750.
31. Физико-химические свойства окислов: Справочник/ Под ред. Г.В. Самсонова. - М.: Металлургия, 1978.
32. Заезжев М.В., Ивановский М.Н., Новиков А.Г., Савостин В.В., Шимкевич А.Л. // Журн. физ. химии. - 1994. - Т. 68. - № 2. - С. 371.
33. Kendall P.W. // Nucl. Materials. - 1970. - V. 35. - P. 41.
34. Ivanovsky M.N., Morosov B.A., Shimkevich A.L., Smatko B.A. // Liquid Metal Engineering, VNES. - 1984. - V. 3. - P. 15.
35. Tsuchiya Y., Seymour E., Styles G. // J. Phys.: Cond. Matter. - 1994. - V. 6. - P. 3889.
36. Simon A. // J. Solid State Chem. - 1979. - V. 27. - № 1. - P. 87.

Поступила в редакцию 22.11.99.

УДК 621.039.554.34

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЯХ С ПОТЕРЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

А.Д. Ефанов, В.В. Ложкин, Б.И. Куликов, О.А. Судницын,
Ю.А. Безруков, С.Н. Зайцев

* ГИЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск

** ОКБ «Гидропресс», г. Подольск



На 7 и 37-ми стержневых полномасштабных по высоте моделях ТВС ВВЭР-1000 проведены экспериментальные исследования теплогидравлических характеристик, температурных режимов имитаторов твэлов и скоростей фронта смачивания при максимальной проектной аварии (МПА) на стадии повторного залива активной зоны реактора. Опыты выполнены на петле повторного залива (ПЗ-37) стенда СВД-1.

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени проведено большое количество исследований по изучению процессов при повторном смачивании (ПС) с последующей разработкой расчетных кодов, в основном, для реакторов типа PWR, в то время как для ВВЭР объем исследований ограничен. Использование данных, полученных для PWR, не всегда допустимо вследствие конструктивных отличий активной зоны ВВЭР таких, как бесчехловые ТВС, большее количество дистанционирующих решеток, наличие дырчатой плиты в верхней головке ТВС, значительное количество направляющих каналов системы СУЗ. Влияние этих факторов в известных отечественных работах не исследовалось. Поэтому в расчетах и в прогнозировании развития аварийных ситуаций используются консервативные подходы, слабо подтвержденные экспериментами, что не позволяет правильно оценить действительные запасы и резервы.

Для обоснования и верификации расчетных программ и сквозных кодов необходимо проведение исследований и накопление экспериментальных данных, полученных на многостержневых и многоканальных моделях ТВС и АЗ, адекватно учитывающих распределение тепловыделений и конструктивные решения в ТВС и АЗ. Исходя из практики исследования вопросов безопасности АЭС за рубежом [1], предпочтительно, в первую очередь, исследовать влияние отдельных факторов и явлений.

В программе работ по совершенствованию ТВС ВВЭР, разработанной ФЭИ и опубликованной в сборнике «Теплогидравлика-94» [2], был предложен достаточно полный перечень экспериментальных исследований, необходимых для обоснования ТВС в ава-

© А.Д. Ефанов, В.В. Ложкин, Б.И. Куликов, О.А. Судницын, Ю.А. Безруков, С.Н. Зайцев, 2000

рийных режимах с потерей теплоносителя. Результаты работ, проведенных по данной программе, начиная с 1996 г., на многостержневых моделях ТВС, частично опубликованы в трудах международных конференций NURETH-8 [3], "Теплофизика - 98" [5] и «Избранных трудах ФЭИ» [4].

В настоящем сообщении кратко излагаются результаты всех исследований, выполненных в 96-98 гг. на 7 и 37-ми стержневых моделях ТВС при заливе снизу, сверху и комбинированном.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Исследования по ПС проведены на постоянно совершенствуемой петле повторного залива ПЗ-37 стенда СВД-1. На рис. 1 приведен последний вариант петли образца 1998 г. При подготовке испытаний по контракту с фирмой ABB CENO была проведена аудиторская проверка стенда СВД-1 на соответствие международному стандарту качества ISO-9001. Высокая оценка подтверждена получением сертификата качества.

В качестве экспериментального устройства использовались три модели ТВС ВВЭР-1000 полномасштабной высоты, отличающиеся конструкцией верхней камеры, с 37 имитаторами ТВС, изготовленными в ФЭИ. На рис.2 приведен последний вариант модели ТВС с ВКР. Имитаторы косвенного нагрева двух модификаций с неравномерным пятиступенчатым распределением энерговыделения на длине

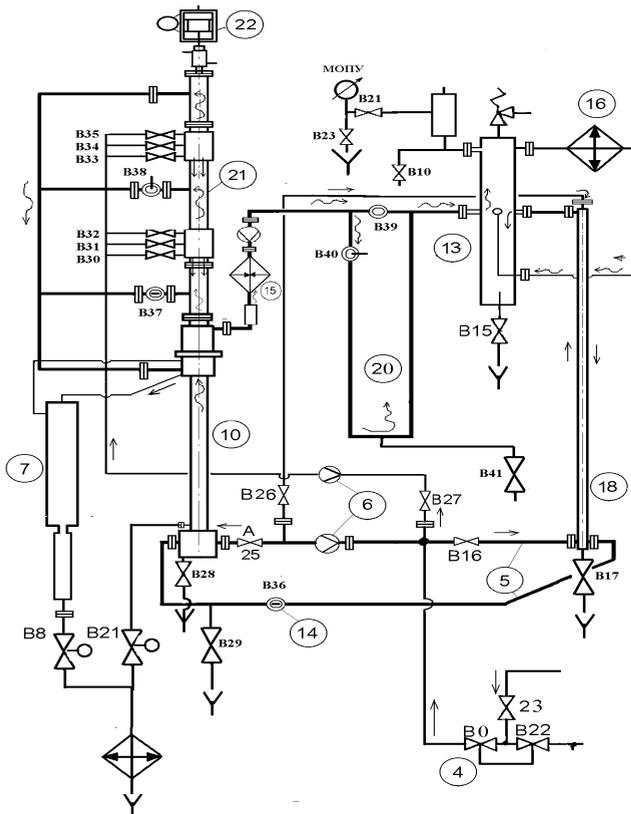


Рис. 1. Схема петли повторного залива (ПЗ-37.3): 4 - перекидной клапан, двоянный; 5 - перемычки короткая (ПК) и длинная (ПД); 7 - сосуд унесенной влаги; 10 - рабочая колонка РК (модель ТВС); 13 - паровой компенсатор-смеситель КС (имитатор разрыва); 18 - напорный коллектор НК (модель НКР); 20 - модель гидрозатора; 21 - верхняя камера ВК (модель ВКР)

3530 мм со средним по всем имитаторам коэффициентом неравномерности $Kz \approx 1,6$ и $1,48$. В имитаторе установлено шесть внутренних ХА-термопар, диаметром 1мм. Термопары расположены по трем в первой модификации и по четырем во второй схеме, в общей сложности на 17 уровнях, что позволяло проследить перемещение зоны с максимальной температурой стержней и фронта смачивания как по высоте, так и по сечению пучка (рис.3, 4). Оболочка стержней из нержавеющей стали, средним диаметром 9,14 и 9,1, толщиной стенки 0,6 мм.

Стержни собирались в пучок по треугольной решетке с шагом 12,75 мм и дистанционировались 15 штатными стальными решетками с шагом по

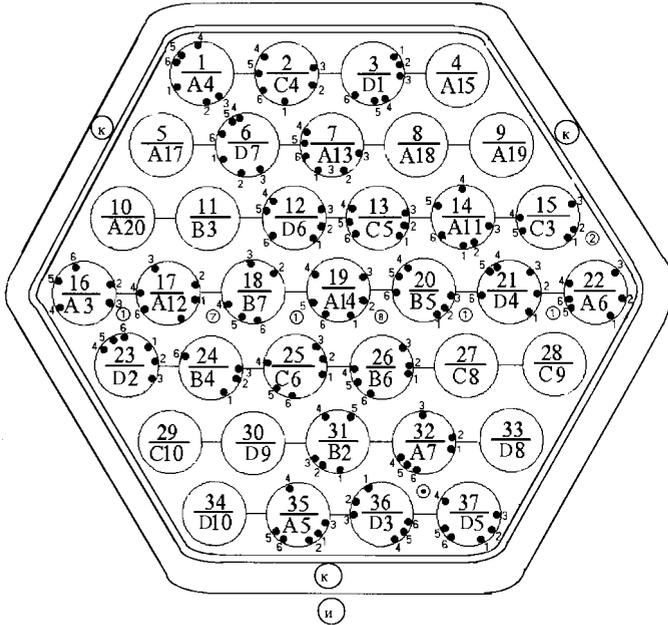


Рис. 3. Схема распределения датчиков по сечению рабочей колонки KB-37-4 (вид сверху): $\frac{19}{A14}$ - номер стержня / тип имитатора и номер имитатора по паспорту; ● (7), (К) (И) - термомпары: стеночная, поточная, корпусная, теплоизоляции

параметры дублировались. Класс точности датчиков и аппаратуры - от 0,2 до 0,5%. Общее количество измеряемых параметров - 296.

Сбор и первичная обработка информации проводились быстродействующей компьютерной системой (КССОД) на базе IBM PC-486 с частотой ввода-вывода 90 кГц, позволяющей измерять, фиксировать информацию по 300 каналам с интервалом измерений от 0,05 до 2,0 с и накапливать более 1000 замеров на каждый измерительный канал в одном опыте с классом точности измерительного тракта 0,3%.

В результате суммарная погрешность измерения параметров в эксперименте в табличном варианте вывода информации составила: давление 0,5%; расход 2,0%; перепад давления 1,0%; температура 1,0%.

Основная цель экспериментального исследования: получение систематических экспериментальных данных, необходимых для верификации кодов и программ по влиянию на температурные режимы имитаторов твэл и время наступления повторного смачивания: режимных параметров (давление, температура, расход охлаждающей воды); условий подачи воды: в нижнюю и верхнюю камеры модели ТВС при заливе снизу и сверху с разных высотных уровней; соотношений расходов, подаваемых в верхнюю и нижнюю камеры при комбинированном заливе; при фиксированных расходах и подключении моделей напорного коллектора реактора (НКР) и верхней камеры (ВКР); влияния дистанционирующих решеток.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментальное исследование ПЗ при заливе снизу на 37-ми стержневых моделях проведено при 3 вариантах организации петли повторного залива, отличающихся способом подачи воды в модель ТВС.

Результаты измерений в первом базовом варианте с фиксированным расходом (без

лись: давление на входе и выходе модели ТВС; компенсаторе-смесителе (имитаторе разрыва); расходы жидкости на входе и пара на выходе РК; температуры: потока теплоносителя на входе, выходе и в ячейках пучка, стенки имитаторов, корпуса рабочего участка и изоляции; мощность, выделяемая на пучке стержней и ток через каждый стержень; перепады давления: на обогреваемой и необогреваемой частях пучка, сосуде для сбора унесенной влаги, на модели напорного коллектора, на гидрозатворе и верхней камере. Измерения наиболее ответственных

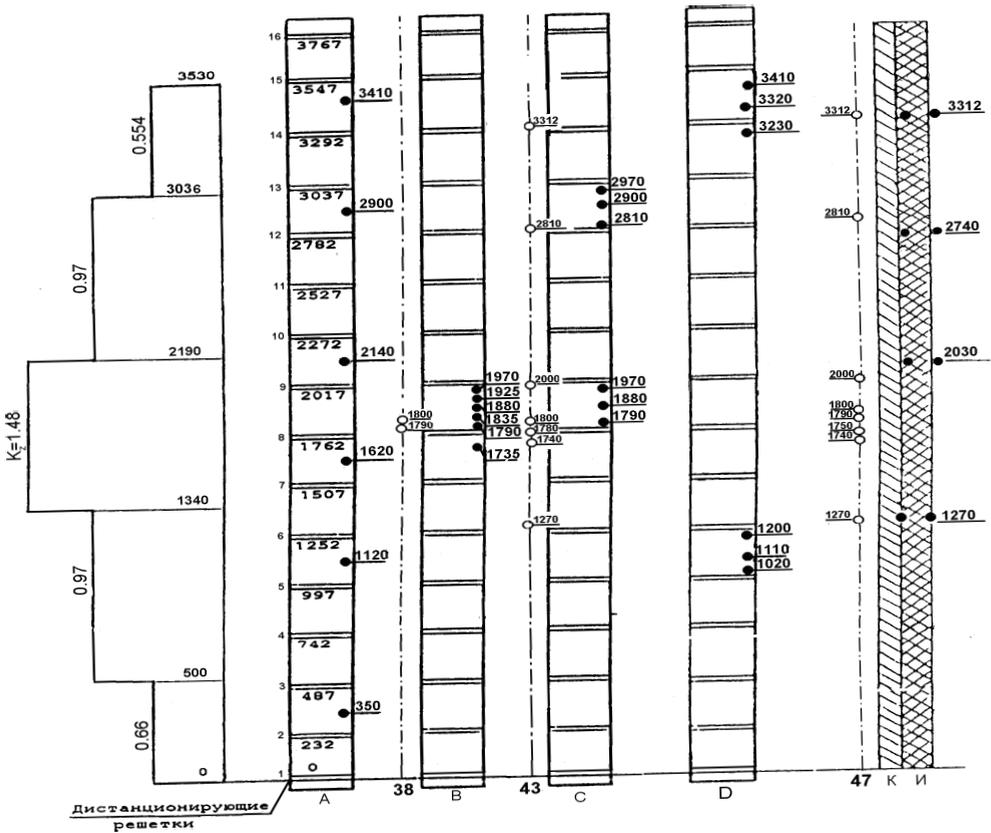


Рис. 4. Профиль тепловыделения и расположение термомпар по высоте в рабочей колонке КВ-37/4: А, В, С, Д- типы имитаторов; К - корпус; И - изоляция; • - термомпары для измерения температуры стенки; о- термомпары для измерения температуры жидкости; 1-16 - номер дистанционирующей решетки; 47- номер гидравлической ячейки

НКР) подтвердили и уточнили основные выводы по влиянию режимных параметров по результатам исследований на 7-стержневой модели:

- оптимальная скорость залива для рассматриваемой модели с равномерным (в пределах технологического разброса) распределением мощности по сечению, составляет 5см/с, что эквивалентно среднему расходу по АЗ при одновременно работающих высоко (вн) и низко (нн) напорных насосов системы СА03 с суммарной подачей 900м³/ч (соответственно, 150 и 750м³/ч); такая скорость при “стартовом” максимальном линейном тепловом потоке $q_{\lambda c} = 2,8 \text{ кВт/м}$, что соответствует началу стадии залива, не приводит к повышению максимальной температуры оболочки выше 860°С с временем нахождения в зоне температур выше 800 °С менее 100 с и продолжительностью залива пучка ($t_{\text{псн}}$) менее 400 с; снижение скорости залива до 2см/с вызывает резкое повышение максимальных температур оболочки, достигающих более 1000 °С; так же резко нарастает и время пребывания в зоне температур выше 800 °С, достигая 300 с; повышение скорости залива снижает максимальную температуру и время завершения повторного смачивания (рис.5);
- повышение давления снижает время залива, не сказываясь существенно на значениях максимальных температур (рис. 6);
- увеличение стартовых значений мощности и температуры оболочки, приво-

дят к пропорциональному росту интегральных характеристик - максимальной температуры имитаторов и времени наступления ПС.

- снятие "дырчатой" плиты и отключение от электропитания от 3 до 9-ти стержней не приводит к заметным изменениям интегральных характеристик.

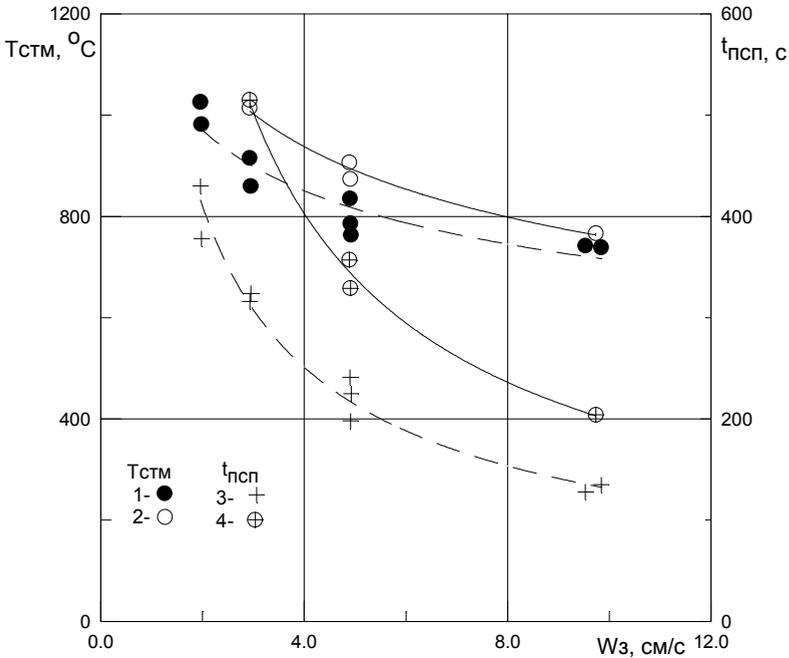


Рис. 5. Зависимость максимальной температуры имитатора (МТИ) и времени наступления повторного смачивания пучка (НПС) от скорости залива для КВ-37-1 (залив снизу): $P=276$ кПа, $T_{вх}=50^{\circ}\text{C}$: 1, 3 - $q_{\lambda c}=1.8$ кВт/м; 2, 4 - $q_{\lambda c}=2.5$ кВт/м.

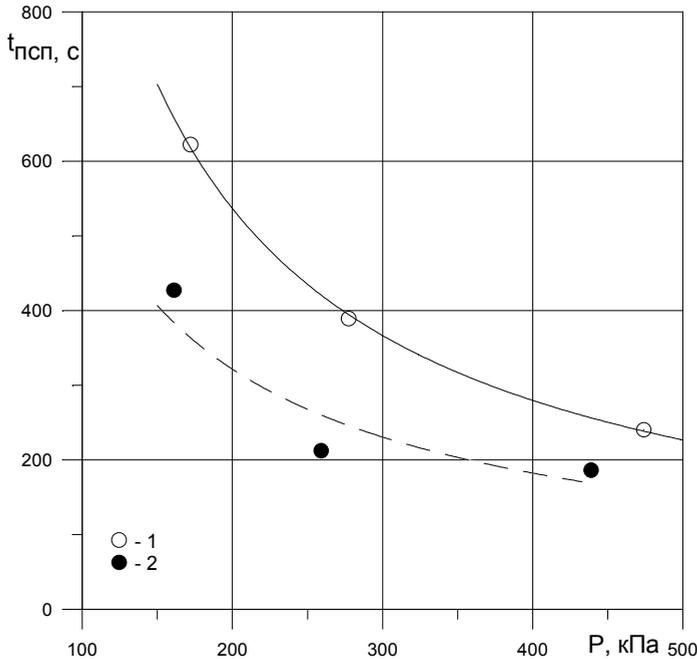


Рис. 6. Зависимость времени НПС пучка КВ-37-1 от давления (залив снизу), $Wз=5$ см/с, $\Delta T_{нед}=44^{\circ}\text{C}$: 1 - $q_{\lambda c}=2.6$ кВт/м; 2 - $q_{\lambda c}=1.8$ кВт/м

Для количественной оценки влияния режимных параметров, стартовых мощности и температуры оболочки имитатора на продолжительность процесса повторного смачивания пучка ($t_{\text{псп}}$) разработана эмпирическая зависимость:

$$t_{\text{псп}} = (36,56 + 0,0418 \frac{v''}{v'}) \cdot \left(\frac{Q_0 + \sum Q}{r + \Delta i_H} \right)^{0,78} / \left(\frac{\rho \omega \cdot F_n}{n_{\text{ст}}} \right)^{0,374} \quad (1)$$

где Q_0 - количество тепла, накопленное в обогреваемом стержне, на момент начала залива ($t=t_c$); $\sum Q$ - количество тепла, выделенное в обогреваемом стержне до момента завершения повторного смачивания ($t= t_{\text{псп}}$); $\frac{\rho \omega \cdot F_n}{n_{\text{ст}}}$ - расход, приходящийся на один обогреваемый стержень (кг/с); $n_{\text{ст}}$ - количество обогреваемых стержней в пучке.

Отклонения экспериментальных данных от рассчитанных не превышают 10% (рис.7). С тем же отклонением описываются и данные для 7-стержневой модели ТВС, т.е. увеличение количества стержней с 7 до 37 не сказалось на интегральных характеристиках.

Показания поточных и стержневых термодпар в пределах одной ячейки в зоне расположения дистанционирующей решетки фиксируют понижение температур стенки имитаторов с уровня 800-850°C, замеренного в сечениях перед и далеко за решеткой, до 700-750°C и наступление повторного смачивания со сбросом температуры с уровня 450-550°C до температуры насыщения под решеткой и в 20 мм за ней. В последнем случае образуется локальный фронт смачивания, который остается на месте, пока не подойдет основной фронт. Это явно указывает на влияние дистанционирующих решеток на температурные режимы имитаторов, как кон-

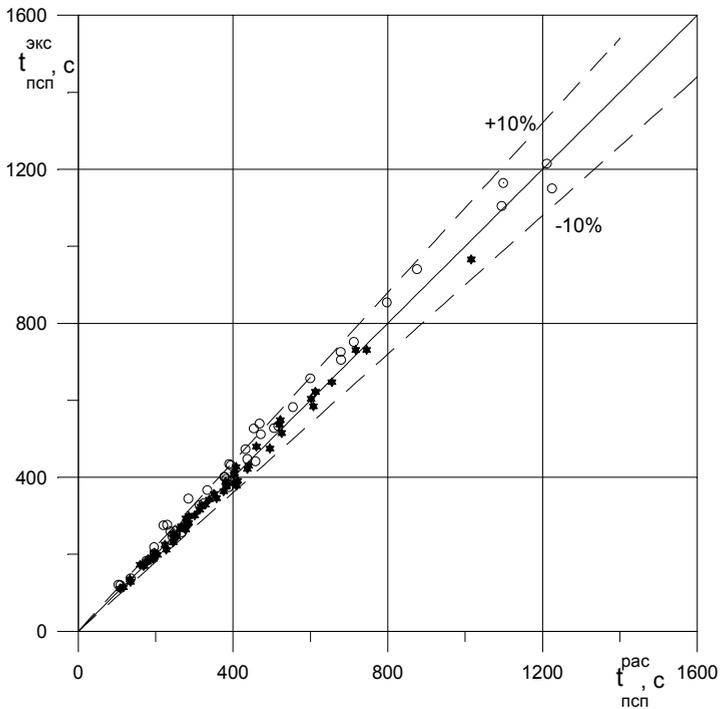


Рис. 7. Сравнение времени НПС для КВ-37-1 и КВ-7 с расчетом по зависимости (1) (залив снизу): о- КВ-7; • - КВ-37-1, КВ-37-3, Р=150-580 кПа, $W_3=1.43-14$ см/с, $q_{\text{лс}}=1.1-2.9$ кВт/м, $T_{\text{вх}}=48-134^\circ\text{C}$, $T_{\text{стс}}=400-800^\circ\text{C}$

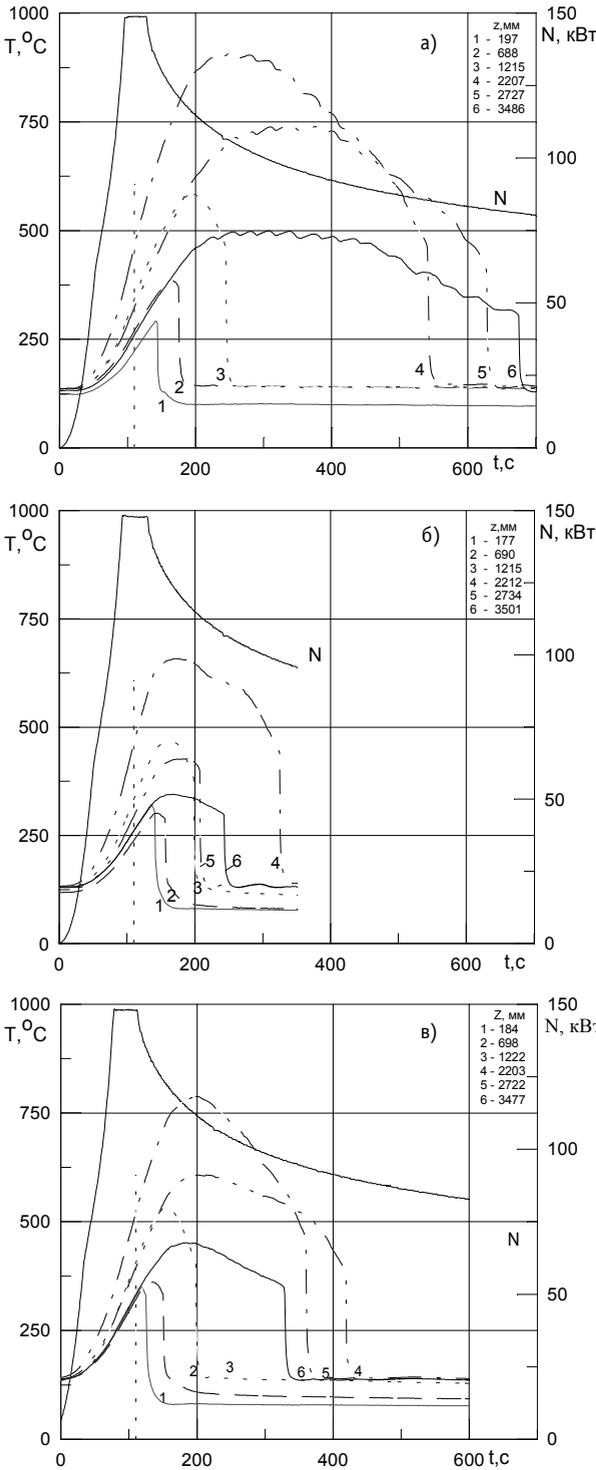


Рис. 8. Температура имитатора: $P=276\text{кПа}$; $T_{\text{СТС}}=600^\circ\text{C}$; $q_{\text{лс}}=1.8-1.9\text{кВт/ч}$: а) один фронт смачивания $W_3=1.98\text{см/с}$, $T_{\text{Вх}}=87^\circ\text{C}$; б) два фронта смачивания - сопутных $W_3=4.9\text{см/с}$, $T_{\text{Вх}}=51^\circ\text{C}$; в) два фронта смачивания - встречных $W_3=2.93\text{см/с}$, $T_{\text{Вх}}=51^\circ\text{C}$

центраторов влаги из потока и турбулизирующих элементов. Кроме того, показаниями поточных и стержневых термопар подтверждена возможность возникновения дополнительных фронтов смачивания в верхней части обогреваемой зоны. Это хорошо видно по времени захолаживания 4, 5, 6 термопар на рис. 8, когда наблюдается практически любая последовательность их охлаждения.

По второму варианту исследование проведено с подключением модели НКР короткой перемычкой относительно большого гидравлического сопротивления с расходомерной шайбой и вентилями на частях перемычки, примыкающих к моделям ТВС и НКР с подачей воды в центр перемычки. Горячая нитка от модели ТВС и холодная от верха модели НКР соединяются в компенсаторе-смесителе (КС), который при работе по данной схеме превращается в имитатор разрыва и герметичного объема.

Результаты опытов показали, что при открытии вентиля у НКР происходит снижение до 2 раз реального количества воды, поступающей в модель ТВС, за счет ухода воды в НКР и создания в нем уровня, а затем и слива ее в КС при достижении уровнем отметки «разрыва». В этом случае при «стартовых» тепловом потоке $1,8\text{кВт/м}$ и температуре стержней 700°C , максимальная температура возросла до 944°C , а время наступления смачивания до 429с (рис. 9).

По третьему варианту, с длинной перемычкой между РК и НКР с малым сопротивлением и высотной отметкой ее нижней границы, близкой к натурной, охлаждающая вода подавалась сверху НКР с отметки, близкой к отмет-

ке подвода воды от СА03. Схема движения воды в РК стала безнапорной.

Результаты опытов показали, что, в условиях адекватных по режимным параметрам со вторым вариантом, в течение всего режима охлаждения уровень в модели НКР не выходит на предельное значение 46кПа. Расчет подачи воды в пучок по разнице уровней в РК и НКР дал среднее значение расхода большее, чем во втором варианте, что обеспечило меньшее время завершения повторного смачивания (307 с) и более низкую максимальную температуру (834°С) (рис. 9), т.е. во втором и третьем вариантах получилось некоторое подобие интегрального стэнда в пределах корпуса реактора, в котором, в отличие от первого, проявилась взаимозависимость реальных расходов через пучок от гидравлических сопротивлений по тракту от места подачи охлаждающей воды до места сброса пара в компенсатор-смеситель (рис. 10).

Исследования при заливе сверху и комбинированном заливе проведены на трех типах пучков с различной комплектацией модели ТВС и уровнями подачи воды охлаждения и отвода теплоносителя от модели в зависимости от поставленных задач и соответствующей организации контура охлаждения петли ПЗ-37.

Проведены две группы опытов:

- на модели ТВС (РК) с подачей воды верхнего залива и отводом пара через верхнюю камеру РК примерно с уровня середины опорной плиты реактора (600 -

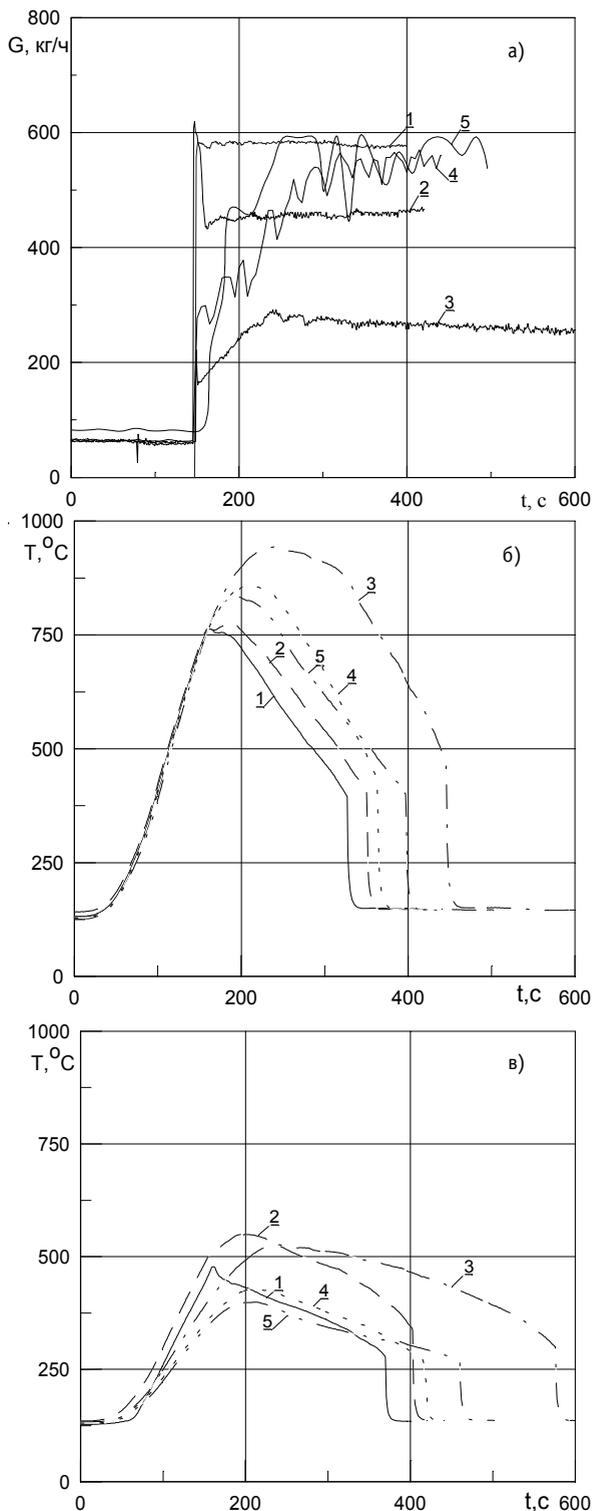


Рис. 9. Расход охлаждающей воды через пучок модели ТВС и температура стенки имитатора. $P=240-275$ кПа; $W_3=4,9-5,0$ см/с; $T_{стс}=698-735$ °С, $T_{вх}=51$ °С; $q_{лс}=1,72-1,8$ кВт/м; а) расход охлаждающей воды через пучок РК; б) температура имитатора с максимальной температурой; в) температура имитатора с максимальным временем НКР; 1- 4 модель НКР с ПК, открытие вентиля В-16: 1- 0°; 2- 45°; 3- 720°; 4- 720° без вент. А; 5 - модель НКР с ПД

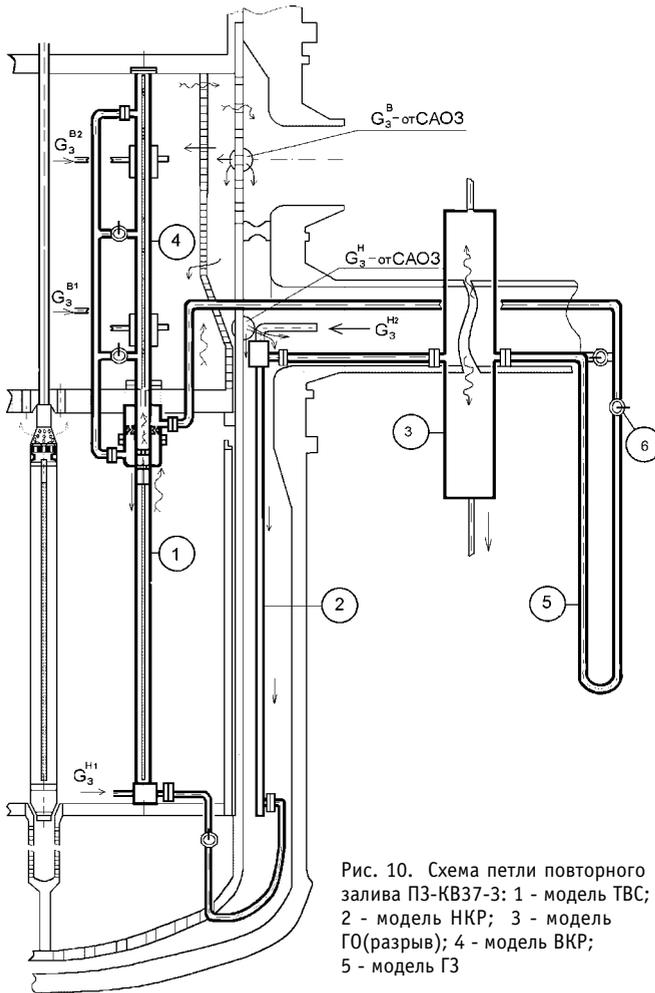


Рис. 10. Схема петли повторного залива ПЗ-КВ37-3: 1 - модель ТВС; 2 - модель НКР; 3 - модель ГО(разрыв); 4 - модель ВКР; 5 - модель ГЗ

650 мм выше окончания зоны обогрева) без подключения и с подключением к РК модели НКР длинной перемычкой малого сопротивления; с подачей воды нижнего залива через верх НКР;

- с подключением к РК полномасштабной по высоте модели ВКР и модели НКР длинной перемычкой малого сопротивления; с подводом воды нижнего залива с верха НКР на штатной высоте или непосредственно в нижнюю камеру РК; с подводом воды верхнего залива с 2 уровней, соответствующих расположению патрубков подачи воды нижнего и верхнего залива от системы CAO3. Отвод теплоносителя с 3 уровней: штатного и 2 промежуточных (рис.10).

Результаты опытов первой группы показали существенное различие условий охлаждения

стержней при заливе сверху по отношению к заливу снизу. Для адекватных значений "стартовых" параметров для залива сверху и снизу ($q_{\lambda c} = 1,8 \text{ кВт/м}$, $T_{\text{стс}} = 500^\circ\text{C}$) с расходами, соответствующими скорости 5 см/с, максимальная температура стенки имитатора твэла возросла с 630 до 920°C , а время наступления повторного смачивания от - 180 до 811 с (рис. 11(2)).

Увеличение скорости залива (при заливе сверху) вдвое (с 5,0 до 9,8 см/с) практически не изменило максимальные температуру стенки и время наступления повторного смачивания ($923 - 1012^\circ\text{C}$ и 811- 798с - соответственно) (рис. 11(3)), причем эти значения температур и времени соответствуют диапазону изменения скорости при заливе снизу от 1,0 до 1,5 см/с.

Поступление воды в нижнюю часть зоны обогрева моделей при подаче сверху происходит в виде пленки, стекающей по стенке относительно холодного корпуса. Периодически может происходить расхолаживание 2-4 горячих стержней, расположенных около корпуса, несколько увеличивая подачу воды. Стержни с уменьшенным или полностью отключенным тепловыделением, расположенные в центральной части пучка, расхолаживаются либо одновременно, либо немного ранее стержней с подводом тепловыделения и практически не участвуют в поступлении воды вниз (рис.12).

Таким образом, эффективность использования охлаждающей воды в экспериментах на петле ПЗ-37 при реализованном сценарии залива сверху существенно хуже, чем при заливе снизу.

После четырех опытов этой серии с заливом сверху, с превышением температуры стенки 1100°C было обнаружено разрушение оболочек имитаторов твэл в центральной части пучка и появление волнообразных изгибов стержней (стрела прогиба до 10 мм) и трещин оболочек, очевидно как следствие длительного (до 980 с) нахождения имитаторов в зоне температур выше 800°C.

Все последующие опыты выполнены с подключенной НКР и при более низких стартовых значениях $q_{\lambda c}=1,3 \text{ кВт/м}^2$, $T_{\text{стс}}=400^\circ\text{C}$, во избежание превышения максимальной температуры в 800°C, что обеспечило завершение всего цикла экспериментов без разрушения имитаторов.

При комбинированном заливе максимальная температура имитаторов и время наступления повторного смачивания заметно ниже, чем при заливе сверху, но выше по отношению к заливу снизу при одинаковых параметрах (рис. 13).

Так, например, в режимах с близкими значениями максимальных температур - 639 и 631 °C и временем наступления повторного смачивания - 297 и 272с соответственно для комбинированного залива и залива снизу, охлаждающая вода подавалась при комбинированном заливе - в верхнюю камеру с массовой скоростью 30 кг/м²с, в нижнюю - 20 кг/м²с, при зали-

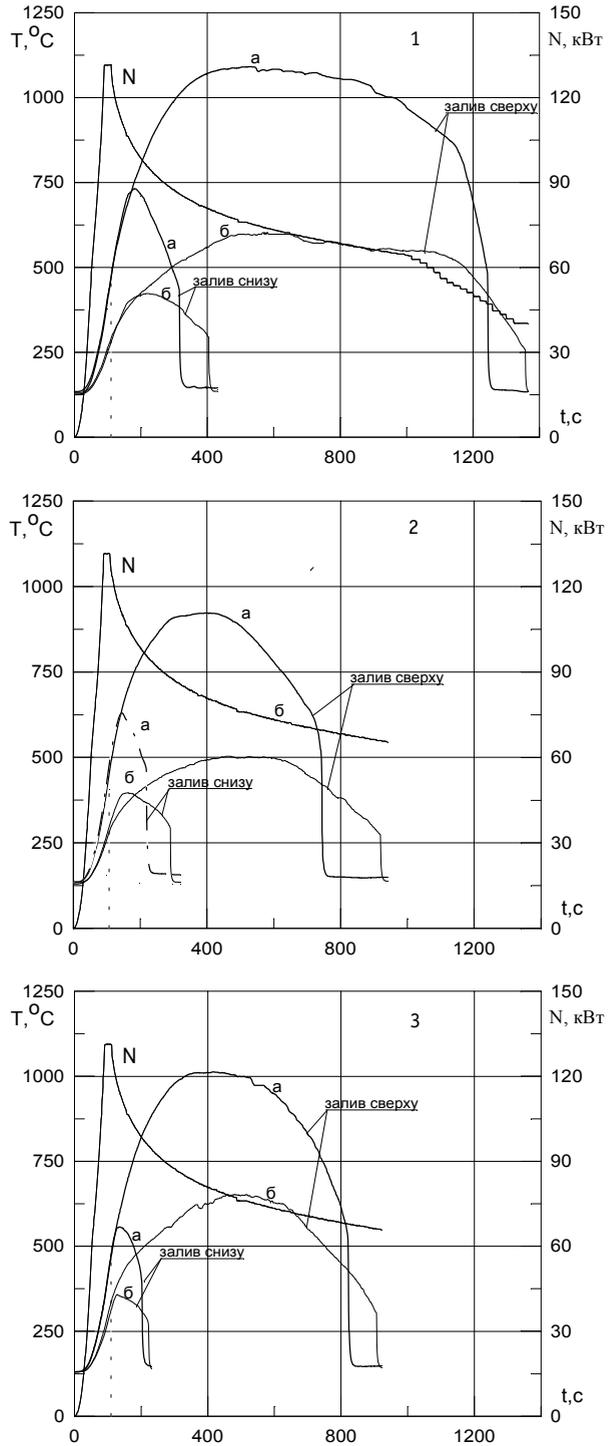


Рис.11. Температура стенки имитатора при заливе сверху и снизу: $P=293 \text{ кПа}$; $T_{\text{стс}}=500^\circ\text{C}$; $T_{\text{вх}}=51^\circ\text{C}$; $q_{\lambda c}=1,8 \text{ кВт/м}^2$; 1 - $W_3^a=2,9 \text{ см/с}$; 2 - $W_3^a=4,9 \text{ см/с}$; 3 - $W_3^a=9,8 \text{ см/с}$; а) имитатор с максимальной температурой; б) имитатор с максимальным временем наступления повторного смачивания

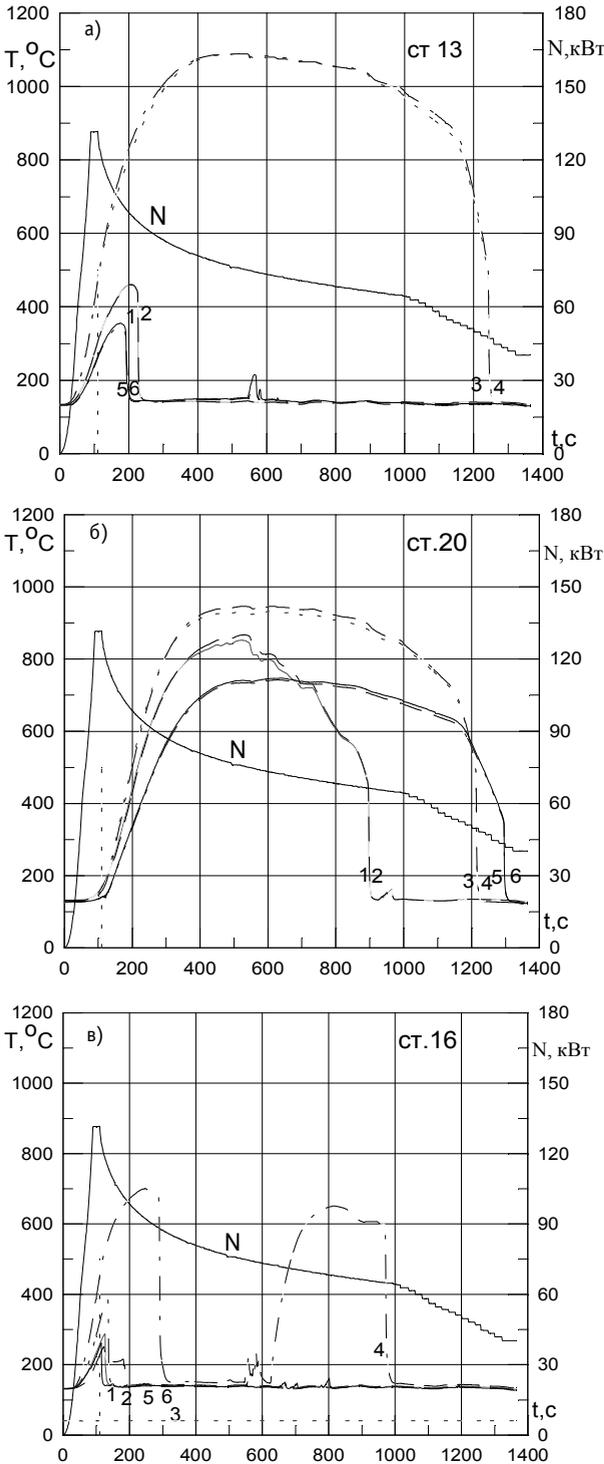


Рис. 12. Температура стенки имитаторов при заливе сверху $P=281$ кПа; $W_3=2,9$ см/с; $T_{ст}=500^\circ\text{C}$; $T_{вх}=51^\circ\text{C}$; $Q_{лс}=1,77$ кВт/м: а) имитатор с максимальной температурой; б) имитатор без теплоподвода в центре; в) имитатор с теплоподводом, угловой

ве снизу со средней массовой скоростью 30 кг/м²с. Практическое совпадение основных характеристик (температур и времени) показывает, что расход, эквивалентный скорости 20 кг/м²с ($\sim 40\%$), фактически не участвует в процессе охлаждения.

При заливе сверху и комбинированном заливе отключение 7 стержней на периферии или в центре пучка, приводит к снижению максимальной температуры примерно на 100°C , а времени наступления ПС на -60 с. Снятие "дырчатой" плиты не оказывает заметного влияния.

Вторая группа экспериментов с полномасштабной моделью верхней камеры реактора и подключенной моделью НКР с подачей воды залива и отводом пара на штатных высотах не подтвердила ожиданий о повышении эффективности залива сверху, связанного с возможным увеличением столба жидкости над зоной обогрева. Расположение места разрыва почти на 3 м ниже верхней точки выходного патрубка (верха модели ВКР) при движении теплоносителя создает пониженное давление вверху модели и вода как бы "высасывается" из ВКР в разрыв. Весовой уровень воды в ВКР (от конца зоны обогрева) никогда не превышал разности высотных отметок между концом активной зоны и нижней образующей входного патрубка (уровня разрыва), а суммарный весовой уровень в РК и ВКР уровня в напорном коллекторе. Так, режим залива сверху с адекватными параметрами из второй группы ($P=276$ кПа, $W_3=6$ см/с,

$q_{\lambda c}=1,3 \text{ кВт/м}$, $T_{ст}=400^\circ\text{C}$ и $T_{вх}=50^\circ\text{C}$) не удалось довести до конца, т.к. уже на 250 с пришлось сбрасывать мощность вручную с 80 до 10 кВт из-за превышения максимальной температурой стенки имитатора величины в $800\text{-}850^\circ\text{C}$. Аналогичная ситуация повторилась как при увеличении расхода воды залива ($W_3=11 \text{ см/с}$), так и уменьшении ($W_3=3 \text{ см/с}$). Сходные результаты по интегральным характеристикам в опытах без модели ВКР ($T_{стм}$ и $t_{псп}$) без превышения температуры имитаторов 850°C удалось получить только при снижении линейного теплового потока с 1,3 до $0,92 \text{ кВт/м}$. Следует отметить, что весовой уровень теплоносителя в РК в течение всего режима до начала резкого снижения мощности нарастал очень медленно, не превышая $2,0 \text{ кПа}$, что соответствовало подаче воды нижнего залива на уровне скорости залива $<1,0 \text{ см/с}$, т.е. меньше,

чем в варианте без полномасштабной ВКР (рис. 14).

Комбинированный залив по интегральным характеристикам, так же, как и в варианте без модели ВКР, показал промежуточные значения между верхним и нижним заливом с преобладающей ролью нижнего залива.

Характер относительного влияния режимных параметров, удаления "дырчатой" плиты, неравномерности тепловыделения по сечению с отключением имитаторов от электропитания не зависимо от их расположения, практически не изменился по сравнению с результатами первой группы опытов. Снижение максимальной температуры и времени наступления повторного смачивания при отключении стержней составило, соответственно, 0-20 и 20-40%, для комбинированного залива и залива сверху.

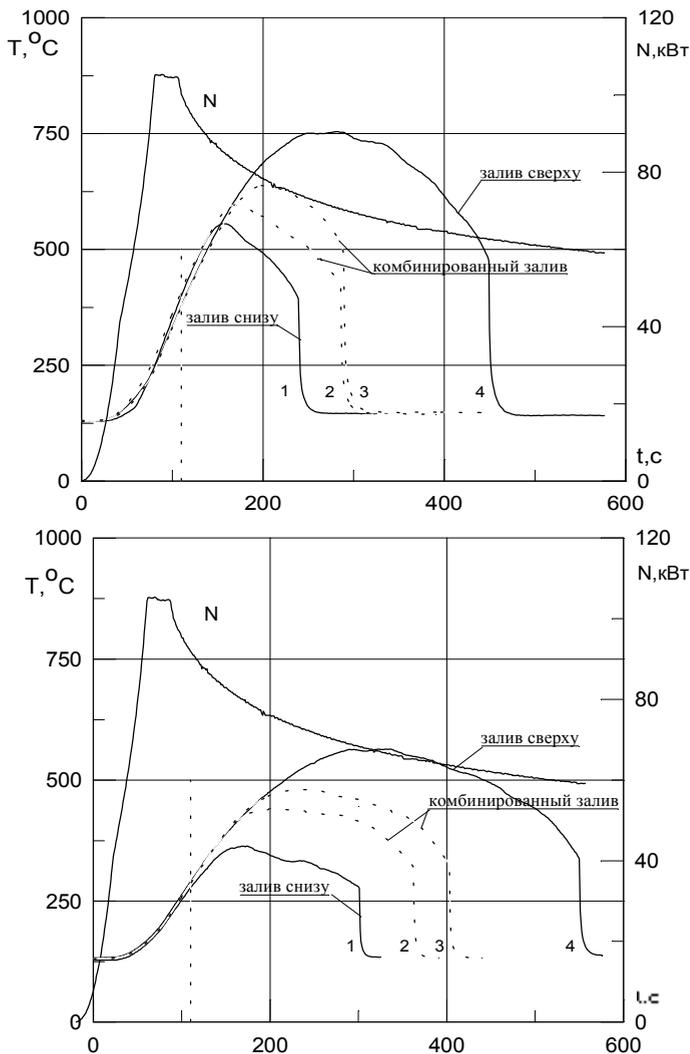


Рис. 13. Температура стенки имитаторов (КВЗ 7-3): $P=274 \text{ кПа}$; $T_{вх}=50^\circ\text{C}$; $q_{\lambda c}=1,3 \text{ кВт/м}$; $T_{стс}=400^\circ\text{C}$; W_3^0/W_3^* : 1- 0/5; 2 - 2/3; 3 - 3/2; 4 - 5/0 см/с: а) имитатор с максимальной температурой; б) имитатор с максимальным временем наступления повторного смачивания

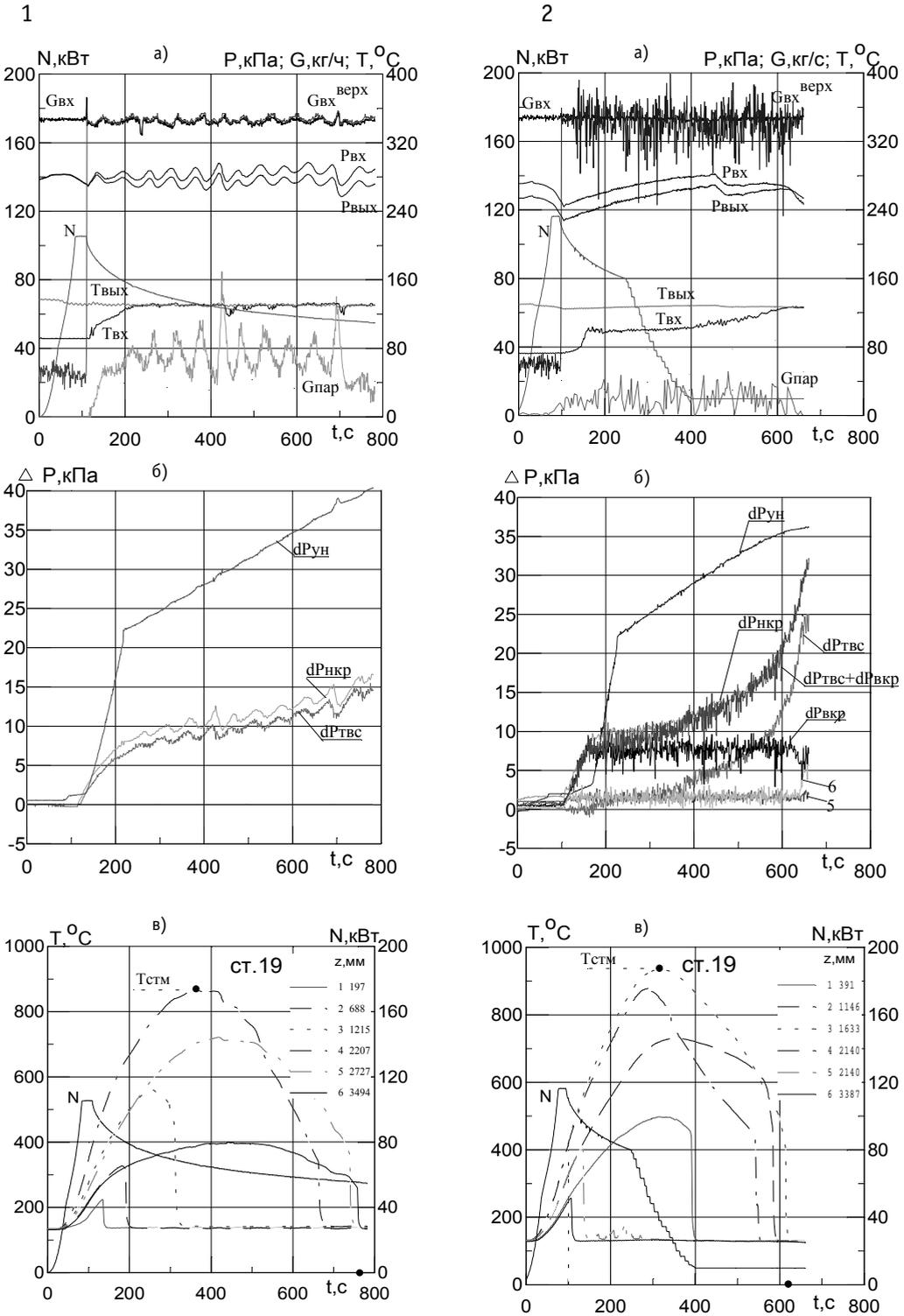


Рис. 14 Влияние установки полномасштабной верхней камеры на интегральные характеристики: 1 - залив сверху без ВКР (опыт132); 2 - залив сверху с ВКР (опыт214); а) режимные параметры: $N=105-113$ кВт (1,3кВт/м); $G_{вх}=345-349$ кг/ч (2,9см/с); $P=274-268$ кПа; $T_{вх}=50-52^{\circ}C$; $T_{стс}=400^{\circ}C$; б) перепад давления (уровни), кПа; в) температуры имитаторов $^{\circ}C$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен цикл исследований повторного залива на полномасштабных по высоте моделях, начиная с 7-стержневой, в пределах высоты ТВС, кончая 37-стержневой, интегральной в пределах высоты реактора, с моделированием всех основных элементов от входного до выходного патрубков реактора. Используются имитаторы твэлов косвенного нагрева без газового зазора.

2. Получено, что для стадии повторного залива (охлаждения) с непревышением максимальной температуры имитаторов (850-900°C) и максимальных подачах воды, соответствующих возможным расходам от системы САОЗ (900 м³/ч от ННН и ВНН, что эквивалентно скорости залива в 5,5 см/с), имеет место различная "эффективность" схем залива: снизу, комбинированного, сверху. Если при заливе снизу соответствующий "стартовый" максимальный тепловой поток (2,7 кВт/м) отвечает остаточному тепловыделению начала стадии повторного залива (по версии ОКБ ГП) примерно на 20-30 с от срабатывания аварийной защиты (при $T_{стс}=700^{\circ}\text{C}$), то комбинированный залив ($q_{лс}=1,3\text{ кВт/м}$) может обеспечить повторное охлаждение с 900 с, а залив сверху при $q_{лс}=0,92\text{ кВт/м}$ только с 3000 с.

3. Несмотря на существование, кроме основного фронта смачивания, движущегося снизу, дополнительного фронта, опускающегося сверху, и локальных, возникающих под дистанционирующими решетками в верхней части зоны обогрева, при всех схемах залива основным процессом охлаждения остается теплоотдача к воде и пароводяной смеси, поступающей снизу вместе с продвижением нижнего фронта смачивания.

4. По нашим оценкам, процессами, ответственными за блокировку поступления в зону обогрева воды залива сверху, являются процессы барботаж в местах сужения для прохода теплоносителя (дистанционирующие решетки, решетка-токоподвод, "дырчатая" плита, опорная плита ТВС) и "захлебывание" с дроблением струй и капель и их уносом при встречном движении пара и воды. В первом случае рассчитанные по экспериментальным данным скорости пара равны или превышают критические скорости, после которых происходит отжатие воды от сужения, во втором - превышают критические скорости для "захлебывания".

Список литературы

1. Елкин И.В. и др. Развитие матриц верификации теплогидравлических кодов для водо-водяных реакторов: Обзор. - М.: РНЦ-КИ, 1995.
2. Ефанов А.Д. и др. Обоснование и разработка программы работ по совершенствованию тепловыделяющих сборок водо-водяных реакторов / Теплогидравлика-94. Теплофизические аспекты безопасности АЭС с водоохлаждаемыми реакторами. - Обнинск: ФЭИ, 1995. - С. 5.
3. Lozhkin V.V, Kolmakov A. P., Kulikov B. I., Sudnitsyn O. A. Reflooding Tests on WWER Fuel Subassembly Models / NURETH-8, Kyoto, Japan, 1997. - V. 3. - P. 1440.
4. Ложкин В.В. и др. Эксперименты по повторному заливу на модели ТВС реактора ВВЭР // Избранные труды ФЭИ. - Обнинск, 1997. - С. 151.
5. Ложкин В.В., Судницын О.А., Куликов Б.И. Результаты экспериментального исследования по повторному охлаждению на моделях ТВС реактора ВВЭР при заливе снизу / Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР: Труды Международной конференции «Теплофизика-98». - Обнинск, 1998. - Т 1. - С. 389.
6. Ложкин В.В., Судницын О.А., Куликов Б.И. Результаты экспериментального исследования по повторному охлаждению на моделях ТВС реактора ВВЭР при заливе сверху и комбинированном заливе / Теплофизические аспекты безопасности ВВЭР: Труды Международной конференции «Теплофизика-98». - Обнинск, 1998. - С. 381.

Поступила в редакцию 23.11.99.

ТУРБУЛИЗИРУЮЩЕЕ ВЛИЯНИЕ ГЛАДКИХ КРУГОВЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ИНТЕНСИФИКАЦИЮ ТЕПЛООБМЕНА СИММЕТРИЧНОГО КОРИДОРНОГО ПУЧКА ТРУБ

А.А. Анисин, А.К. Анисин, В.Т. Буглаев

Брянский государственный технический университет, г. Брянск



Анализируется возможность интенсификации теплоотдачи поперечно обтекаемого симметричного коридорного пучка труб при использовании в схеме его компоновки гладких турбулизирующих стержней, последовательно размещенных в центрах трубных ячеек. Реализация представленной схемы компоновки трубчатых элементов в виде комбинированной поверхности пучка труб разных диаметров и его теплоаэродинамические характеристики, полученные экспериментальным путем, свидетельствуют о возможности практического применения предложенного подхода к повышению эффективности работы трубчатых теплообменных аппаратов и устройств.

Создание экономически выгодных и эффективных трубчатых теплообменных аппаратов связано с реализацией наиболее рациональных методов интенсификации теплоотдачи в каналах, образованных совокупностью многочисленных геометрических комбинаций трубчатых элементов с разнообразными формой и состоянием поверхности [1].

Особого внимания заслуживает проблема интенсификации конвективного теплообмена поперечно обтекаемых пучков гладких труб, широко используемых в аппаратах и устройствах промышленного и энергетического назначения, для которых по условиям эксплуатации неприемлемо развитие поверхности или применение пристенных и вставных интенсификаторов теплоотдачи. Эта проблема весьма актуальна при использовании газообразных теплоносителей с характерной для них пониженной интенсивностью процессов теплообмена.

Одним из возможных вариантов повышения эффективности гладкотрубных теплообменных аппаратов может быть применение комбинированной поверхности теплообмена в виде поперечно обтекаемого пучка труб разных наружных диаметров, большего d_1 и меньшего d_2 , с различными схемами их расположения [2]. Использование в обычных компоновках пучков труб одинакового диаметра d_1 дополнительно труб уменьшенного диаметра d_2 при сохранении минимально допустимых межтрубных расстояний позволяет увеличить компактность поверхности теплообмена и повысить искусственную турбулизацию потока теплоносителя

за счет влияния труб меньшего диаметра d_2 как на область ламинарного пограничного слоя в лобовой части труб с d_1 , так и на застойную зону в кормовой области, обеспечивая при этом увеличение коэффициента теплоотдачи комбинированной поверхности.

Важной составной частью исследования возможности реализации такого подхода к повышению эффективности теплообмена является анализ турбулизирующего влияния труб меньшего диаметра d_2 на интенсивность теплоотдачи и величину гидродинамического сопротивления комбинированной трубчатой поверхности с определенной схемой расположения ее элементов.

За основу экспериментальной поверхности была принята квадратная схема расположения труб, отвечающая одновременно технико-экономическому и энергетическому оптимуму при использовании ее в коридорных пучках [3]. Поэтому с целью изучения турбулизирующего воздействия труб меньшего диаметра d_2 на процесс интенсификации теплоотдачи в каналах симметричного коридорного пучка и, следовательно, определения степени влияния на теплоаэродинамические характеристики поверхности величины наружного диаметра d_2 в виде геометрического параметра d_2/d_1 в функциональных зависимостях $Nu=f(Re, d_2/d_1)$ и $Eu=f'(Re, d_2/d_1)$ были проведены варианты испытания базового коридорного пучка $1,45 \times 1,45$ с размещенными в нем на пересечении диагоналей квадратов разбивки труб с $d_1 = 11$ мм круговыми гладкими цилиндрическими стержнями с наружным диаметром $d_2 = 1,2; 1,6; 2,0; 3,0$ и $4,5$ мм, имитирующими трубы меньшего диаметра в пучках из комбинированной теплопередающей трубчатой поверхности с $d_2/d_1 = \text{var}$.

Конструктивные параметры трубчатой поверхности базового теплообменника определялись условиями геометрического подобия и возможностью обеспечения рабочего интервала изменения чисел Рейнольдса $Re = (0,4 \dots 32) 10^3$ при использовании латунных труб 11×1 НД Л63 ГОСТ 494-90 в пучке $1,45 \times 1,45$, являющемся промежуточным между компактными и свободными коридорными пучками. Максимальное значение величины наружного диаметра стержней, составляющее $d_2 = 4,5$ мм, было определено возможностью их установки в ячейках базового симметричного коридорного пучка с размером межтрубных расстояний $(s-d_1) = 5$ мм.

Для оценки влияния на теплоаэродинамические характеристики базовой поверхности положения в ячейке турбулизирующего цилиндрического элемента были проведены испытания коридорного пучка с продольно смещенными от точки пересечения диагоналей квадратной ячейки стержнями с $d_2 = 4,5$ мм в одном варианте вверх и в другом - вниз по потоку на величину $\Delta = 2,6$ мм с последовательной схемой их размещения в пучке (рис.1 б, в; табл. 1, п. 8,9).

Опытные варианты поверхности представляли собой комбинации поперечно обтекаемого вертикального «бесконечного» коридорного пучка длиной $L = 187$ мм с числом поперечных рядов труб с $d_1 = 11$ мм по ходу потока $z_2 = 12$ с соответствующими схемам размещения турбулизирующими стержнями определенного диаметра d_2 (табл.1). Трубный пучок размещался в прямоугольном канале высотой $H = 100$ мм и шириной $B = 48$ мм. Боковые стенки и торцевые поверхности со стороны металлических трубных досок были выполнены из текстолита. Части трубок, выходящие за вертикальные плоскости воздушного канала, врезались в боковые стенки теплообменника, и в теплоотдающую поверхность включалась расчетная поверхность труб, омываемая потоком воздуха. При этом горячая вода проходила через все трубки пучка. Торцы металлических турбулизирующих стержней фиксировались между гладкими текстолитовыми внутренними поверхностями канала теплообменника, съемные боковые стенки которого позволяли осуществлять установ-

Геометрические характеристики экспериментальной поверхности с различными вариантами последовательного размещения цилиндрических турбулизирующих элементов в трубных ячейках пучка 1,45x1,45

№ опытного теплообменника	Схема размещения элементов поверхности	Величина наружного диаметра турбулизирующих элементов d_2 , мм	Относительная величина d_2/d_1	Минимальное расстояние между элементами поверхности δ_{\min} , мм	Условный коэффициент компактности поверхности f , $\text{м}^2/\text{м}^3$
1	Рис.1 д	--	--	5,0	135
2		1,2	0,109	5,0	149,7
3		1,6	0,145	5,0	154,6
4	Рис.1 а	2,0	0,181	4,81	159,5
5		3,0	0,272	4,31	171,8
6		4,5	0,409	3,56	190,2
7	Рис.1 е	6,0	0,545	2,81	208,6
8	Рис.1 б	4,5	0,409	1,9	190,2
9	Рис.1 в	4,5	0,409	1,9	190,2

ку стержней с различной величиной наружного диаметра $d_2=1,2...4,5$ мм в трубных ячейках пучка.

Наряду с этим был также испытан вариант комбинированной теплоотдающей поверхности в виде пучка труб разных диаметров $d_1=11$ мм и $d_2=6$ мм со схемой симметричного последовательного размещения труб меньшего диаметра d_2 в квадратных ячейках труб с $d_1=11$ мм и величиной параметра $d_2/d_1=0,545$ (рис.1 а, е; табл.1, п.7).

Геометрические характеристики опытных вариантов комбинированной поверхности теплообмена и схема расположения ее элементов представлены на рис.1 и в табл.1. Как следует из рис.1, с увеличением диаметра турбулизирующих стержней коридорная схема расположения труб с $d_1=11$ мм ($S_1 = S_2 = 16$ мм) трансформируется в шахматную схему расположения трубчатых элементов комбинированной поверхности с относительными характеристиками $S_1/S_2=16/8=2$ и $d_2/d_1=var$.

Особенности методики проведения экспериментального исследования поперечно обтекаемых пучков труб в потоке воздуха и описание опытной установки (аэродинамическая труба разомкнутого типа) представлены в [4] и соответствуют общепринятому методу полного теплового моделирования.

Результаты исследования теплоаэродинамических характеристик опытных вариантов поверхности симметричного коридорного пучка с размещенными в его ячейках турбулизирующими стержнями различных диаметров ($d_2/d_1=var$) и пучка труб разных диаметров ($d_2/d_1=6/11$) были представлены в виде функциональных зависимостей $Nu = f(Re, d_2/d_1)$ и $Eu = f'(Re, d_2/d_1)$ и критериальных уравнений

теплоотдачи $Nu = aRe^n$ и сопротивления $Eu = bRe^{-m}$. В качестве определяющих параметров при обработке опытных данных принимались средние значения температуры потока воздуха t_f , его скорости в свободном сечении гладкого канала теплообменника w , величины наружного диаметра труб d_1 . Температура стенки латунных труб контролировалась медь-константановыми термopарами и соответствовала средней температуре горячей воды в трубах пучка; при этом обеспечивалось течение процесса теплоотдачи близко к условию $t_w(x)=const$.

На рис.2 приведены опытные данные по средней теплоотдаче и аэродинамическому сопротивлению испытанных вариантов поверхности коридорного пучка 1,45x1,45 и комбинированной поверхности в виде зависимостей $Nu=f(Re)$ и $Eu=f(Re)$, в табл.2 - в виде коэффициентов a и b и показателей степени n и m в критериальных уравнениях теплоотдачи $Nu=aRe^n$ и сопротивления $Eu=bRe^{-m}$.

Здесь $Nu = \alpha d_1 / \lambda$, $Eu = \Delta p / \rho w^2$, $Re = wd_1 / \nu$.

Результаты испытаний базового коридорного пучка 1,45x1,45, представленные совместно с данными других опытных вариантов комбинаций поверхности на рис.2 и в табл.2 (п.1), достаточно удовлетворительно согласуются с результатами литературных источников и величинами теплоотдачи и сопротивления, полученными в соответствии с нормативными методами расчета котельных установок [4-5].

На рис. 2 видно, что величина средней теплоотдачи и аэродинамическое сопротивление опытных вариантов базовой поверхности с турбулизирующими стержнями различных диаметров, последовательно размещенными в центрах квадратных ячеек коридорного пучка, повышаются с увеличением диаметра стержней d_2 (параметра d_2/d_1) и во всем исследованном диапазоне изменения чисел Re превосходят теплоотдачу и сопротивление симметричного коридорного пучка 1,45x1,45.

Динамика изменения теплоаэродинамических характеристик исследованных комбинаций поверхности теплообмена со стержнями показана на рис.2 в виде зависимостей относительных величин теплоотдачи $Nu_i / Nu_{к.п}$ и сопротивления $Eu_{Li} / Eu_{Lк.п}$ от параметра d_2/d_1 . Из рис.2 следует, что в области небольших чисел Рейнольдса ($Re=1.2 \cdot 10^3$), характерных для преобладающего ламинарного режима

Таблица 2

Коэффициенты и показатели степени критериальных уравнений теплоотдачи и сопротивления опытной поверхности с различными вариантами последовательного размещения цилиндрических турбулизирующих элементов в трубных ячейках

№ опытного теплообменника	Теплоотдача		Сопротивление		Диапазон изменения чисел Рейнольдса $Re_1 \dots Re_{кр}, Re_{кр} \dots Re_2$
	a	n	b	m	
1	0,324	0,65	— 38,68	— 0,1	400 ... 1500 1500 ... 10^4
2	0,349	0,65	64,416 119,398	0,11 0,19	400 ... 2239 2239 ... 10^4
3	0,382	0,65	76,032 139,845	0,12 0,2	400 ... 2038 2038 ... 10^4
4	0,390	0,65	86,198 157,7	0,13 0,21	400 ... 1902 1902 ... 10^4
5	0,408	0,65	110,917 200,793	0,15 0,23	400 ... 1666 1666 ... 10^4
6	0,621	0,6	156,53 251,19	0,185 0,25	400 ... 1445 1445 ... 10^4
7	0,668	0,6	244,9 350,75	0,22 0,27	400 ... 1318 1318 ... 10^4
8	0,645	0,6	256,743 335,931	0,215 0,25	400 ... 2166 2166 ... 10^4
9	0,621	0,6	244,062 312,608	0,215 0,25	400 ... 1178 1178 ... 10^4

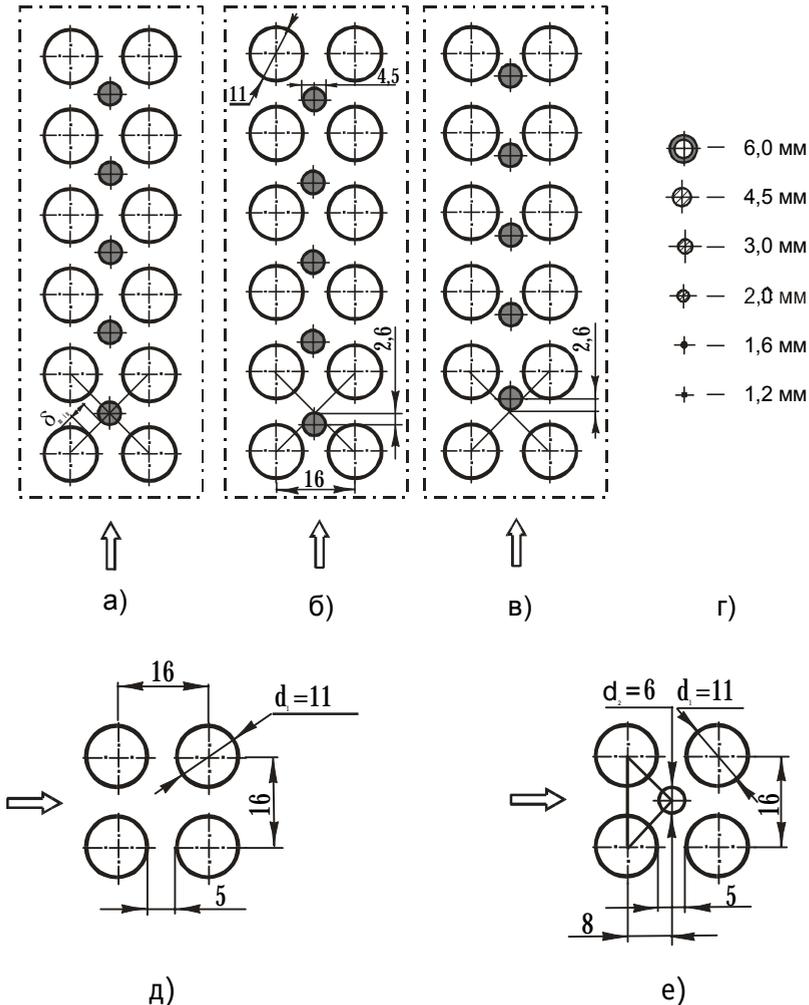


Рис.1. Геометрия различных схем последовательного размещения турбулизирующих элементов в ячейках коридорного пучка 1,45x1,45: а - на пересечении диагоналей; б - с продольным смещением вверх по потоку от центра; в - с продольным смещением от центра вниз по потоку; г - форма сечения и величина наружного диаметра d_2 турбулизирующих элементов; д - трубная ячейка коридорного пучка 1,45x1,45; е - трубная ячейка комбинированного пучка

обтекания, наблюдается значительное повышение теплоотдачи и, особенно, сопротивления при увеличении значений параметра d_2/d_1 от 0,109 до 0,409, обусловленное активным турбулизирующим воздействием на поток теплоносителя гладких цилиндрических стержней. В области чисел Рейнольдса, соответствующих смешанному режиму обтекания ($Re=10^4$), рост интенсивности теплоотдачи остается прежним для вариантов поверхности с соответствующей величиной изменения параметра $d_2/d_1=0,109...0,272$; для поверхности с $d_2/d_1=0,409$ ($d_2=4,5$ мм) повышение интенсивности теплоотдачи $Nu_i/Nu_{к.п}$ существенно снижается, как и относительное увеличение сопротивления $Eu_{Li}/Eu_{Lк.п}$ для всех опытных комбинаций с $d_2/d_1=0,109...0,409$, которое в данной области чисел Re тоже заметно сокращается по сравнению с зоной преобладающего ламинарного обтекания. Так, для поверхности со стержнями диаметром $d_2=4,5$ мм: $Nu/Nu_{к.п}=1,345$ и $Eu_L/Eu_{Lк.п}=2,215$ при $Re=1.2 \cdot 10^3$; $Nu/Nu_{к.п}=1,209$ и $Eu/Eu_{Lк.п}=1,63$ при $Re=10^4$.

Из представленных также на рис.2 и в табл.2 результатов исследования тепло-

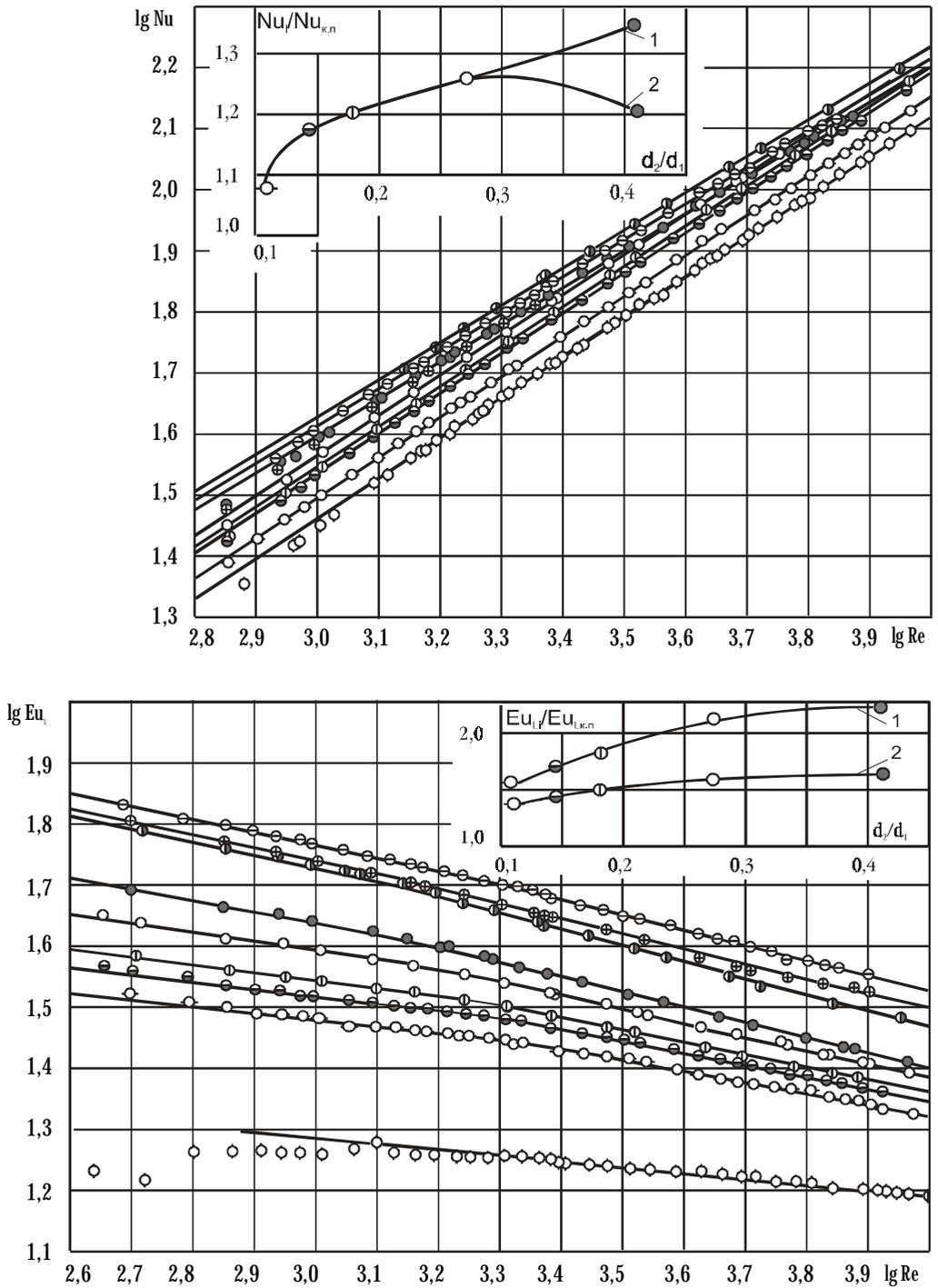


Рис.2. Экспериментальные данные по теплоотдаче ($Nu=f(Re)$) и сопротивлению ($Eu_L=f''(Re)$) исследованных вариантов поверхности теплообмена 1...9 (табл.1,2): \circ - 1; \odot - 2; \ominus - 3; Φ - 4; \circ - 5; \bullet - 6; \oplus - 7; \ominus - 8; \oplus - 9; $Nu_i/Nu_{k,n}=f(d_2/d_1)$: 1 - $Re=1,2 \cdot 10^3$; 2 - $Re=10^4$; $Eu_{L,i}/Eu_{L,k,n}=f''(d_2/d_1)$: 1 - $Re=1,2 \cdot 10^3$; 2 - $Re=10^4$

отдачи и аэродинамического сопротивления вариантов поверхности с продольно смещенными от центра трубных ячеек вверх и вниз по потоку турбулизирующими стержнями диаметром $d_2=4,5$ мм (рис.1б, в; табл.1,2, п. 8, 9) видно существенное увеличение сопротивления указанных вариантов поверхности по сравнению с вариантом центрального расположения стержней в ячейках базового пучка. Так, при смещении стержней вверх по потоку (рис.1б) относительное увеличение сопротивления поверхности в области изменения чисел $Re > Re_{кр}$ равно $Eu_{L\text{ см.вв}}/Eu_{L\text{ центр}}=1,33$ ($Re_{кр}=2166$; табл.2, п. 8). В этом случае значения величин сопротивления каждого из вариантов поверхности со смещением стержней вверх и вниз по потоку различаются незначительно: $Eu_{L\text{ см.вв}}/Eu_{L\text{ центр}} \approx 1,07$. Небольшое отличие в величинах сопротивления, по-нашему мнению, связано с разными условиями входа потока в пучок и его дальнейшим структурным характером. Особенностью поверхности со смещенными вверх по потоку стержнями является то обстоятельство, что поток соударяется с трубами первого ряда большего диаметра d_1 в лобовой критической точке и в межтрубном пространстве, в области минимального фронтального проходного сечения, скорость увеличивается. При этом вместо обычного замедления и отрыва поток вторично соударяется со стержнями меньшего диаметра d_2 в лобовой точке и процесс ускорения, сопровождающийся уменьшением пульсации скорости, продолжается до минимального диагонального сечения между трубой и стержнем. В существующем межтрубном пространстве недостаточно места для завихрений и активного перемешивания потока, что ослабляет генерирование турбулентности первыми рядами и, вместе с тем, в результате большого сжатия и ускорения потока увеличивается сопротивление. Это обстоятельство обуславливает затягивание перехода по сопротивлению к смешанному режиму обтекания, и критическое число Рейнольдса $Re_{кр}=2166$, соответствующее границе перехода для этого варианта поверхности, больше числа $Re_{кр}=1445$, соответствующего варианту поверхности с центральным расположением стержней данного диаметра и значения $Re_{кр}=1178$ - для варианта поверхности с продольно смещенными стержнями вниз по потоку (табл.2, п.6, 8, 9). При указанной схеме размещения турбулизирующих стержней (рис.1б) обнаруживается улучшение условий обтекания лобовой части труб большего диаметра $d_1=11$ мм второго и последующих рядов базовой поверхности пучка по сравнению с центральной схемой размещения стержней, что положительно отражается на величине средней теплоотдачи поверхности со стержнями, смещенными вверх по потоку: $Nu_{\text{см.вв}}/Nu_{\text{центр}} \approx 1,04$.

Для варианта поверхности со стержнями, смещенными вниз по потоку (рис.1в), представляющего собой предыдущий пучок (рис.1б) с противоположным входом потока, условия положительного развития процесса турбулизации потока и активизации течения в рециркуляционной зоне менее благоприятны, чем для рассмотренного выше варианта поверхности: максимальная скорость в диагональном сечении воздействует на незначительную часть труб с $d_1=11$ мм, а турбулентность, генерируемая первым рядом, гасится в результате последовательного сжатия потока в узком диагональном и фронтальном проходных сечениях. При этом условия входа потока в пучок более благоприятные, чем в предыдущем варианте поверхности. Величина теплоотдачи поверхности со стержнями, смещенными вниз по потоку, практически совпадает с теплоотдачей поверхности с центральным расположением стержней в ячейке. По сравнению с базовой поверхностью коридорного пучка теплоаэродинамические характеристики опытных вариантов поверхности со смещенными от центра ячейки стержнями диаметром $d_2=4,5$ мм имеют следующие значения: $Nu_{\text{см.вв}}/Nu_{\text{к.п}}=1.397$ и $Eu_{\text{Л.см.вв}}/Eu_{\text{Л.к.п}}=2,937$ при $Re=1.2 \cdot 10^3$;

$Nu_{см.бв}/Nu_{к.п}=1.256$ и $Eu_{лсм.бв}/Eu_{лк.п}=2,18$ при $Re=10^4$; $Nu_{см.бв}/Nu_{к.п}=1.345$ и $Eu_{лсм.бв}/Eu_{лк.п}=2,79$ при $Re=1.2 \cdot 10^3$; $Nu_{см.бв}/Nu_{к.п}=1.209$ и $Eu_{лсм.бв}/Eu_{лк.п}=2,03$ при $Re=10^4$.

Полученные опытные данные по теплоотдаче и сопротивлению комбинированной поверхности пучка труб разных диаметров с величиной параметра $d_2/d_1=0,545$, приведенные на рис. 2 и в табл. 2 (п.7), значительно выше величин средней теплоотдачи и аэродинамического сопротивления базового варианта поверхности симметричного коридорного пучка. Как следует из табл.2, относительные величины теплоотдачи и сопротивления для характерных режимов обтекания имеют следующие значения: $Nu_{комб}/Nu_{к.п}=1.446$ и $Eu_{лкомб}/Eu_{лк.п}=2,7$ при $Re=1.2 \cdot 10^3$; $Nu_{комб}/Nu_{к.п}=1.3$ и $Eu_{лкомб}/Eu_{лк.п}=1,895$ при $Re=10^4$.

Из представленной на рис.1 схемы геометрии опытных вариантов поверхности теплообмена со стержнями различных диаметров следует, что до определенной величины наружного диаметра стержней d_2 поток не претерпевает сколь угодно значительных изменений, связанных с гидродинамическими условиями обтекания теплоотдающей поверхности труб диаметром d_1 и сохраняет особенности течения, характерные для коридорной схемы расположения элементов поверхности, проходя между рядами труб с d_1 и цилиндрических стержней с d_2 . Функциональные зависимости по теплоотдаче опытных вариантов поверхности $Nu=f(Re, d_2/d_1)$, представленные на рис.2, при изменении параметра $d_2/d_1=0,109...0,272$ ($d_2=1,2...3,0$ мм) сохраняют характерный для коридорных пучков показатель степени $n=0,65$ при числе Рейнольдса. С последовательным увеличением d_2 коридорная компоновка трубчатых элементов более полно трансформируется в своеобразную шахматную с треугольником разбивки труб разных диаметров d_1 и d_2 (рис. 1е) и траектория движения потока в межтрубных зазорах вместо прямолинейного приобретает зигзагообразный вид, характерный для шахматной схемы расположения элементов поверхности, изменяя структуру течения в рециркуляционной зоне межтрубного пространства базового коридорного пучка с d_1 . При этом граница циркуляционной зоны искривляется вследствие влияния соседних стержней. Изменение геометрии поверхности создает более благоприятные гидродинамические условия обтекания потоком трубчатых элементов и, обеспечивая эволюцию процесса теплообмена, качественно изменяет характеристики теплоотдающей поверхности. Связь между условиями обтекания и теплоаэродинамическими характеристиками поверхности выражается значениями постоянных величин a и b и показателями степени n и m в полученных критериальных уравнениях теплоотдачи и сопротивления. Из табл.2 следует, что значения показателей степени n и m в указанных уравнениях изменяются для различных вариантов комбинированной поверхности с соответствующими параметрами d_2/d_1 . Особенности влияния геометрического параметра d_2/d_1 на величину постоянной a и показателя

степени n в критериальном уравнении $Nu = a \cdot Re^n$ показаны на рис.3 и в интервале изменения $d_2/d_1 = 0,109...0,409$ связь между указанными величинами может быть представлена в виде интерполяционных полиномиальных зависимостей

$$a = -0,1593 + 9,2251 (d_2/d_1) - 55,716 (d_2/d_1)^2 + 139,82 (d_2/d_1)^3 - 115,74 (d_2/d_1)^4;$$

$$n = 0,65545 - 0,0838 (d_2/d_1) - 0,0019 (d_2/d_1)^2 + 3,2 (d_2/d_1)^3 - 8,57 (d_2/d_1)^4,$$

справедливых во всем исследованном диапазоне изменения чисел Рейнольдса

$6,3 \cdot 10^2 \leq Re \leq 10^4$. На рис.2 видно, что с увеличением диаметра турбулизирующих стержней от 1,2 до 6 мм, т. е. по мере перехода от коридорной компоновки труб к шахматной схеме расположения элементов комбинированной поверхности пучка

и увеличения теплоотдачи, показатель n изменяется от 0,65 при $d_2=1,2$ мм до значения 0,6 при $d_2=6$ мм, классического значения n для обычных шахматных пучков труб с одинаковым диаметром в зоне смешанного обтекания. В то же время для большинства обычных коридорных пучков значение показателя степени n при числе Re можно принять равным 0,63 или 0,65 [5], что экспериментально подтверждено для базового пучка 1,45x1,45.

Анализируя представленную на рис. 2 графическую интерпретацию экспериментальных данных по сопротивлению в виде функциональных зависимостей $Eu=f(Re, d_2/d_1)$ следует отметить, что гидравлическое сопротивление в отличие от теплоотдачи в гораздо большей мере реагирует на изменение геометрических характеристик пучков. Опытным вариантам комбинированной поверхности с относительными характеристиками $d_2/d_1=var$ (табл.2) соответствуют различные значения критических чисел Рейнольдса $Re_{кр}$, определяющих точки перелома зависимостей $Eu=f''(Re)$ и характеризующих границу перехода от преобладающего ламинарного обтекания, характерного для коридорных пучков труб при числах $Re < 10^4$, к смешанному. Зависимость сопротивления от числа Re для шахматных пучков имеет степенной характер для всего докритического режима обтекания, в отличие от коридорных, для которых область смешанного обтекания и степенной характер зависимости сопротивления от числа Re устанавливается в

интервале $10^4 < Re < 2 \cdot 10^5$. Экспериментальные зависимости сопротивления от числа Re ($Eu=f''(Re)$) для различных опытных вариантов поверхности носят степенной характер, что и определяет доминирующее проявление особенностей шахматной схемы расположения элементов комбинированной поверхности. С уменьшением диаметра турбулизирующих стержней d_2 этот переход затягивается: зна-

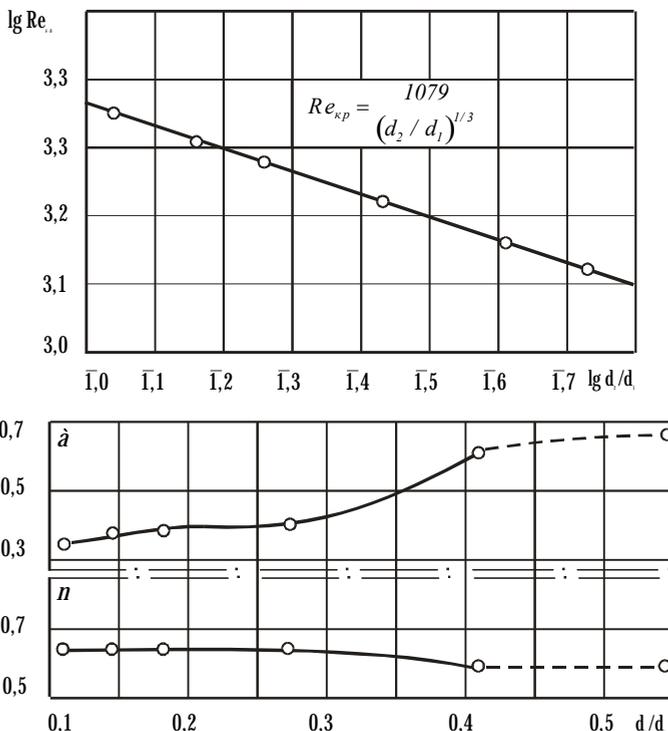


Рис.3. Зависимость $a=f(d_2/d_1)$ и $n=f''(d_2/d_1)$ в уравнении теплоотдачи

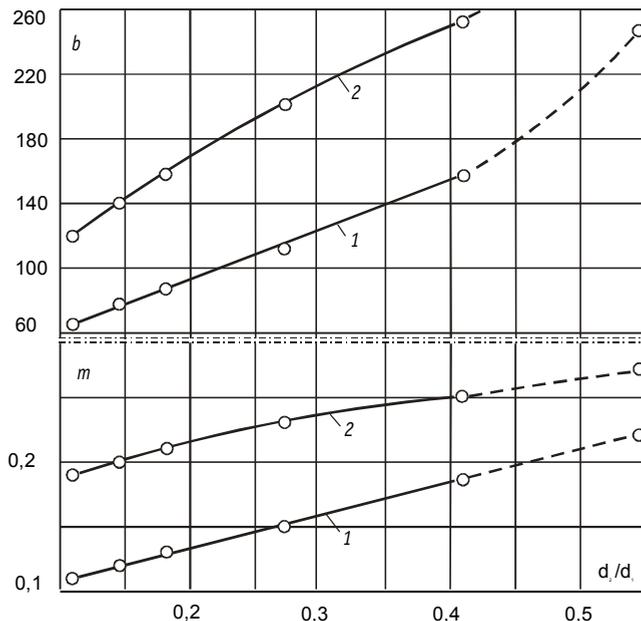


Рис.4. Зависимость $b=f(d_2/d_1)$ и $m=f''(d_2/d_1)$ в уравнении сопротивления $Eu=b \cdot Re^{-m}$ 1 - $Re < Re_{кр}$; 2 - $Re > Re_{кр}$

чения $Re_{кр}$ увеличиваются для более выраженной коридорной схемы расположения элементов комбинированной поверхности (рис.2, табл.2). На основании данных табл.2 функциональная зависимость $Re_{кр}=f(d_2/d_1)$ может быть представлена в виде выражения $Re_{кр}=1079(d_2/d_1)^{-0,33}$. Здесь $d_1=11\text{мм}$, $d_2=1,2...6,0\text{ мм}$ ($d_2/d_1=0,109...0,545$).

На рис. 4 показана степень влияния величины наружного диаметра турбулизирующих стержней d_2 на величину коэффициента b и показатель степени m в кри-

териальном уравнении $Eu=bRe^{-m}$ в виде функциональных зависимостей $b=f(d_2/d_1)$ и $m=f''(d_2/d_1)$. Из рис. 4 следует, что динамика роста показателя степени m связана с изменением гидродинамических условий течения потока, обусловленных турбулизирующим влиянием стержней с различной величиной наружного диаметра d_2 . По мере увеличения диаметра стержней более отчетливо проявляются особенности шахматной схемы расположения элементов поверхности. Так, в области смешанного обтекания при $Re > Re_{кр}$ для варианта поверхности со стержнями диаметром $d_2=1,2\text{ мм}$ показатель степени $m=0,19$, что близко к значениям показателя степени симметричных коридорных пучков, зависящим от геометрии системы; для варианта поверхности со стержнями диаметром $d_2=4,5\text{мм}$ $m=0,25$ или для комбинированного пучка с $d_2=6\text{мм}$ $m=0,27$ (табл. 1, 2), что характерно для обычных шахматных пучков труб одинакового диаметра [5]. В области преобладающего ламинарного режима обтекания при $Re < Re_{кр}$ для указанных вариантов поверхности показатели степени, соответственно, имеют значения: $m=0,11$ (при $d_2=1,2\text{ мм}$) и $m=0,22$ (при $d_2=6\text{ мм}$). На основе полученных данных связь между b и m и геометрическим параметром d_2/d_1 в интервале его изменения от 0,109 до 0,409 может быть представлена линейными зависимостями: $b=307,126(d_2/d_1)+30,915$; $m=0,252(d_2/d_1)+0,082$, справедливыми в области $4 \cdot 10^2 < Re < Re_{кр}$ и зависимостями: $b=420,5(d_2/d_1)^{0,57}$; $m=0,3(d_2/d_1)^{0,21}$ при $Re_{кр} < Re < 10^4$.

Результаты экспериментального исследования опытных вариантов поверхности теплообмена поперечно обтекаемого комбинированного пучка 1,45x1,45 с последовательно размещенными в его ячейках турбулизирующими стержнями различных наружных диаметров и комбинированной поверхности пучка разных диаметров приведены на рис.5 в виде тепловых и объемных комплексных характеристик $Q/F\Delta\bar{t} = \alpha = f(Q/N\Delta\bar{t})$ и $Q/V\Delta\bar{t} = \alpha \cdot f = \varphi(Q/N\Delta\bar{t})$.

Из рис.5 следует, что при заданном расходе энергии на перемещение теплоносителя ($Q/N\Delta\bar{t} = idem$) теплосъем с единицы поверхности ($Q/F\Delta\bar{t} = \alpha$) зависит от схемы компоновки элементов поверхности, определяемой величиной диаметра турбулизирующих цилиндрических стержней и их положением в ячейках базовой поверхности. На основе тепловых характеристик $Q/F\Delta\bar{t} = \alpha = f(Q/N\Delta\bar{t})$ на рис.5 также показаны значения относительных коэффициентов теплоотдачи $\bar{\alpha} = \alpha_i / \alpha_{к.п}$ (α_i - коэффициент теплоотдачи опытных вариантов поверхности, $\alpha_{к.п}$ - коэффициент теплоотдачи базового коридорного пучка) в зависимости от величины геометрического параметра d_2/d_1 , определяющего изменение наружного диаметра турбулизирующих элементов, при различных значениях энергетического коэффициента $Q/N\Delta\bar{t}$. Из представленной зависимости следует, что с увеличением диаметра стержней d_2 (параметра d_2/d_1) тепловая эффективность симметричного коридорного пучка в диапазоне изменения энергетического коэффициента $Q/N\Delta\bar{t} \approx 1,0...40,0 \text{ град}^{-1}$ возрастает, приобретая наибольшие значения $\bar{\alpha} = 1,17$ при $Q/N\Delta\bar{t} = 11,2 \text{ град}^{-1}$ (кр.1) и $\bar{\alpha} = 1,145$ при $Q/N\Delta\bar{t} = 1,0 \text{ град}^{-1}$

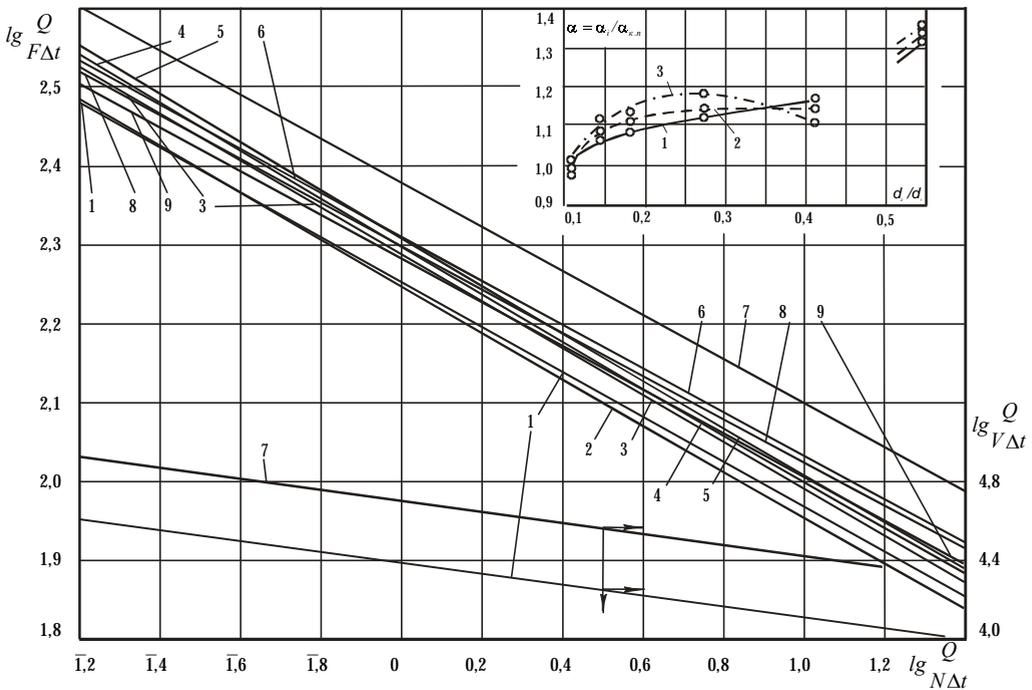


Рис.5. Тепловые и объемные комплексные характеристики опытных вариантов поверхности теплообмена $Q/F\Delta\bar{t} = f(Q/N\Delta\bar{t})$ и $Q/V\Delta\bar{t} = \varphi(Q/N\Delta\bar{t})$ (1-9-табл.1,2); $\bar{\alpha} = \alpha_i / \alpha_{к.п} = \varphi(d_2/d_1)$:
 1 - $Q/N\Delta\bar{t} = 11,2 \text{ град}^{-1}$; 2 - $Q/N\Delta\bar{t} = 1,0 \text{ град}^{-1}$; 3 - $Q/N\Delta\bar{t} = 0,1 \text{ град}^{-1}$

(кр.2), соответствующие варианту поверхности с турбулизирующими стержнями диаметром $d_2=4,5\text{мм}$ ($d_2/d_1=0,409$) (табл.1,2, п.6). С уменьшением энергетического коэффициента (с увеличением скорости движения потока теплоносителя) характер зависимости $\bar{\alpha} = \varphi(d_2/d_1)$ становится другим (при $Q/N\Delta\bar{t} < 1,0 \text{ град}^{-1}$). Как следует из рис.5 (кр.3), максимум эффективности теплоотдачи соответствует варианту поверхности коридорного пучка с турбулизирующими стержнями диаметром $d_2=3\text{мм}$: $\bar{\alpha} = 1,183$ при $Q/N\Delta\bar{t} = 0,1 \text{ град}^{-1}$, и значение параметра $d_2/d_1=0,272$ ($d_2=3\text{мм}$) для данного режима обтекания потоком элементов поверхности является оптимальным.

Опытные варианты поверхности коридорного пучка с различным расположением в ячейках стержней диаметром $d_2=4,5\text{мм}$ имеют разную величину тепловой эффективности и, в частности, при $Q/N\Delta\bar{t} = 0,1 \text{ град}^{-1}$: $\bar{\alpha} = \alpha_{\text{центр}} / \alpha_{\text{кп}} = 1,109$ при центральном расположении стержней, $\bar{\alpha} = \alpha_{\text{см.вв}} / \alpha_{\text{кп}} = 1,079$ при смещении стержней от центра ячейки вверх по потоку, $\bar{\alpha} = \alpha_{\text{см.вв}} / \alpha_{\text{кп}} = 1,042$ при смещении стержней от центра ячейки вниз по потоку (рис.5, табл.1, 2, п.6, 8, 9).

Тепловая эффективность комбинированной поверхности пучка труб разных диаметров $d_1=11\text{мм}$ и $d_2=6\text{мм}$ ($d_2/d_1=0,545$) существенно выше эффективности базового коридорного пучка $1,45 \times 1,45$: $\bar{\alpha} = \alpha_{\text{комб}} / \alpha_{\text{кп}} = 1,365$ при $Q/N\Delta\bar{t} = 11,2 \text{ град}^{-1}$; $\bar{\alpha} = 1,342$ при $Q/N\Delta\bar{t} = 1,0 \text{ град}^{-1}$ и $\bar{\alpha} = 1,32$ при $Q/N\Delta\bar{t} = 0,1 \text{ град}^{-1}$ (расчетные точки показаны в правом верхнем углу рис.5).

В результате сравнения объемных характеристик $Q/V\Delta\bar{t} = \varphi(Q/N\Delta\bar{t})$ комбинированной поверхности пучка труб с $d_2/d_1=0,545$ и поверхности базового коридорного пучка труб диаметром $d_1=11\text{мм}$ (рис.5), имеющих различную величину коэффициентов компактности ($f_{\text{комб}}=208,6 \text{ м}^2/\text{м}^3$ и $f_{\text{кп}}=135 \text{ м}^2/\text{м}^3$), при значении энергетического коэффициента $Q/N\Delta\bar{t} = 11,2 \text{ град}^{-1}$ получаем, что отношение объемных показателей пучков равно $(Q/V\Delta\bar{t})_{\text{комб}} / (Q/V\Delta\bar{t})_{\text{кп}} = 2,14$, а отношение соответствующих величин их объемов - $V_{\text{комб}}/V_{\text{кп}}=0,467$. Это означает, что замена обычного коридорного пучка $1,45 \times 1,45$ на пучок с комбинированной поверхностью позволяет уменьшить объем теплообменника на 53%.

Выполненное исследование позволяет вынести рекомендации по практическому использованию для повышения тепловой эффективности обычных коридорных пучков труб в теплообменных аппаратах специальных турбулизирующих решеток из поперечно обтекаемых цилиндрических элементов, размещаемых в межтрубных каналах пучка. Такие устройства должны быть сменными и по мере эксплуатационной необходимости (монтажа, ремонта, очистки трубчатых поверхностей) иметь возможность периодического извлечения из межтрубных каналов.

Полученные результаты исследования позволяют сделать заключение о целесообразности использования предложенного подхода к повышению эффективности трубчатых теплообменных аппаратов и устройств за счет применения в одном случае турбулизирующих устройств из цилиндрических круговых элементов, а в другом - комбинированной поверхности поперечно обтекаемых пучков труб большего и меньшего наружных диаметров.

Список литературы

1. Дрейцер Г.А. Критический анализ современных достижений в области интенсификации теплообмена в каналах / Интенсификация теплообмена: Тр. второй Рос. нац. конф. по теплообмену. – М.: Изд-во МЭИ, 1998. – Т.6. – С.91-98.
2. Евенко В.И., Анисин А.К., Порошин Б.В., Евенко В.В. Пат. 2006780 С1. Россия. Трубчатый теплообменник // БИ. – 1994. – №2.
3. Калафати Д.Д., Попалов В.В. Оптимизация трубной решетки коридорного пучка при поперечном обтекании на основе эффективности теплоотдачи // Изв. вузов СССР. Энергетика. – 1977. – №8. – С.89-93.
4. Евенко В.И., Анисин А.К. Повышение эффективности теплоотдачи поперечно обтекаемых пучков труб // Теплоэнергетика. – 1976. – №7. – С. 37-40.
5. Жукаускас А.А. Конвективный перенос в теплообменниках. – М.: Наука, 1982. – 472с.

Поступила в редакцию 15.11.99.

УДК 532.526.4:621.039.534

ДИАГНОСТИКА РАССТОЯНИЯ ДО МЕСТА РАЗРЫВА ТРУБОПРОВОДА ПО ИЗМЕНЕНИЮ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Е.Ф. Авдеев, В.В. Большунова

Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск



Предлагается повышающая безопасность новая методика определения расстояния до места частичного разрыва в контурах или магистральных трубопроводах по изменению гидравлических характеристик при возникновении течи.

ВВЕДЕНИЕ

До сих пор достаточно остро стоит проблема своевременного и точного обнаружения, а, следовательно, и скорейшего устранения мест возникновения течей, особенно этот вопрос актуален для закрытых контуров и магистральных трубопроводов.

Существующие способы и устройства для обнаружения места течи основаны на принципе прохождения и изменения электромагнитного сигнала. Например, прокладка коаксиального кабеля в теплоизоляции вдоль трубопровода и подключение его к регистратору течи [1]. Такое устройство не может быть использовано для трубопроводов без теплоизоляции. Кроме того, при недостаточно высокой точности определения места течи, для использования устройства требуется изготовление сложного измерительного комплекса. Существует способ определения расстояния до места течи, который заключается в прокладке в электропроводящей среде трубопровода изолированного кабеля, соединенного в конце трубопровода с изолированным проводником, вмонтированным в продольный сварной шов трубы, который при возникновении повреждения заземляется [2]. Расстояние до места течи определяется по известным длинам изолированного кабеля и проводника и измеренному сопротивлению. Недостатком такого метода является изготовление специальных труб с изолированными проводниками, вмонтированными в продольные швы, что значительно усложняет монтаж трубопроводов и удорожает конструкцию в целом.

Эти способы и устройства не применимы для взрывоопасных веществ.

Для повышения безопасности ниже излагается простая и достаточно точная новая методика определения расстояния до места частичного разрыва в трубопроводных системах по измерению их гидравлических характеристик, которая основана на применении зависимостей, связывающих перепады давления, расход и расстояния.

РАСЧЕТНЫЕ ЗАВИСИМОСТИ

Применим известную зависимость, связывающую перепад давления, расход и расстояние при течении в трубе на номинальном режиме (без разрыва)

$$\Delta p = \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho Q^2}{2\sigma^2} + \sum \Delta p_m, \quad (1)$$

где Δp – перепад давления на общей длине L контролируемого участка, λ – коэффициент сопротивления трения, ρ – плотность, Q – объемный расход, d – внутренний диаметр трубопровода, σ – площадь сечения трубопровода; $\sum \Delta p_m$ – потери на местные сопротивления.

И на отдельных участках после возникновения течи:

- от начала контролируемого участка до места течи

$$\Delta p_1 = \lambda_1 \frac{l_1}{d} \frac{\rho Q^2}{2\sigma^2} + \sum \Delta p_{1m}, \quad (2)$$

где Δp_1 – перепад давления на длине l_1 от начала контролируемого участка до места течи, λ_1 – коэффициент сопротивления трения, Q' – расход на входе контролируемого участка при появлении течи; $\sum \Delta p_{1m}$ – потери на местные сопротивления;

- от места течи до конца контролируемого участка

$$\Delta p_2 = \lambda_2 \frac{l_2}{d} \frac{\rho Q_2^2}{2\sigma^2} + \sum \Delta p_{2m}, \quad (3)$$

где Δp_2 – перепад давления на длине l_2 от места течи до конца контролируемого участка, λ_2 – коэффициент сопротивления трения, Q_2 – расход на выходе контролируемого участка при появлении течи; $\sum \Delta p_{2m}$ – потери на местные сопротивления.

В режиме с течью общий перепад давления $\Delta p'$ на контролируемом участке длиной L будет равен сумме перепадов давлений до места течи и после

$$\Delta p' = \Delta p_1 + \Delta p_2. \quad (4)$$

После совместного рассмотрения (1 - 4) с учетом, что $L=l_1+l_2$, получим

$$l_1 = \frac{\frac{\lambda}{\lambda_2} \left(\frac{\Delta p' - \sum \Delta p_m'}{\Delta p - \sum \Delta p_m} \right) \left(\frac{Q}{Q_2} \right)^2 - 1}{\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left(\frac{Q'}{Q_2} \right)^2 - 1} L, \quad (5)$$

где $\sum \Delta p_m$ – потери на местные сопротивления на длине L при номинальном режиме; $\sum \Delta p_m'$ – потери на местные сопротивления на длине L при появлении течи.

В частном случае при отсутствии местных сопротивлений выражение (5) принимает более простой вид:

$$l_1 = \frac{\frac{\lambda}{\lambda_2} \frac{\Delta p'}{\Delta p} \left(\frac{Q}{Q_2} \right)^2 - 1}{\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left(\frac{Q'}{Q_2} \right)^2 - 1} L. \quad (6)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА МЕТОДИКИ

Предлагаемая методика определения расстояния до места течи была проверена на экспериментальном стенде «Циркуляционная петля» кафедры «Теплофизика» ИАТЭ.

Стенд представляет собой питательно-приемный бак с подсоединенным к нему замкнутым трактом основного контура и питательного насоса (рис.1). Тракт основного контура выполнен из нержавеющей стали. Диаметр труб составляет 82, 66, 50 мм. Общая длина контура 45 м, длина рабочего участка 38 м. В состав рабочего участка основного контура входят Л-образный, П-образный и U-образный повороты. Давление на выходе из насоса составляет $\sim 3 \cdot 10^5$ Па (30 м вод. ст.), расход воды в контуре может изменяться в пределах $(7-16)$ м³/ч.

Стенд предназначен для исследования гидродинамических и теплофизических характеристик одно- и двухфазных течений. Он позволяет выполнять экспериментальные теплогидравлические исследования, связанные со стационарным функционированием контуров реакторов, работы циркуляционной петли в режимах нестационарных переходных процессов.

Экспериментально исследовались два случая расположения места течи. При этом создавались такие режимы, чтобы до и после разрыва были различные потери на местные сопротивления и потери по длине. В первом случае место течи располагалось между т.3 и т.4, во втором случае - Л-образный поворот и U-образный поворот меняли местами, и место течи располагалось между т.1 и т.2.

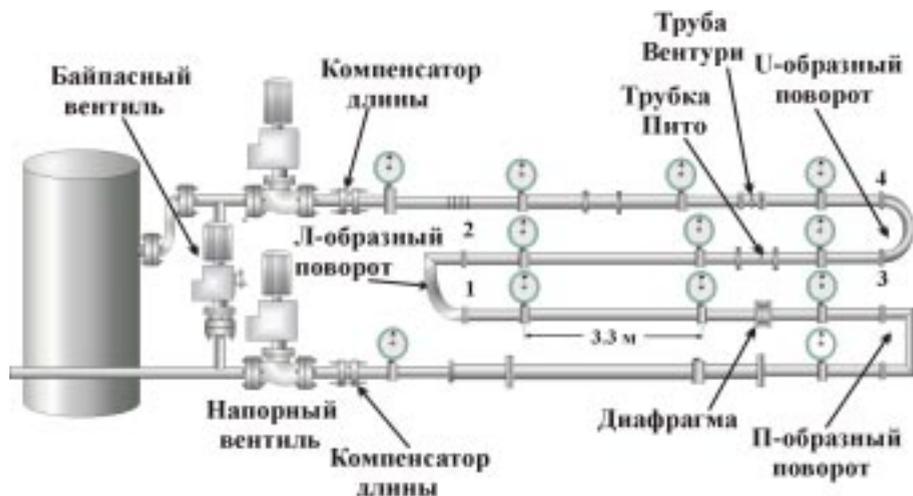


Рис.1. Экспериментальный стенд «Циркуляционная петля»

Расходы по контуру измерялись двумя способами: с помощью выполненной по ГОСТу трубы Вентури и новым, разработанным авторами методом – по максимальной скорости и перепаду давления [3]. Для контроля проверялся баланс расходов, с учетом расхода в месте течи, измеренным объемным методом.

Первоначально измерялись расход и перепад давления при номинальном режиме, затем искусственно создавался разрыв в контуре, и повторно определялись расход на входе и выходе контролируемого участка и общий перепад давления.

Эксперименты проводились на трубе диаметром $50 \cdot 10^{-3}$ м, при средней температуре воды в контуре 17 °С. В табл. 1 приведены значения расходов и перепадов давления на контролируемом участке длиной 10.91 м. В табл. 2 приведены те же значения на контролируемом участке длиной 11.14 м.

Таблица 1

Δp , кПа	Q, л/с	Re	$\Delta p'$, кПа	Q', л/с	Q ₂ , л/с
3.4	2.8	$6.5 \cdot 10^4$	2.7	2.6	2.5
7.1	3.9	$8.9 \cdot 10^4$	6.9	3.5	3.4
11.3	4.7	$1.1 \cdot 10^5$	10.3	4.4	4.3
15.7	5.5	$1.3 \cdot 10^5$	15.2	4.6	4.4

Таблица 2

Δp , кПа	Q, л/с	Re	$\Delta p'$, кПа	Q', л/с	Q ₂ , л/с
3.9	3.2	$7.4 \cdot 10^4$	3.4	3.1	3
11	5	$1.1 \cdot 10^5$	10.5	4.8	4.5
16.5	6	$1.4 \cdot 10^5$	15.5	5.8	5.5
19.9	7	$1.7 \cdot 10^5$	20	6.6	6.3

По определенным расходам рассчитывались коэффициенты сопротивления трения и потери на местные сопротивления, коэффициент сопротивления трения на участке плавного поворота рассчитывался с учетом поправки Уайта [4].

$$\frac{\lambda}{\lambda_0} = 1 + 0.075 \text{Re}^{1/4} \left(\frac{R}{r} \right)^{1/2}, \quad (7)$$

где λ - коэффициент сопротивления криволинейной трубы, λ_0 - коэффициент сопротивления прямой трубы, R - радиус трубы, r - радиус кривизны. Расстояние до места разрыва рассчитывалось по полученной зависимости (5) и сравнивалось с реальным расстоянием.

В первом случае общая длина контролируемого участка составляла 10.91 м, реальное расстояние до места разрыва составляло 6.33 м. Расчетное расстояние до места разрыва по измеренным расходам и перепадам давления получено в среднем 6.30 м.

Во втором случае длина контролируемого участка составляла 11.14 м, реальное расстояние до места разрыва - 5.51 м. Полученное по формуле (5) расстояние до места разрыва оказалось в среднем равным 5.48 м.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам сравнения реальных расстояний до места течи с их рассчитанными величинами по экспериментально замеренным расходам и перепадам давлений можно сделать вывод о возможности практического использования предлагаемой методики.

Список литературы

1. Авторское свидетельство СССР № 612102, кл. F17 D 5/02. Устройство для обнаружения места течи в трубопроводе.
2. Заявка ФРГ № 1940872, кл. F17 D 5/06.
3. Авдеев Е. Ф., Большунова В. В. Способ определения расхода в трубопроводах. Заявка № 99104839/28 от 02.03.99 г., Справка о приоритете № 98109475/25 (010915) от 25.03.99 г.
4. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. - М.: Наука, 1974.

Поступила в редакцию 22.12.99.

УДК 621.039.564.5

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ВОЛНОВОДНАЯ МНОГОТОЧЕЧНАЯ СИСТЕМА ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДВУХФАЗНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

В.И. Мельников*, В.В. Контелев*, В.В. Иванов*, Х.-М. Прассер,
В. Циппе****

** Нижегородский государственный технический университет, г. Н. Новгород*

*** Научно-исследовательский центр "Розендорф", г. Дрезден, Германия*



Статья представляет новую акустическую диагностическую систему для высокоскоростной визуализации двухфазных теплоносителей в трубопроводах. Описывается принцип действия, конструктивные особенности и методика визуализации двухфазных потоков. Приводятся результаты экспериментального тестирования этой системы на теплофизическом стенде.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время в области развития экспериментальной техники для исследования двухфазных потоков наиболее актуальной стала разработка диагностических систем визуализации, позволяющих получить информацию о структуре двухфазной смеси в виде изображения поперечного сечения потока с высоким временным и пространственным разрешением. Разработка таких систем стала возможна только в связи с интенсивным развитием электронно-вычислительной техники, т.к. решение подобной задачи требует манипулирования большими массивами экспериментальных данных. Представляя поток теплоносителя в виде динамичной, меняющейся в режиме реального времени картины поперечного сечения, системы визуализации дают гораздо больше информации о различных его параметрах (степени дисперсности, локализации, форме и размерах фракции) по сравнению с применяемыми ранее кондуктометрическими ячейками [1-3], γ -плотномерами, нейтронными и рентгеновскими датчиками [4-6].

В настоящее время разработаны системы визуализации, основанные на использовании проникающего излучения, измерении электрических свойств исследуемой среды и применении ультразвука.

Так, например, в статье [7] описан "Высокоскоростной рентгеновский компьютерный томографический сканер" с быстродействием 2000 кадров в секунду и пространственным разрешением около 2 мм. В публикациях [8] и [9] представлена емкостная и электропроводная визуализационная техника. В первом случае для восстановления картины о распределении фаз по сечению трубопровода используется информация о емкости двухфазной смеси, измеряемой между электродами, расположенными в стенке трубопровода. Во второй системе измеряется элек-

тропроводность между электродами, образующими тонкую сетку по сечению канала. Работа [10] посвящена ультразвуковой отражательной томографии, принцип действия которой подобен применяемому в медицинской технике УЗИ. Однако вследствие сильной неоднородности акустических свойств промышленных объектов простой перенос на промышленные процессы медицинской УЗИ технологии невозможен, и разработчики применяют ряд специальных мер для адаптации ультразвуковых преобразователей к промышленным потокам.

Во всех перечисленных выше системах для восстановления изображения используются томографические алгоритмы, суть которых заключается в восстановлении изображения по интегральным проекциям каких-либо измеренных физических величин. Этот подход, вследствие сложного математического аппарата, требует громоздких вычислений, существенного упрощения исходных систем уравнений, значительных временных затрат и сложного оборудования (как первичных датчиков, содержащих множество источников и детекторов для получения требуемого количества проекций, так и мощных электронных систем для обработки данных). Кроме этого каждая из перечисленных систем имеет специфические недостатки, характерные только для нее и ограничивающие область применения. Для рентгеновского сканера - это зависимость и влияние на показания толщины стенок трубопровода из-за низкой проникающей способности рентгеновских лучей. Электрические системы не могут визуализировать неэлектропроводные потоки, а ультразвуковая отражательная установка работоспособна только в определенных режимах с достаточно редкими и крупными пузырями.

Создать более дешевый прибор, не использующий сложные математические алгоритмы, но обладающий в то же время высокими разрешающими характеристиками, удалось разработчикам электродно-ячеистой томографической системы [11]. В основе этой системы применен решеточный датчик, состоящий из двух электродных сеток, расположенных в параллельных плоскостях на близкой дистанции друг от друга. Угол между электродами обеих сеток составляет 90 градусов. На электроды первой сетки (излучающая плоскость) последовательно подается задающее напряжение. Если импульс, подведенный к одному из излучающих электродов, возникает на конкретном электроде второй сетки (приемная плоскость), то, следовательно, поперечная точка между этими электродами занята проводящей фазой (водой). В течение измерительного цикла последовательно активируются все излучающие электроды, полученная двумерная матрица токовых сигналов отражает проводимость между всеми поперечными точками электродов двух плоскостей. Измеренные мгновенные значения проводимости сравниваются с предварительными калибровочными данными, и по результатам сравнения вычисляется газосодержание в каждой точке. Максимальное временное и пространственное разрешение, достигнутое в настоящее время при помощи этой системы, составляет 1024 Гц и 256 контролируемых точек соответственно. Эти датчики были успешно испытаны в экспериментах по визуализации различных режимов двухфазного потока в вертикальном канале и при визуализации процесса кавитации за быстрозапорным вентиляем в горизонтальном трубопроводе [12].

Достижения в конструировании решеточных датчиков, их успешное тестирование, а также желание разработать подобный недорогой прибор, но основанный на волноводно-акустической технологии, для визуализации в том числе и неэлектропроводных потоков, стали причинами для начала наших исследований, результат которых - разработка ультразвуковой волноводной многоточечной системы.

КОНСТРУКЦИЯ И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ВОЛНОВОДНОЙ СИСТЕМЫ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Применение волноводов для решения проблемы устойчивости акустических датчиков при диагностике двухфазных потоков с экстремальными параметрами было предложено еще в 70-е гг. Конструкция датчика, в котором для подвода акустической энергии в контролируемый объем движущегося с высокой скоростью находящегося под давлением нагретого двухфазного потока используются волноводы, т. е. проволока или стержни, проще и надежнее, чем применение теплостойких пьезоэлементов или создание специальной системы охлаждения. Дистанционирование и удаление из агрессивных условий элементов, не обладающих достаточной стойкостью, которые достигаются при применении волноводов, особенно актуальны для ядерно-энергетических установок (ЯЭУ), где дополнительными вредными факторами являются мощные потоки ионизирующих излучений.

На основе этих конструктивных принципов для диагностики двухфазных потоков были разработаны и экспериментально проверены локальные [13], резонансные [14] и импедансные акустические зонды [15].

Идея многоточечной волноводно-акустической системы основана на достижениях при создании локальных и импедансных зондов. Принципиально новой конструктивной особенностью стало применение не единичных волноводов, а сложных волноводных систем для создания конструкции датчика с равномерно распределенными по сечению потока контролируемыми объемами.

Принцип действия новой диагностической системы основан на измерении акустической проводимости среды.

Основными элементами системы высокоскоростной визуализации двухфазного потока являются датчик и электронный блок. Управление процессом измерения потока, настройка и корректировка параметров, считывание, хранение и анализ полученных данных осуществляются при помощи персонального компьютера. Упрощенная блок-схема прибора показана на рис.1.

Электрические импульсы, генерируемые электронным блоком, преобразуются пьезоэлементами в акустические волны и излучаются цилиндрическими волноводами. Если в контролируемом объеме находится жидкость, то затухание ультразвука, проходящего через контролируемый объем, незначительно; акустические колебания достигают приемного волновода и после преобразования в электрические сигналы поступают в электронную систему обработки. Если в контролируемом объеме находится газовая фаза, то ультразвук затухает и не достигает приемного волновода.

В каждом контролируемом объеме измеряется амплитуда акустических импульсов, прошедших от излучателей к приемникам. Эта амплитуда связана с акустичес-

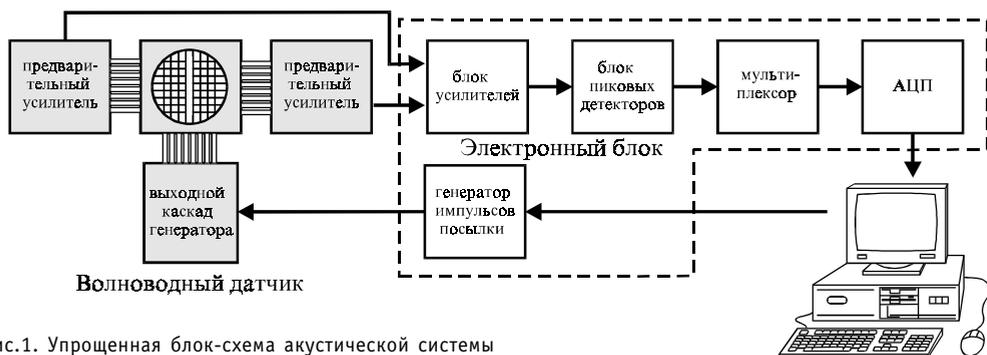


Рис.1. Упрощенная блок-схема акустической системы

ким волновым сопротивлением среды (Z):

$$Z = \rho c, \quad (1)$$

где ρ - плотность среды, c - скорость звука в ней.

Чем больше акустическое волновое сопротивление среды, тем больше энергия акустических импульсов, прошедших через контролируемый объем, и тем больший сигнал будет принят.

В данном методе необходимо решить две задачи.

1. Эффективно излучить акустическую энергию в контролируемую среду. При этом необходимо подавить различные паразитные акустические колебания, связанные с реверберацией и “звоном” конструктивных элементов, не участвующих в передаче акустических сигналов (герметизирующие элементы, подвеска, корпус).

2. Эффективно принять прошедшие через контролируемый объем сигналы. При этом необходимо выделить полезные акустические импульсы, подавить помехи и сигналы от соседних излучателей.

Ключевым элементом системы является датчик (рис. 2), который непосредственно размещается в контролируемом потоке, и подвергается воздействию всех негативных факторов со стороны рабочей среды.

Конструкция датчика выполнена по волноводно-акустической технологии (WAT-technology) [16-17], основным принципом которой является применение волноводов в акустическом тракте. Применение этой технологии, как уже отмечалось, позволяет удалить из зоны воздействия вредных факторов со стороны окружающей среды элементы, не обладающие достаточной надежностью (пьезокерамические преобразователи, электронные компоненты, проводники и т. д.).

При разработке датчика были проведены эксперименты для выбора оптимальной геометрии волноводов. На экспериментальной модели варьировались следующие их характеристики: диаметр, длина, способы соединения с герметизирующими элементами, отрабатывались разные конструкции согласующих элементов. Данные экспериментов показали, что наиболее оптимальной конструкцией является система, в которой излучение ультразвука осуществляется отдельными, не зависимыми друг от друга волноводами, а для приема используются объединенные в группы волноводы. Это позволило сделать систему более компактной и надежной за счет уменьшения количества приемников и излучателей.

Конструкция и размещение волноводов таковы, что по сечению трубопровода диаметром 50 мм образуются 48 точек контроля. Контролируемые объемы образуются между излучателями и перпендикулярно расположенными приемниками.

В качестве излучателей используются капиллярные трубочки диаметром 1,1 мм, приемники - проволока 0,8 мм.

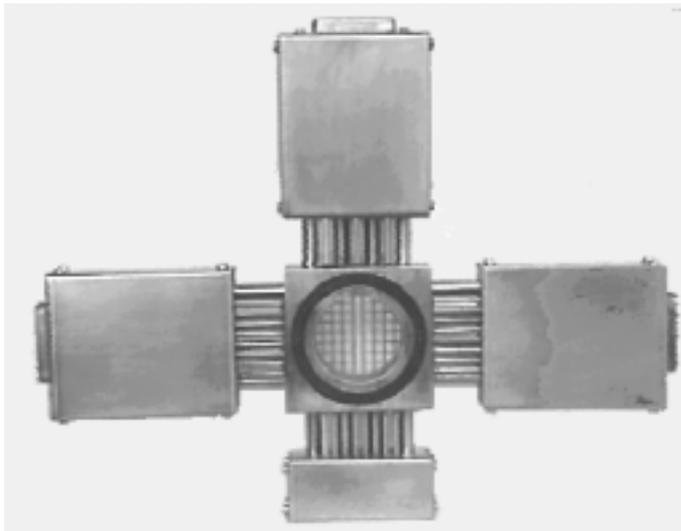


Рис.2. Внешний вид датчика

Торец приемника ориентирован на боковую поверхность излучателя и расположен на расстоянии 1 мм. Это расстояние является оптимальным с учетом нескольких ограничительных факторов. С уменьшением расстояния увеличивается влияние датчика на поток, с увеличением - уменьшается уровень принимаемого сигнала. Подавление помех и уменьшение реверберации в излучающем и в приемном тракте достигается при помощи демпфирования конструктивных элементов многожильным медным и нихромовым проводом. Эффективное выделение полезных импульсов из принятых акустических сигналов осуществляется посредством временной селекции в электронном блоке. В трубопровод с исследуемым потоком датчик устанавливается при помощи фланцевого соединения.

В качестве основного конструкционного материала используется нержавеющей сталь 12Х18Н10Т, что обеспечивает возможность эксплуатации датчика даже в экстремальных условиях ЯЭУ.

Электронный блок генерирует зондирующие импульсы заданной длительности и частоты, которые подаются на пьезоэлементы излучающих волноводов, усиливает и преобразует в цифровые электрические сигналы от приемных волноводов с последующим вводом их в персональный компьютер. Частота зондирующих импульсов 4 кГц, длительность 0,7 мкс, быстродействие при одновременном излучении двумя из восьми излучателей - 500 кадров в секунду.

РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТОВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Первое экспериментальное тестирование акустической системы было проведено на теплофизическом стенде в научно-исследовательском центре Rossendorf (Германия).

Примеры визуализации разных режимов потока, полученные при помощи ультразвуковой волноводной системы содержит рис.3.

На приведенной последовательности различных режимов течения отчетливо виден переход от пузырькового потока через снарядный, пенный и дисперсно-кольцевой, к кольцевому.

Методика экспериментальной обработки и графического отображения данных представляет собой следующий алгоритм. Перед экспериментом во время процедуры калибровки в память компьютера заносятся данные для двух крайних ситуаций - матрица значений сигналов в контролируемых точках в газовой фазе и матрица значений, когда во всех контролируемых объемах находится жидкость. По этим значениям устанавливаются уровни дискриминации и присваивается свой индивидуальный цвет для различных интервалов газосодержания. Во время эксперимента текущие (мгновенные) значения сигналов сравниваются с калибровочными данными, по результатам сравнения вычисляется газосодержание, и на дисплее компьютера воспроизводится структура сечения потока в контролируемых точках.

Качественное сравнение проводилось путем сопоставления изображений одних и тех же поперечных сечений, полученных от двух систем визуализации. Сравнения проводились с показаниями решеточного проволочно-ячеистого томографа, разработанного в лаборатории доктора Прассера. Решеточный томограф был испытан и оттестирован гамма-плотномером. Акустический датчик был расположен на расстоянии 45 мм от проволочно-ячеистого томографа по ходу движения потока в вертикальной трубе диаметром 51,2 мм. Измерения проводились в широком диапазоне изменения расходных скоростей воды и воздуха. На контролируемом участке трубопровода были реализованы различные режимы двухфазного потока (от пузырькового до кольцевого).

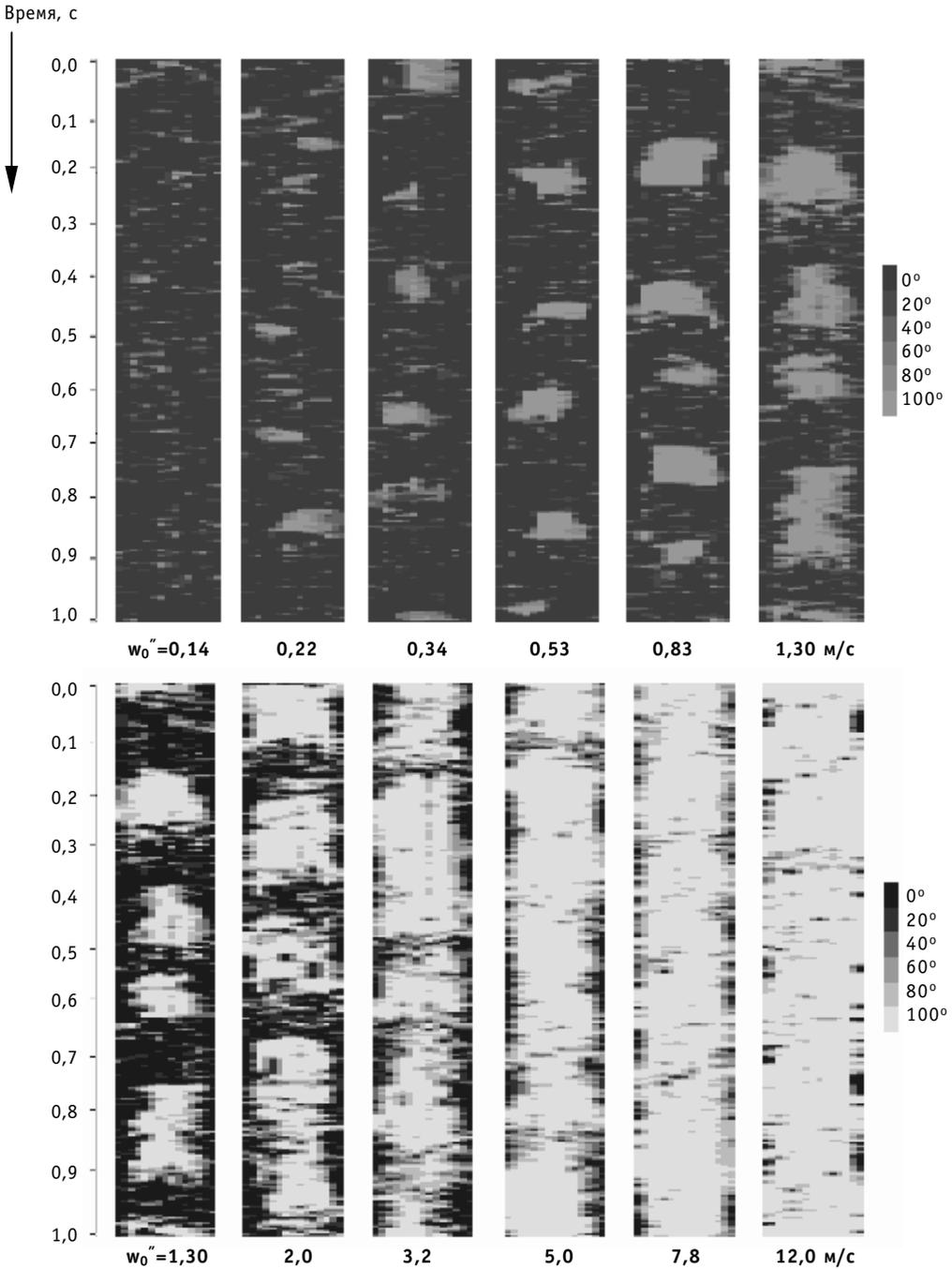


Рис.3. Изображение аксиального сечения потока в вертикальном трубопроводе для разных режимов течения: приведенная (расходная) скорость воды - 1 м/с; пространственное разрешение 169 точек (после интерполяции); временное разрешение 400 Гц

Общая динамика изменения структуры потока, воспроизводимая двумя визуализирующими системами, основанными на различных физических принципах, вполне сопоставима. Отличия объясняются значительной разницей в разрешающей способности.

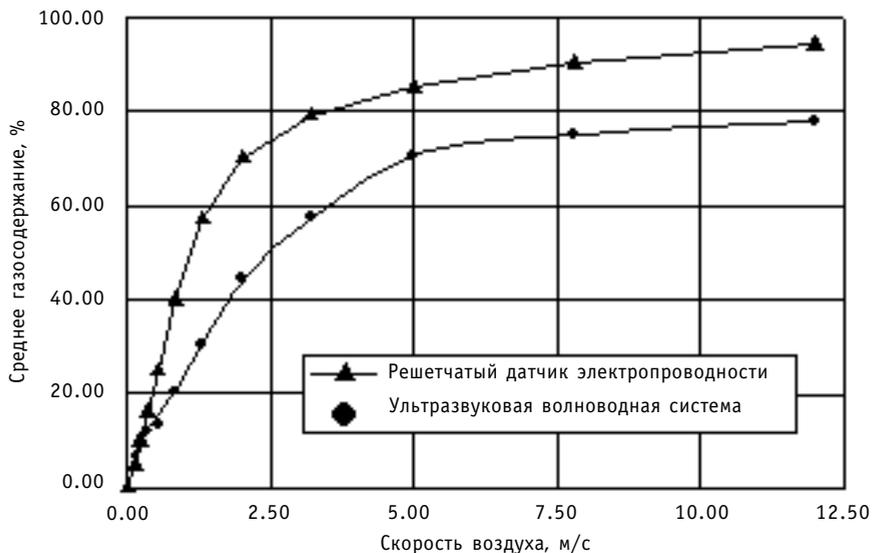


Рис. 4. Сравнение средних объемных газосодержаний, измеренных ультразвуковой волноводной системой и решетчатым датчиком, расходная скорость воды, 1 м/с

Для количественной оценки точности измерений были проведены усреднения газосодержания во времени и по диаметру сечения. Графики на рис.4 иллюстрируют результаты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанная система обладает двумя важными достоинствами.

1. Возможность визуализации двухфазных потоков при высоких температурах и давлениях (температура до 350°C, давление до 20 МПа).
2. Возможность визуализации неэлектропроводных потоков (например, нефтепродуктов, фреонов, растворителей и т. д.).

Как показывает практика, в настоящее время нет универсальной системы, пригодной для эксплуатации во всех условиях и режимах течения, которые могут возникать при использовании двухфазных потоков. Мы надеемся, что наша система будет дополнением к существующим разработкам и расширит область исследований двухфазных потоков.

Список литературы

1. Субботин В. И., Похвалов Ю. Е., Михайлов А. Е. и др. Резистивный и емкостной методы измерения паросодержания // Теплоэнергетика. – 1974. – № 6. – С. 63-68.
2. Субботин В. И., Похвалов Ю. Е., Михайлов А. Е. и др. К расчету газосодержания смеси при пузырьковом течении по данным измерения резистивным и емкостным методами // Теплоэнергетика. – 1975. – № 4. – С. 70-75.
3. Субботин В. И., Похвалов Ю. Е., Михайлов А. Е. и др. Временные и структурные характеристики газожидкостного потока при снарядном течении // Теплоэнергетика. – 1976. – № 1. – С. 67-70.
4. Gay R. R., Schell S., Lahey R. T. The side-scatter gamma technique for local density measurements // Trans. Amer. Nucl. Soc. – 1978. – Vol. 30. – P. 508-510.
5. Емельянов И. Я., Юрова А. Н., Смолин В. Н. Использование нейтронного датчика для определения паросодержания // Атомная энергия. – 1977. – Т. 43. – № 3. – С. 171-175.
6. Inoue A. et al. In Bundle Void Measurement of BWR Fuel Assembly by an X-ray CT scanner: Assessment of BWR Design Void Correlation and Development of New Void Correlation. 2nd ASME/JSME Nuclear Engineering Conference. Vol. 1. 39 (1993).

7. Hori K., Fujimoto T., Kawanishi K., Nishikawa H. Advanced high speed X-ray CT scanner for measurement and visualization of multi-phase flow. In: OECD/CSNI Specialist Meeting on Advanced Instrumentation and Measurements Techniques. Santa Barbara. (USA. March 17-20, 1997).
8. Reinecke N., Mewes D. Investigation of the two-phase flow in trikle-bed reactors using capacitance tomography // Chem. Eng. Sci. 52 (1997) 13, -PP. 2111-2127.
9. Reinecke N., Boddem M., Petritsch G. Mewes D. Tomographisches Messen der relativen Phasenanteile in zweiphasigen Stromungen fluider Phasen // Chemie-Ing.-Technik 68 (1996) 11, - P. 1404-1412.
10. Schlaberger H. I., Yang M., Hoyle B. S. Real-time ultrasonic process tomography for two-component flows // "Electronic Letters". - 1996. - Vol. 32. - №.17. - P. 1571-1572.
11. Prasser H.-M., Bottger A., Zschau J. A new electrode-mesh tomograph for gas-liquid flows // Flow Measurement and Instrumentation. 9 (1998) - P. 111-119.
12. H.-M. Prasser, A. Bottger, J. Zschau. A new electrode-mesh tomograf for gas-liquid flows // Forschungszentrum Rossendorf. Institute of Safety Research. Annual Report. - 1996. - P. 34-37.
13. Мельников В. И., Кутьин Л. Н., Лобанов А. И., Максимов В. И. А. с. 792130 СССР. МКИ³ G01 №29/00. Устройство для измерения локального объемного паросодержания. // Открытия. Изобретения. - 1980. № 48.
14. Мельников В. И., Махин В. А., Дзятко Н. В. А. с. 901895 СССР. МКИ³ G01N29/02. Устройство для диагностики двухфазного потока. // Открытия. Изобретения. - 1982. - № 4.
15. Мельников В. И., Хохлов В. Н, Маслов В. А. А. с. 1116382 СССР. МКИ³ G01N29/02. Устройство для измерения среднего объемного паросодержания среды. // Открытия. Изобретения. - 1984. - № 36.
16. Мельников В. И., Усынин Г. Б. Акустические методы диагностики двухфазных теплоносителей ЯЭУ. - М.: Энергоатомиздат, 1987.
17. Melnikov V. I., Nigmatulin B. I. The newest two-phase control devices in LWR equipment based on ultrasonic and WAT-technology // Nuclear Engineering and Design. 149. (1994) - P. 349-355.

Поступила в редакцию 30.11.99.

УДК 621.039.534.63

ЭФФЕКТ «ЗАВИСАНИЯ» ЖИДКОГО НАТРИЯ И ЕГО ВЛИЯНИЕ НА РАБОТУ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ИСПАРИТЕЛЬНО-КОНДЕНСАЦИОННОГО ТИПА

М.Н. Арнольдov, В.Н. Богомолов, О.Г. Григорьев, В.Н. Замиусский
ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



В работе описано явление перераспределения по контуру натриевых высокотемпературных тепловых труб (ВТТ) сложной конструкции значительных объемов жидкого натрия, обусловленное эффектом его «зависания» на внутренних элементах ВТТ. Показано влияние этого эффекта на работу испарительно-конденсационных систем (ИКС). Доказывается необходимость контроля уровня натрия для идентификации аномальных режимов работы ИКС, связанных, в том числе, и с осушениями капиллярно-пористой структуры (КПС) зоны испарения.

ВВЕДЕНИЕ

В течение ряда лет в ФЭИ, в рамках темы по созданию реактора испарительного охлаждения (РИО), проводились эксперименты на физических моделях для изучения аномальных и аварийных режимов работы систем теплоотвода от твэлов РИО. Модели представляли собой каскадные (состоящие из двух последовательно соединенных контуров испарительно-конденсационного типа) высокотемпературные тепловые трубы с натрием, в которых система отвода тепла от имитатора твэла конструктивно точно воспроизводила систему теплоотвода от твэла РИО. Энерговыведение твэла имитировалось электрическим нагревателем цилиндрической формы, который помещался в твэльную трубку имитатора твэла. Тепло от конденсатора II контура снималось сжатым воздухом.

В ходе экспериментов на таких моделях был выявлен ряд особенностей в поведении жидкой фазы теплоносителя, не характерных для ВТТ обычной конфигурации. В частности, периодическое появление дефицита жидкого натрия в нижнем коллекторе первого контура модели. Вывод о стохастических появлениях дефицита натрия в нижнем коллекторе модели сделан по результатам серии экспериментов, выполненных на моделях с увеличенной заправкой натрия (102 г вместо расчетных 27 г). Было обнаружено, что в одних режимах работы таких моделей существует избыток теплоносителя, приводящий к затоплению нижней части зоны испарения, ее перегреву и даже вскипанию там теплоносителя, а в других режимах работы тех же моделей возникает дефицит натрия, вызывающий осушения КПС имитатора твэла. Таким образом было показано, что уровень конденсата в нижнем коллекторе является важным параметром режимной диагностики ИКС и тре-

бует надежного контроля. Эти исследования внесли значительные коррективы в традиционные представления о режимах циркуляции жидкой фазы натрия в ВТТ.

Чтобы своевременно идентифицировать аномальные режимы ИКС такого типа требуется контролировать уровень конденсата в нижнем коллекторе модели [1,2,3]. Для решения этой задачи был изготовлен малогабаритный датчик уровня, работа которого основана на термометрическом принципе (т.н. термопарный уровнемер) [4]. Его схема приведена на рис.1.

Основными достоинствами такого уровнемера являются простота конструкции, компактность, ремонтпригодность, способность работать в агрессивных средах и в широком диапазоне температур. Его надежность, как показывает опыт работы, в основном определяется качеством используемых в нем термопар. Основное усовершенствование использованной нами термометрической системы контроля уровня касалось применения математического моделирования температурного поля датчика [5,6]. Оно значительно повысило его разрешение, которое при прямых измерениях, как известно, определяется плотностью размещения термопар по высоте датчика. Разработанные нами алгоритмы обработки позволили по показаниям 4-х термопар, расположенных на участке длиной 90 мм, получить чувствительность к изменению уровня натрия ~ 0.1 мм. Динамические свойства уровнемера, корпус которого изготовлен из стальной трубки $\varnothing 14 \times 0.4$ мм, оказались вполне приемлемыми для решения поставленной задачи. Постоянная времени датчика для условий рабочего объема ВТТ (пары натрия при температурах до 800°C и жидкий натрий тех же температур), по нашим оценкам, не более 5 с.

Информативность такого датчика уровня для устройств типа ВТТ оказалась намного выше предполагавшейся, т.к. с его помощью, например, оказалось достаточно просто обнаружить подкипание натрия в нижнем коллекторе модели, а также

такие явления как капельный сброс жидкого натрия со стенок модели в низкотемпературных режимах работы ВТТ, срывы пленки теплоносителя под действием парового потока и другие нерегулярности циркуляции жидкого натрия. Естественно, что при подобных режимах работы модели контроль за уровнем натрия (определение собственно уровня натрия вследствие возмущений такими процессами исходного поля температура по высоте корпуса уровнемера) теряется.

ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

Сейчас, после серии специальных экспериментов, выполненных с целью изучения эффектов «зависания» жидкой фазы натрия в моделях различной конструкции, можно уверенно утверждать, что в тепловой трубе классической компоновки «зависание» значительных количеств натрия невозможно. Эффект «зависания» проявляется в том, что часть жидкого теплоносителя (неподвижного по отношению к конструкции модели) приобретает свойства твердого тела и способна воспринимать не только растягивающие напряжения, но и касательные, т.е. имеется эффект, подобный эффекту «трения покоя». Этот эффект значимо присутствует только в моделях сложных конструкций с развитой поверхно-

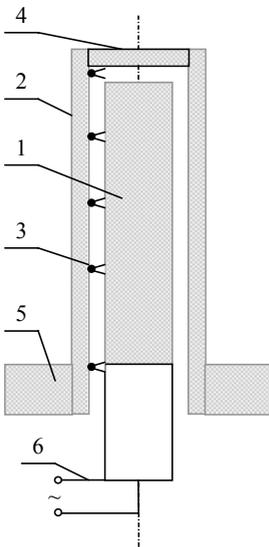


Рис. 1. Схема термопарного уровнемера: 1- электрический нагреватель термопарного уровнемера; 2 - корпус из тонкой теплопередающей трубки; 3 - термопары; 4 - верхняя пробка уровнемера; 5 - нижняя пробка ВТТ; 6 - токоподводы электрического нагревателя термопарного уровнемера

стью теплообмена, где есть полости, зазоры шириной 5 мм и менее, а также другие пространства, удобные для зависания жидкой фазы. Количество неконденсирующегося газа в рабочей полости модели, благодаря своему влиянию на смачиваемость элементов конструкции конденсатом натрия, также воздействует на эффект зависания. Эти обстоятельства непременно следует учитывать при конструировании теплообменников испарительно-конденсационного типа. По этой же причине необходимо подробно описывать конструкцию экспериментальной установки, для которой приводятся опытные данные, поскольку для других конструкций результаты могут заметно отличаться.

Схема однотвэльной ВТТ, на которой выполнена последняя серия экспериментов по изучению зависаний натрия, приведена на рис.2. Она физически моделирует систему теплоотвода от элементов активной зоны РИО и представляет собой каскад из двух испарительно-конденсационных контуров с натрием и холодильника, продуваемого сжатым воздухом. Общая длина модели более 1.5 м, внешний диаметр от 50 до 90 мм.

Оболочка имитатора твэла изготовлена из стандартной твэльной трубки $\varnothing 14 \times 0.4$ мм высотой 340 мм. Снаружи трубка покрыта артериальной КПС, образованной 3 слоями сетки саржевого плетения №685 из нержавеющей стали. Энерговыделение твэла имитируется электрическим нагревателем $\varnothing 7.8$ мм, который был рассчитан на выделение мощности до 5кВт. Потери тепла с боковой поверхности модели компенсируются шестью дополнительными нагревателями, намотанными на модель снаружи.

В систему термометрии такой модели входило более 30 термопар (обозначены цифрами на рис.2). Они предназначены для измерения температуры паров натрия по высоте I и II контуров (Тп-6 ... Тп-12, и Тп-21...Тп-29), оболочки имитатора твэла, а в аварийных режимах и для регистрации осушений ее КПС (Тп-1...Тп-4), стенки термопарного уровнемера (Тп-13 ...Тп-16).

Сложность конструкции модели в значительной степени обусловлена двухсторонним (через верхний и нижний коллекторы) способом подачи натрия в КПС имитатора твэла, наличием трех цилиндрических элементов промежуточного теплообменника (т.н. конденсаторов-испарителей, предназначенных для передачи тепла из I контура во II) и системы оперативного удаления неконденсирующихся газов (НКГ). Плотная компоновка внутрикорпусных элементов (корпус I контура изготовлен из трубки $\varnothing 57 \times 3$ мм) создала благоприятные условия для зависания в зоне конденсации I контура больших объемов натриевого конденсата. Для изучения динамики зависания натрия в различных режимах работы моделей было выполнено более десяти специальных экспериментов. Все они основаны на контроле за изменением уровня натрия в нижнем коллекторе I контура с помощью термопарного уровнемера.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В ходе экспериментов был выявлен ряд интересных особенностей динамики уровня натрия в нижнем коллекторе I контура модели. Так, при включении нагревателя имитатора твэла (НИТ) в ВТТ, предварительно разогретой дополнительными нагревателями до $\sim 480^{\circ}\text{C}$, происходит резкий сброс натрия в нижний коллектор (донная часть I контура модели). Динамика уровня конденсата натрия вместе с показаниями термопар уровнемера (Тп-13...Тп-16) и температуры пара (Тп-6) приведена на рис.3. Момент включения НИТ отмечен на шкале абсцисс (времени) меткой $t_1=10620$ с. Мощность нагревателя термопарного уровнемера, создающего зависимое от уровня натрия поле температур по высоте его корпуса, составляла 28.5 Вт.

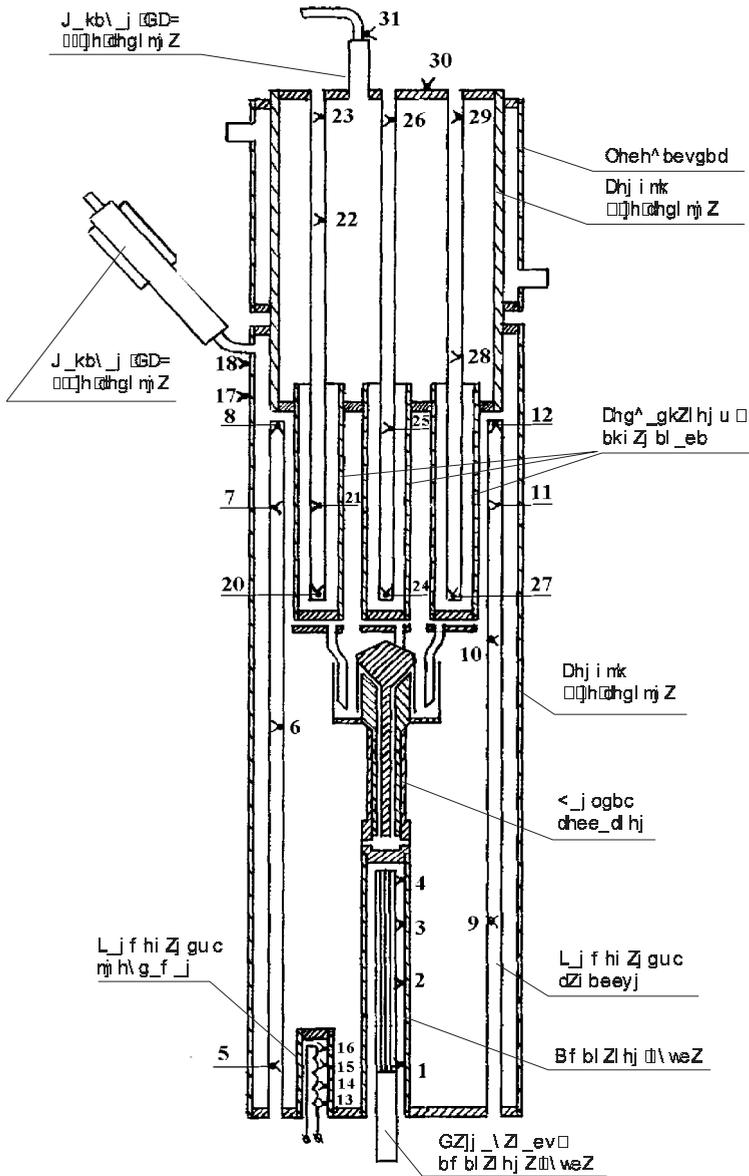


Рис.2. Схема экспериментальной установки

Из рисунка видно, что за первые ~ 400 сек. после включения НИТ происходит заметное, порядка 8 мм (соответствует ~15 см³ по объему и 14% от полной заправки), снижение уровня натрия в нижнем коллекторе от исходного уровня в ~30 мм. Оно вызвано, вероятно, тем, что начинается отток натрия в КПС имитатора твэла с последующим его испарением и зависанием после конденсации на внутренних элементах модели. Идет накопление натрия в верхнем коллекторе, в кольцевом зазоре I контура, а также на поверхности испарителей-конденсаторов и в полости между ними. Снижение уровня натрия происходит на протяжении ~250 с до уровня ~22 мм, после чего следует его восстановление до отметки ~32 мм. Это, видимо, связано со стоком его из верхнего коллектора после выхода системы теплоотвода твэла на рабочий режим.

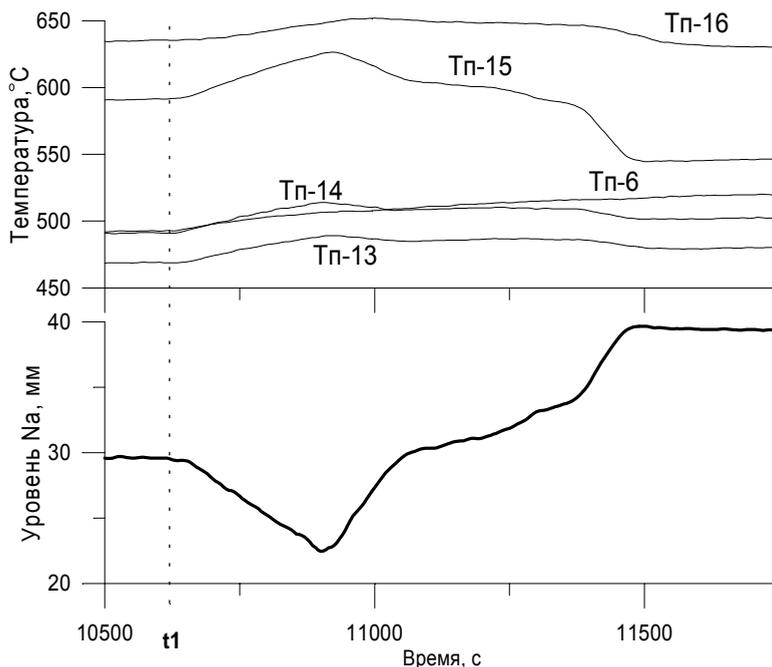


Рис. 3. Динамика уровня натрия в нижнем коллекторе модели после включения НИТ

Далее, на участке 11100...11350с темп сброса натрия падает, что связано с темпом разогрева сравнительно массивных испарителей-конденсаторов, затем он вновь резко возрастает и в итоге уровень натрия стабилизируется на отметке ~40 мм. Это наиболее вероятный уровень, он наблюдался в большинстве нормальных режимов работы ВТТ. Примечательно, что исходный уровень составлял в этом эксперименте ~30 мм, что также соответствует наиболее вероятной его величине перед запуском модели.

Последний всплеск уровня натрия связан по всей видимости с его стоком из кольцевого зазора верхней части I контура и из полости, образованной испарителями-конденсаторами, после запуска II контура. Максимальный перепад уровня в данном наблюдении составил 18 мм, что соответствует перераспределению по контуру ~31 см³ натрия. Это составляет ~30% действительной и более 100% расчетной заправки.

Для определения мест скопления жидкого натрия было проведено несколько специальных экспериментов, в частности, тк2814, с впрыском Ag в рабочую полость модели. Динамика уровня натрия, зафиксированная в эксперименте тк2814, представлена на рис. 4. Обозначения на нем аналогичны обозначениям рис.3.

Он демонстрирует постепенный выход натрия из цикла теплопереноса, длившийся около 2-х ч (отрезок 14500...21300 с). Примечательно, что температурный режим работы ВТТ был практически стационарным во времени этого эксперимента. Мощности нагревателей и режим работы холодильника также не менялись. Начавшееся снижение уровня натрия проходило после стабильного его положения в течение ~2-х ч на отметке ~40мм (на рис.4 эта часть эксперимента не представлена) и никоим образом не связано с изменениями режима работы модели.

За указанный двухчасовой период в данном эксперименте уровень натрия понизился на 7.4 мм, т.е. из процесса циркуляции по парожидкостному контуру

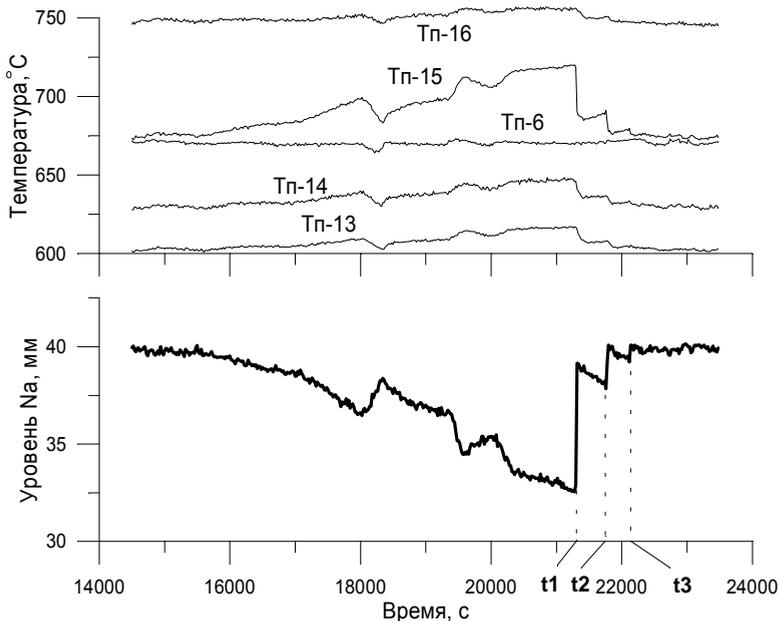


Рис. 4. Динамика уровня натрия в эксперименте mk2814

исключилось ~ 13 см³ теплоносителя. При этом, как это видно из рисунка, процесс снижения уровня после определенного момента (~ 18000 с) имеет явные нерегулярности, когда на глобальную кривую его снижения накладываются всплески с его повышением. Налицо неустойчивая работа жидкостной части теплопередающего контура, что проявилось в существенных колебаниях уровня натрия в нижнем коллекторе I контура модели на фоне нелинейного отрицательного тренда этой величины.

Это одно из самых удивительных наблюдений можно считать иллюстрацией к поведению части жидкого теплоносителя как псевдотвердого тела (температура в опытах была значительно выше температуры плавления натрия). К сожалению, до конца пока не понята физическая сущность процесса и что является границей перехода части жидкости из одного состояния в другое. В разных экспериментах время “старта” для снижения уровня натрия в коллекторе было разным (от 2-х до 12-ти ч), но характер процесса в основе своей сохранялся. Нам кажется, что путь для объяснения подобной странности в поведении натрия следует искать в изменении свойств жидкости на границе с твердым телом в зоне конденсации I контура, где, отметим, всегда присутствуют НКГ неизвестного состава. Газы, как известно, могут влиять на способность натрия к зависанию двумя путями. Так за счет адсорбции на поверхности они меняют смачиваемость твердых тел, а при растворении в жидкости - ее свойства.

Следует отметить, что в устройствах типа ВТТ есть все условия для появления химической (активированной) адсорбции, которая не приводит к удалению газа с поверхности металла при росте температуры. Кроме того, в результате химической адсорбции на поверхности металла образуются отдельные атомы и радикалы, которые по своим свойствам отличаются от исходного родительского газа и натрий изменяет свои свойства уже от взаимодействия с этими радикалами [8,9].

Эффект зависания натрия, по-видимому, имеет ту же природу, что и известный всем экспериментаторам эффект приработки ВТТ, который заключается в замет-

ном улучшении ее эксплуатационных характеристик за первые 30÷40 ч работы. Последний, если судить по ряду косвенных признаков, напрямую связан с НКГ, в частности, их десорбцией из металлов.

Процесс исключения из режима циркуляции натрия, имевший место в одном из экспериментов по наработке ресурса, привел к расплавлению оболочки имитатора твэла вследствие осушения его КПС. Осушение, как было выяснено при обработке термометрической информации, было спровоцировано возникшим дефицитом натрия в нижнем коллекторе I контура.

Анализ нескольких наблюдений, подобных проиллюстрированным рис.3 и 4, помог выявить места скопления натрия в I контуре. Ими в моделях подобного типа оказались, как уже указывалось выше, кольцевые зазоры, которые имеются в моделях подобной конструкции в зоне подсоединения к модели ресивера НКГ (см. рис.2), являющегося основным элементом устройства для оперативной откачки неконденсирующихся газов. Часть жидкой фазы натрия «зависает», видимо, также в полостях, образованных тройкой цилиндрических испарителей-конденсаторов.

Правильность такого утверждения была подтверждена специальным экспериментом с впрыском инертного газа в рабочую полость I контура через ресивер (отсутствие натрия в ресивере контролировалось набором специальных термпар). В каждом акте впрыскивался аргон объемом 3см^3 при давлении ~ 0.7 ата. При этом вначале наблюдалось резкое повышение уровня натрия в нижнем коллекторе вследствие обвального поступления его туда, т.е. впрыскиваемый газ провоцировал сброс натрия, скопившегося в кольцевом зазоре, в нижний коллектор.

Вышесказанное демонстрирует рис.4, где три первых момента впрыска НКГ отмечены как t_1 , t_2 и t_3 . Видно, что первый впрыск (t_1) привел к восстановлению уровня в нижнем коллекторе до прежней отметки ~ 39 мм. После чего процесс вывода натрия из режима циркуляции возобновляется, о чем свидетельствует появление отрицательного тренда его уровня. Аналогичная картина наблюдается и при последующих впрысках НКГ в контур. Однако после последнего, пятого впрыска, уровень натрия был практически стабильным до конца эксперимента (~ 1.5 ч, не показанных на рис.4), установившись на отметке ~ 40 мм.

В этом, как и в других схожих экспериментах, была выявлена связь эффекта зависания натрия с количеством НКГ в контуре. Подобные факты косвенно подтверждают предположение, что одна из причин зависания натрия на внутренних элементах зоны конденсации ВТТ связана с изменением свойств жидкости (степени «прилипания») в присутствии НКГ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При проведении экспериментов на тепловых трубах сложной конструктивной формы были выявлены режимы их работы, в которых возможно «зависание» значительных количеств натрия в жидкой фазе в районе конденсатора.

Эффект «зависания» проявляется в том, что часть жидкого теплоносителя (неподвижного) приобретает свойства твердого тела и способна воспринимать не только растягивающие напряжения, но и касательные, т.е. имеется эффект, подобный эффекту «трения покоя». Этот эффект значимо присутствует только в моделях сложных конструкций, где есть полости, зазоры шириной 5 мм и менее, а также другие пространства, удобные для зависания жидкой фазы и имеющие некоторое количество неконденсирующегося газа, что, по нашим наблюдениям, заметно влияет на способность жидкости воспринимать нагрузку в виде касательных напряжений. Нам кажется, что путь для объяснения подобной странности в поведе-

нии натрия следует искать в изменении структуры жидкости на границе с твердым телом (в данном случае ее изменение в сторону увеличения воспринимаемых касательных напряжений) в зоне конденсации I контура, где всегда присутствуют НКГ неизвестного состава.

В целом ряде экспериментов была выявлена связь эффекта «зависания» натрия с количеством НКГ в контуре. Подобные факты косвенно подтверждают предположение, что одна из причин зависания натрия на внутренних элементах зоны конденсации ВТТ связана с изменением свойств жидкости (степени «прилипания» или изменения «трения покоя») в присутствии НКГ, либо в том числе и изменения химического состава НКГ в рабочем объеме модели (не следует упускать из вида, что к НКГ неизвестного состава всегда добавляли инертный аргон).

Характерные времена изменения уровня теплоносителя позволяют определить поведение части жидкого теплоносителя как псевдотвердого тела в процессе пластической деформации под воздействием массовых сил. К сожалению, до конца пока не понята физическая сущности процесса, и что является границей перехода части жидкости из одного состояния (текучая жидкость) в другое (псевдотвердое тело в состоянии «зависания»). Возможно, что на поверхности элементов конструкции в результате химической адсорбции образуются отдельные атомы или радикалы, способные при определенных условиях изменять физические характеристики натрия. Для выяснения причин такого явления необходимы специальные физико-химические эксперименты, однако даже приведенных здесь качественных эмпирических данных достаточно для кардинального пересмотра многих конструктивных решений проекта РИО с натрием.

Список литературы

1. Богомолов В.Н., Замиусский В.Н., Лопатинский В.Н., Рябый В.М., Шулепина Л.А. Информативность уровнемера нижнего коллектора в высокотемпературной тепловой трубе с натрием. - Обнинск: ФЭИ, н/т отчет №9066, тема: 06-06-00/6114, 1995. - 50 с.
2. Богомолов В.Н., Замиусский В.Н. Применение уровнемеров нижнего коллектора ВТТ с натрием для диагностических задач // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 1996. - №4. - С.51-55.
3. Богомолов В.Н., Замиусский В.Н., Лопатинский В.Н., Рябый В.М. Некоторые результаты экспериментальных исследований режимов работы твэла РИО на одностержневой трехконтурной модели. - Обнинск: ФЭИ, н/т отчет №9303, тема: 06-06-00/6114, 1997. - 56 с.
4. Емельянов И.Я., Михан В.И., Солонин В.И. и др. Конструирование ядерных реакторов. - М.: Энергоатомиздат, 1982. - 398 с.
5. Богомолов В.Н., Замиусский В.Н., Лопатинский В.Н. Применение термопарного уровнемера для изучения динамики уровня натрия в нижнем коллекторе ВТТ в режиме с осушением КПС испарителя // Известия вузов. Ядерная энергетика. - 1998. - №2. - С.36-44.
6. Замиусский В.Н. Расчетно-экспериментальные методы идентификации нормальных и аварийных режимов работы ВТТ с натрием. Диссертация на соискание уч. степени канд. техн. наук. - Обнинск: ФЭИ 1998. - 155 с.
7. Дан П.Д., Рей Д.А. Тепловые трубы. - М.: Энергия, 1979. - 271 с.
8. Ворончев Т.А., Соболев В.Д. Физические основы электровакуумной техники. - М.: Высшая школа, 1967. - 352 с.
9. Борисов С.Ф., Балахонов Н.Ф., Губанов В.А. Взаимодействие газов с поверхностью твердых тел. - М.: Наука, 1988. - 198 с.

Поступила в редакцию 28.10.99.

РАСЧЕТНАЯ МОДЕЛЬ ДЛИТЕЛЬНОГО АКСИАЛЬНОГО ПРОДВИЖЕНИЯ ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩЕЙ МАССЫ ПРИ АВАРИИ С РАСПЛАВЛЕНИЕМ ТОПЛИВНЫХ СБОРОК БЫСТРОГО РЕАКТОРА*

Г.Н. Власичев, Г.Б. Усынин

Нижегородский государственный технический университет, г. Н.Новгород



Разработана модель процесса длительного продвижения расплавленной тепло выделяющей массы от активной зоны к напорной камере при аварии с блокировкой отдельной ТВС реактора на быстрых нейтронах. Расчетная модель предназначена для оценки глубины и времени продвижения тепло выделяющей массы. Учитывается отвод тепла в радиальном направлении от тепло выделяющей массы и нижележащих проплавленных материалов в аварийной группе ТВС к соседним неповрежденным ТВС. Для математического описания используется модель нестационарной эффективной теплопроводности.

Процесс развития аварии с мгновенной блокировкой проходного сечения отдельной ТВС при работе реактора на мощности представляет интерес с точки зрения распространения повреждений на соседние ТВС и перемещения вниз расплавленных компонентов. Анализ распространения аварии в радиальном направлении важен для разработки в проекте реактора мер по предотвращению повреждения твэлов в объеме за пределами семи ТВС. Важны также последствия такой аварии для нижележащих конструкций - будет ли расплав удержан внутри аварийных ТВС или проплавит их вплоть до хвостовиков и выйдет на плиту напорной камеры.

При номинальном тепловыделении первостепенное значение имеет аспект распространения аварии в радиальном направлении, которое прекращается при снижении мощности до остаточного уровня после остановки реактора. А значительно более медленное высотное распространение рассматривается для остановленного состояния реактора при остаточном тепловыделении в топливе, когда радиального распространения аварии уже не будет происходить.

К настоящему времени имеются данные по различным аспектам аварии с блокировкой отдельной ТВС быстрого реактора. Результаты испытаний по программе SCARABEE позволяют достаточно хорошо представлять сценарий развития такой аварии. Обсуждение итоговых результатов этой программы имеется в [1, 2, 3]. В

© Г.Н. Власичев, Г.Б. Усынин, 2000

* Данная работа выполнена при финансовой поддержке Конкурсного центра Грантов по фундаментальным исследованиям в области энергетики и электротехники при Московском энергетическом институте (Грант № 84Гр-98).

результате прекращения расхода при полной мгновенной блокировке отдельной ТВС происходит выкипание натрия, плавление оболочек твэлов с образованием стальных блокировок каналов для теплоносителя в области нижней зоны воспроизводства. После перемещения стали плавятся таблетки топлива, образуя расплавленный и затем кипящий бассейн из топлива и стали. Взаимодействия возвращающегося натрия с расплавом вызывают выбросы расплавленных материалов и образование блокировок в верхней части активной зоны. Высокие тепловые потоки от кипящего бассейна к чехлу приводят к плавлению чехлов аварийной и соседних ТВС и проникновению расплава в межчехловые зазоры и в окружающие ТВС. При проплавлении чехла имеет место полная блокировка сталью радиального зазора между ТВС на ранней стадии процесса, которая предотвращает дальнейшее перемещение топлива в зазоре.

При своевременной остановке реактора и соответствующем снижении тепловыделения в топливе до остаточного радиальное распространение аварии прекращается. Возможность обнаружения аварии детектированием запаздывающих нейтронов подтверждается экспериментами программы SCARABEE [3]. При свежем топливе достаточно сильный сигнал может быть получен после повреждения чехла и выхода источников запаздывающих нейтронов в межчехловой зазор с потоком натрия, а также при проникновении расплава в окружающие ТВС с номинальным натриевым потоком. Проникновение расплава в окружающие ТВС с образованием полной блокировки происходит очень быстро - за 1-2 сек. Чтобы избежать распространения аварии за пределы 7 ТВС, реактор должен быть остановлен до достижения кипящего бассейна в этих сборках. При облученном топливе источники запаздывающих нейтронов выносятся к выходу из аварийной ТВС непосредственно после разрыва оболочек твэлов. В этом случае радиальный размер аварии может быть ограничен пределами одной ТВС.

Блокировки каналов для теплоносителя под активной зоной препятствуют течению жидкого топлива вниз и образуют твердое основание для тепловыделяющего бассейна. Для перемещения жидкого топлива в узких каналах для теплоносителя требуется сначала расплавление материалов в области нижних блокировок. После остановки реактора это возможно в случае недостаточного теплоотвода к окружающим ТВС от вышележащей тепловыделяющей массы. Проплавление нижней блокировки отмечалось в эксперименте VE+2 [4]. В экспериментах этой серии отмечалось и некоторое движение нижнего стального бассейна вниз [1]. При проплавлении блокировки расплав будет затекать под действием силы тяжести в каналы между еще твердыми частями твэлов на некоторую длину, затвердевая там и снова образуя слой блокировок. В результате, процесс продвижения расплавленной тепловыделяющей массы вниз будет иметь, как нам представляется, не плавный, а прерывистый характер и будет состоять из ряда повторяющихся этапов: проплавление заблокированного слоя, затекание расплава на некоторую длину и затвердевание, проплавление следующего заблокированного слоя и т.д. При этом основное время будет затрачиваться на проплавление материалов конструкций под опускающейся тепловыделяющей массой. Глубина проникновения расплава в каналы составляет не более нескольких десятков см, а временной масштаб процессов течения и затвердевания - менее 1 с (см. например, [5]), что крайне мало по сравнению со временем, требующимся для расплавления очередного заблокированного слоя.

Для расчета перемещения жидкого расплавленного материала в каналах между твэлами имеется ряд кодов, например: BUCOGEL [6], CRUST [7], а также код [8], основанный на программах TRAMS-TWEL, POST и STRELM. Анализ длительного про-

движения тепловыделяющей массы из активной зоны в направлении днища корпуса за счет проплавления нижележащих конструкций проводился российскими специалистами сначала на основе соотношений теплового баланса, позднее - с помощью программы TRAMS-FDOWN [9], разработанной на основе численного решения одномерного уравнения теплопроводности с явным выделением фазовых границ [10]. В этой модели предполагается плоская граница плавления под тепловыделяющей массой, учитывается одномерное поле температуры в тепловыделяющей массе и в нижележащих материалах. В таком анализе принимается в расчет отвод тепла вниз теплопроводностью нижележащих материалов: воспроизводящего материала, стали, а также натрия. Результаты расчетов продвижения тепловыделяющей массы во всей активной зоне приводились в [11, 12].

В предыдущих расчетных оценках по программе TRAMS-FDOWN продвижение тепловыделяющей массы рассматривалось в значительном числе ТВС при прекращении номинального расхода теплоносителя в активной зоне. В таких расчетах пренебрегалось теплопередачей в радиальном направлении из-за ее незначительности по сравнению с тепловыделением расплавленной массы. При рассмотрении продвижения тепловыделяющей массы в отдельной или в нескольких ТВС следует учитывать теплоотвод к соседним неповрежденным сборкам, охлаждаемым расходом теплоносителя в них. Для учета этого дополнительного фактора потребовалась доработка модели и расчетной программы.

В настоящей работе рассматривается перемещение расплавленной тепловыделяющей массы в одной ТВС (или в небольшой группе ТВС) от активной зоны к напорной камере при аварии с блокировкой отдельной ТВС. Целью анализа является определение глубины и времени ее продвижения. Для математического описания рассматриваемого процесса используется модель нестационарной эффективной теплопроводности. В настоящей версии расчетной методики учитывается отвод тепла в радиальном направлении от тепловыделяющей массы и нижележащих проплавленных материалов к объему соседних неповрежденных ТВС. Исходное двумерное дифференциальное уравнение с анизотропией эффективной теплопроводности в вышеуказанных направлениях решено численно. Используется приближение, в котором распределение температуры рассчитывается в аварийной группе ТВС в направлении продвижения тепловыделяющей массы (сверху вниз), при этом учитываются потери тепла в боковом направлении.

В физической модели принимается, что в начальный момент времени тепловыделяющий материал мгновенно вступает в идеальный контакт с материалами нижней зоны воспроизводства, сохраняющийся в течение всего последующего времени их плавления. Толщина жидкого тепловыделяющего слоя принимается максимальной по условию, чтобы наибольшая температура (в верхней части) была равна температуре кипения. При этом учитывается его утолщение по мере снижения остаточного тепловыделения - за счет конденсации вышенаходящихся паров топлива. В рассматриваемом тепловом балансе принимается в расчет тепловыделение только жидкого слоя без учета сложного обмена с вышенаходящейся двухфазной зоной [13]. Считается, что тепловыделяющая масса ограничивается заданными пределами - аварийной группой ТВС, а через соседние неповрежденные ТВС обеспечивается принудительная циркуляция теплоносителя. Граница раздела между тепловыделяющей массой и нижележащими материалами принимается плоской - без учета фазовых превращений при кратковременных затеканиях расплава в нижележащие межтвэльные и межпакетные промежутки. Предполагается, что по мере проплавления конструкций под активной зоной тепловыделяющая масса будет опускаться вниз через нижнюю зону воспроизводства и зону газовых полостей

твэлов до натрия в хвостовике ТВС. Скорость проплавления будет наибольшей в случае полного удаления плавящегося материала под тепловыделяющей массой так, чтобы ее нижняя поверхность постоянно соприкасалась с твердым материалом проплавления конструкций. В модели используется именно такое консервативное приближение. Расчетная методика позволяет учитывать наличие границы выпаривания натрия под тепловыделяющим материалом, разделяющей область с высокой эффективной теплопроводностью (с жидким натрием в каналах для теплоносителя) и область с низкой эффективной теплопроводностью (область парового пузыря в каналах). В используемом приближении влияние повышенного давления в пузыре на местоположение границы выпаривания натрия не учитывается.

Для математического описания используется расчетная схема с разбиением рассматриваемой области, внутри которой продвигается тепловыделяющая масса, на несколько зон в высотном направлении (рис.1). В соответствии с принятой физической моделью верхняя граница материала под тепловыделяющей массой будет являться одновременно фазовой границей - внешним фазовым фронтом расчетной зоны под массой. Вторым фазовым фронтом в этой зоне будет являться граница выпаривания натрия (внутренний фазовый фронт). Верх тепловыделяющего жидкого слоя рассматривается в качестве внешнего фазового фронта этой зоны.

Для описания передачи тепла внутри каждой зоны в принятой формулировке используется уравнение теплопроводности с δ -функцией:

$$[c(x, r, T) + R_m \cdot \delta(T - T_m)] \cdot \frac{\partial T(x, r, t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [\lambda_z(x, r, T) \cdot \frac{\partial T(x, r, t)}{\partial x}] + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} [\lambda_r(x, r, T) \cdot r \cdot \frac{\partial T(x, r, t)}{\partial r}] + q_v(x, r, t) \quad (1)$$

где x - координата в направлении перемещения ($x = z$); r - радиальная координата; t - время; T - температура; λ_z, λ_r - эффективный коэффициент теплопроводности в высотном и радиальном направлении соответственно; c - эффективная объемная теплоемкость; q_v - удельное тепловыделение (единицы объема); T_m и R_m - температура и эффективная величина скрытой теплоты фазового перехода на внутренней высотной границе раздела фаз.

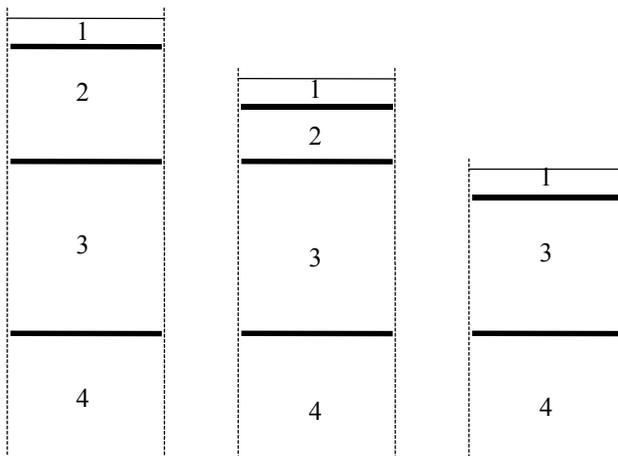


Рис. 1. Расчетная схема процесса проплавления конструкций под активной зоной тепловыделяющей массой: 1 - тепловыделяющая масса; 2 - нижняя зона воспроизводства; 3 - зона газовых полостей твэлов; 4 - зона хвостовиков ТВС

Уравнение (1) описывает передачу тепла как в однофазных областях, так и через границу раздела двух фаз, т.е. учитывает высотное движение внутреннего фазового фронта. Условие Стефана, обычно принимаемое на таком фронте, следует при $x = u$ и, соответственно, $T = T_m$ из одномерного случая уравнения (1) [14, 10]. Внутренним фронтом в рассматриваемой модели является граница выпаривания натрия, для которой $T_m = T_b^{Na}$ и $R_m = R_b^{Na_{eff}}$. В тепловыделяющей массе внутренним фазовым фронтом будет являться граница затвердевания в нижней ее части (образующаяся в начальный момент и исчезающая после разогрева нижележащего сырьевого материала зоны воспроизводства до точки плавления), для которой $T_m = T_m^f$ и $R_m = R_m^f$.

Дифференциальное уравнение (1) дополняется системой граничных условий (ГУ) на высотных границах расчетных зон. На верхней границе тепловыделяющей массы используется ГУ второго рода с нулевой плотностью теплового потока и с учетом скрытой теплоты парообразования:

$$\lambda_f(x, T) \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=X_1^f} = R_b^f \frac{\partial X_1^f}{\partial t}; T(X_1^f, t) = T_b^f. \quad (2)$$

где X_1^f - координата верхней границы тепловыделяющей массы - внешнего фазового фронта; R_b^f - скрытая теплота кипения топлива (единицы объема).

На границе тепловыделяющей массы с нижележащей расчетной зоной используется ГУ четвертого рода с учетом скрытой теплоты плавления материала под массой (при полном удалении расплавляемого материала):

$$\begin{aligned} -\lambda_z^f(x, T) \cdot \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=X_2^f-} + \lambda_z^{down}(x, T) \cdot \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \Big|_{x=X_1^{down}+} = \\ = R_m^{down} \frac{\partial X_1^{down}}{\partial t}; T(X_2^f, t) = T(X_1^{down}, t) = T_m^{down}; \end{aligned} \quad (3)$$

где X_1^{down} - координата верхней границы расчетной области под тепловыделяющей массой (нижней торцевой зоны воспроизводства, зоны газовых полостей твэлов), являющейся внешним фазовым фронтом и контактирующей с топливом; R_m^{down} - эффективная скрытая теплота плавления материала под массой, равная R_{meff}^f в зоне воспроизводства, R_{meff}^c - в зоне газовых полостей. Передача тепла между расчетными зонами под массой (в том числе с натрием в хвостовиках ТВС) описывается ГУ четвертого рода.

Численное решение исходного двумерного дифференциального уравнения теплопроводности с системой граничных условий проведено методом конечных разностей. В решении в принятом приближении используется одномерная пространственная сетка с некоторым достаточным числом расчетных узлов в высотном направлении в аварийной группе ТВС. Каждый контрольный объем принимается в виде плоского круглого слоя с пространственным узлом в радиальном центре. Радиальная граница контрольных объемов определена по внутренним границам чехлов аварийной группы ТВС.

Дискретный аналог дифференциального уравнения (1), полученный методом баланса для неравномерной пространственной сетки с использованием кусочно-постоянных высотных и радиальных профилей температуры на контрольных отрезках, имеет вид:

$$A_{i,k} \cdot T_{i-1,k}^{j+1} - C_{i,k} \cdot T_{i,k}^{j+1} + B_{i,k} \cdot T_{i+1,k}^{j+1} + F_{i,k} = 0. \quad (4)$$

где i - пространственный индекс расчетной сетки в высотном направлении; k - пространственный индекс в радиальном направлении ($k = 1$); j - временной индекс. Коэффициенты (4) определяются как

$$A_i = \frac{\tau}{h_i \cdot h_i} \lambda_{z_{i-1/2}}^{j+1}; B_i = \frac{\tau}{h_i \cdot h_{i+1}} \lambda_{z_{i+1/2}}^{j+1}; C_i = A_i + B_i + c_i^{j+1} \quad (5)$$

$$F_i = c_i^{j+1} \cdot T_i^j + \tau \cdot q_{v_i}^{j+1} - R_m^i \cdot \frac{y^{j+1} - y^j}{h_i} - \tau \cdot \frac{4}{l_k} \cdot q_{r_{i,k+1/2}}^j,$$

где $\tau = t_{j+1} - t_j$; $h_i = x_i - x_{i-1}$; $\bar{h}_i = (h_i + h_{i+1})/2$; $\bar{l}_k = 2 \cdot r_{k+1/2}$; $r_{k+1/2}$ - радиус грани контрольных объемов; y - координата (высотная) фазового фронта. Индекс k опущен во всех формулах (5) за исключением определяющего теплоотдачу в радиальном направлении последнего члена коэффициента F_i .

Аппроксимационное соотношение для радиального теплового потока в расчетных зонах под тепловыделяющей массой записывается в виде:

$$q_{r_{i,k+1/2}} = \lambda_{r_{i,k+1/2}} \cdot \frac{T_{i,k}^j - T_{i,k+1}^j}{l_{k+1}}, \quad (6)$$

где $l_{k+1} = r_{k+1} - r_k$; $r_k = 0$; r_{k+1} - координата внутренней грани чехла соседней неповрежденной ТВС. Для вычисления значений эффективных коэффициентов теплопроводности в высотном и в радиальном направлениях используются формулы из [15] соответственно:

$$\lambda_z = \sum_{p=1}^n \varepsilon_p \cdot \lambda_p; \quad \frac{l}{\lambda_r} = \sum_{p=1}^n \frac{\varepsilon_p}{\lambda_p}, \quad (7)$$

где λ_p - коэффициент теплопроводности p -го материала в расчетной зоне; ε_p - объемная доля p -го материала. Выбор модели параллельного и последовательно суммирования коэффициентов теплопроводности в высотном и радиальном направлениях осуществлен на основании того, что теплопроводящие компоненты под расплавом (воспроизводящий материал, сталь с оболочек твэлов, теплоноситель в каналах между твэлами) располагаются параллельно высотному направлению. Для аппроксимации радиального потока от тепловыделяющей массы используется:

$$q_{r_{i,k+1/2}} = \alpha_{r_{i,k+1/2}} \cdot (T_{i,k}^j - T_{i,k+1}^j), \quad (8)$$

где α_r - коэффициент теплоотдачи от тепловыделяющей массы к теплоносителю окружающих ТВС.

В расчетном анализе продвижения расплавленной тепловыделяющей массы к напорной камере при аварии с полным прекращением расхода в отдельной ТВС быстрого реактора рассматриваются два варианта, соответствующие условиям распространения аварии на 6 соседних ТВС и ограничения аварии пределами одной первоначально аварийной ТВС. В рассматриваемом реакторе ТВС представляет собой шестигранную чехловую трубу с размером 94,5x2,5 мм, внутри которой размещаются 127 твэлов диаметром 6,6 мм. Шаг размещения ТВС в активной зоне 100 мм. Высота нижней торцевой зоны воспроизводства составляет 350 мм, длина газовой полости 670 мм. В расчетах принималось, что тепловыделяющая масса состоит из одного топлива, без стали и воспроизводящего материала, что идет в запас расчета. Плотность тепловыделения в ней принята максимальной, соответ-

ствующей плотности тепловыделения в топливе центральной ТВС. Ее номинальное значение равно $1,82 \cdot 10^9$ Вт/м³. Плотность остаточного тепловыделения спустя 1 с после остановки реактора равна 4,6 % от номинальной мощности. Этот момент принят в качестве начального. Значения геометрических параметров, определяющих долю теплопередачи в радиальном направлении, соответственно двум выше-определенным вариантам, равны:

1) $\bar{l}_k = 29,0$ см; $l_{k+1} = 15,5$ см; 2) $\bar{l}_k = 9,0$ см; $l_{k+1} = 5,5$ см.

Величина коэффициента радиальной теплоотдачи от тепловыделяющей массы к теплоносителю окружающих ТВС рассчитана из теплового баланса эксперимента BF1 с уровнем тепловыделения $0,15 \cdot 10^9$ Вт/м³, при котором максимальная температура в расплаве была близка к температуре кипения [16]. Максимальная по высоте бассейна BF1 величина α_r получена равной $0,07 \cdot 10^4$ Вт/(м²·град). Поскольку размер сборки BF1 в 3 раза меньше ТВС быстрого реактора, такой учет не является достаточно точным. Полученные с помощью представленной модели численные результаты имеют в значительной степени качественный характер и могут рассматриваться как первое приближение.

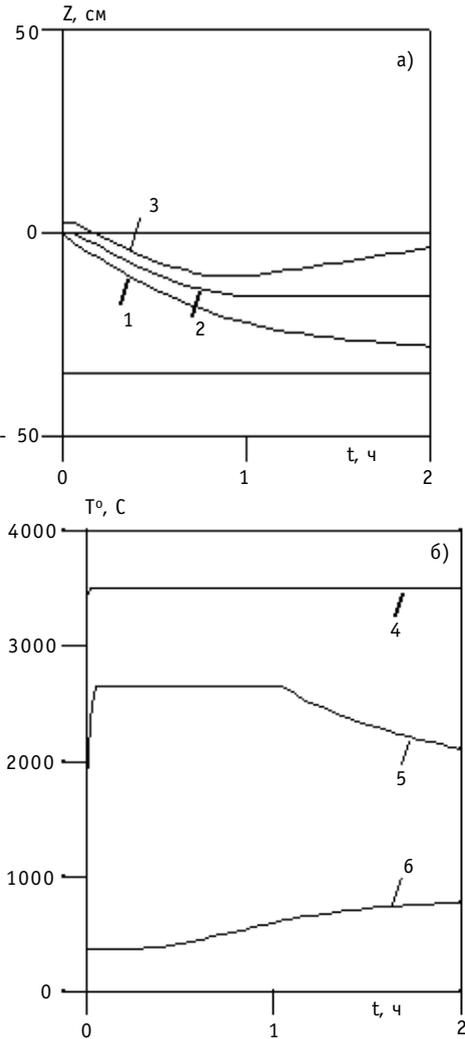


Рис. 2. Результаты расчета продвижения тепловыделяющей массы от активной зоны через нижнюю зону воспроизводства в семи ТВС: а) координаты; б) температура; 1 - глубина выпаривания натрия; 2 - глубина проплавления воспроизводящего материала; 3 - координата верха тепловыделяющего расплава; 4, 5 - температура верха и низа тепловыделяющего расплава соответственно; 6 - температура низа зоны воспроизводства

Расчетные оценки показали значительное замедление продвижения тепловыделяющей массы в ограниченном числе ТВС по сравнению с условиями без боковых потерь тепла. Получено, что в 7 ТВС тепловыделяющая масса проплавляет лишь около 1/3 части нижней зоны воспроизводства, после чего происходит прекращение движения и охлаждение расплавленного топливного слоя с одновременной постепенной конденсацией пара топлива из вышележащего парового объема. Для одной ТВС получено, что при принятых предположениях тепловыделяющая масса совсем не будет плавить нижележащие конструкции. Такой результат для случая одной ТВС качественно согласуется с результатами экспериментов серии BE+ программы SCARABEE, в которых не было движения расплава вниз после остановки реактора.

Результаты расчета движения тепловыделяющей массы в семи ТВС проиллюстрированы на рис.2. Нулевая отметка - нижняя плоскость активной зоны. Показаны глубина выпаривания натрия, проплавления воспроизводящего материала и координата верха тепловыделяющей массы. Про-

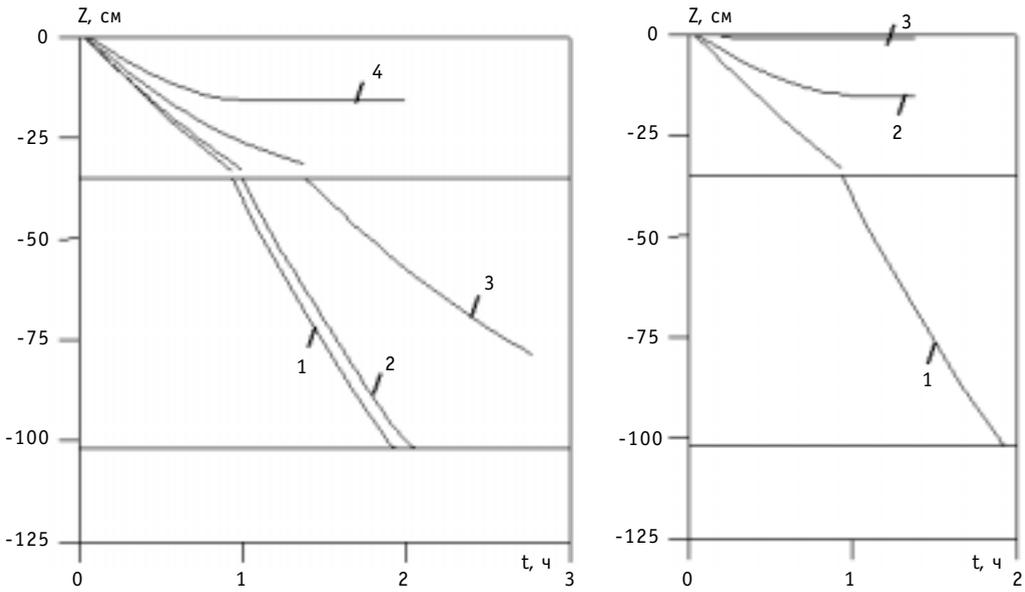


Рис. 3. Глубина проплавления материалов под активной зоной тепловыделяющей массой при разной теплоотдаче к окружающим ТВС: а) в семи ТВС; б) в одной ТВС; 1 - без учета теплоотдачи к окружающим ТВС; 2 - аппроксимация q_r от тепловыделяющей массы формулой (6) при $\lambda_r = \lambda_{LF}$; 3 - $\alpha_r = 0,035 \cdot 10^4$ Вт/(м²·град); 4 - $\alpha_r = 0,07 \cdot 10^4$ Вт/(м²·град)

плавление воспроизводящего материала продолжается, постепенно замедляясь, в пределах одного часа. Толщина слоя топлива продолжает увеличиваться и впоследствии. При этом в соответствии с принятым физическим приближением температура верхней поверхности слоя топлива поддерживается равной температуре кипения, а температура нижней поверхности начинает уменьшаться ниже температуры плавления. Тепловое влияние тепловыделяющей массы в этом случае простирается немногим далее вниз зоны воспроизводства.

На рис.3 приведены результаты оценок чувствительности по отношению к фактору теплоотдачи от тепловыделяющей массы к теплоносителю окружающих неповрежденных ТВС (на рис.3 λ_{LF} - коэффициент теплопроводности жидкого топлива, принятый равным 11 Вт/(м·К) [17]). Видно, что с увеличением интенсивности радиальной теплоотдачи глубина продвижения расплава сильно уменьшается.

Таким образом, разработана приближенная модель длительного продвижения расплавленной тепловыделяющей массы от активной зоны в нижнем направлении при аварии с блокировкой отдельной ТВС реактора на быстрых нейтронах. Теплоотдача в радиальном направлении (теплопроводностью и конвекцией) учтена приближенно в величине коэффициента теплоотдачи, вычисленного из теплового баланса эксперимента BF1 программы SCARABEE. Проведенные численные оценки показывают на высокую чувствительность результатов по отношению к фактору радиальной теплопередачи от расплава. Увеличение интенсивности теплоотдачи в радиальном направлении замедляет движение тепловыделяющей массы и, соответственно, глубину ее продвижения вниз в аварийной группе ТВС. Совершенствование модели будет осуществляться в направлении учета конвективных составляющих в теплопередаче от тепловыделяющей массы.

Список литературы

1. *Papin J., Mac dougall J., Sesny R., Stansfield R., Soussan P.* The SCARABEE total blockages test series: synthesis of the interpretation//Proc. of 1990 Int. Fast Reactor Safety Meet. - 1990. - Vol. 1. - P.367-376.
2. *Kayser G., Charpenel J., Jamond C., Berthoud G., Schleisiek K.* Main SCARABEE lessons and most likely issue of the sub-assembly blockage accident//Proc. Meet. on Sodium Cooled Fast Reactor Safety. - 1994. - Vol. 2. - P.146-155.
3. *Charpenel J., Kayser G., Sesny R., Trapp J.P.* Release of delayed neutron emitters in SCARABEE experiments//Proc. Meet. on Sodium Cooled Fast Reactor Safety. - 1994. - Vol. 2. - P.112-121.
4. *Jones G., Saroul J., Sesny R.* The different APL and BE+ tests within the SCARABEE programme: means used in following and evaluating the evolution of the tests - application to a test of each type//Science and Technology of FAST REACTOR SAFETY: Proc. of an international conference held in Guernsey on 12-16 May 1986. - BNES, London, 1987. - Vol. 2. - P.389-394.
5. *Le Rigoleur C., Hofmann F., Stansfield R.* Review of European out- of-pile tests and analyses of molten material movement and relocation and of molten material-sodium interaction//Proc. IAEA/IWGFR Techn. Committee Meet. on Material-Coolant Interactions and Material Movement and Relocation in LMFR's, June 6-9, 1994, O-arai, Japan. - O-arai Engineering Center, 1994. - P.17-43.
6. *Schwarz M., Miller K., Duret B., Berthoud G., Tattersall R.B.* Propagation of the molten fuel out of a faulted subassembly: the SCARABEE programme and the supporting experiments - preliminary results and analysis//Science and Technology of FAST REACTOR SAFETY: Proc. of an international conference held in Guernsey on 12-16 May 1986. - BNES, London, 1987. - Vol. 1. - P.257-262.
7. *Buksha Yu. and Kuznetsov I.* Current status of investigations on molten fuel-coolant interaction, material movement and relocation in LMFRs in Russia//Proc. IAEA/IWGFR Techn. Committee Meet. on Material-Coolant Interactions and Material Movement and Relocation in LMFR's, June 6-9, 1994, O-arai, Japan. - O-arai Engineering Center, 1994. - P.73-87.
8. *Власичев Г.Н., Усынин Г.Б.* Модель затвердевания перемещающегося расплавленного топлива в каналах под активной зоной при тяжелой аварии быстрого реактора//Известия вузов. Ядерная энергетика. - 1998. - № 3. - С.102-110.
9. *Власичев Г.Н.* Комплекс программ расчета аварийных процессов с плавлением внутрикорпусных материалов быстрого реактора//Атомная энергия. - 1994. - Т. 76. - Вып. 6. - С.459-465.
10. *Власичев Г.Н.* Метод численного решения одномерных задач Стефана двух типов//ИФЖ. - 1993. - Т. 65. - № 3. - С.332-340.
11. *Voronov S.A., Kiryushin A.I., Kuzavkov N.G., Vlasichev G.N.* Evaluation of downmotion time interval molten materials to core catcher during core disruptive accident postulated in LMFR//IAEA/IWGFR Technical Committee Meeting on Material-Coolant Interactions and Material Movement and Relocation in Liquid Metal Fast Reactors, O-arai, Ibaraki, Japan, June 6-9, 1994. - O-arai Engineering Center, PNC, 1994. - P.545-551.
12. *Власичев Г.Н., Усынин Г.Б., Кузавков Н.Г.* Расчетное исследование перемещения расплавленной массы к днищу корпуса при запроектной аварии быстрого реактора//Атомная энергия. - 1994. - Т. 77. - Вып. 3. - С.180-185.
13. *Seiler J.M., Kayser G., Wilhelm D.* Synthesis of research on boiling pool thermalhydraulics at CEA and KfK//Proc. IAEA/IWGFR Techn. Committee Meet. on Material-Coolant Interactions and Material Movement and Relocation in LMFR's, O-arai, Ibaraki, Japan, June 6-9, 1994. - O-arai Engineering Center, PNC, 1994. - P.309-330.
14. *Тихонов А.Н., Самарский А.А.* Уравнения математической физики. - М.: Наука, 1977. - 736 с.
15. *Godbee H.W., Ziegler W.T.* Thermal conductivities of MgO, Al₂O₃ and ZrO₂ powders to 850 °C. II.Theoretical//Journal of Applied Physics. - 1966. - Vol. 37. - №1. - P.56-65.
16. *Camous F., Breton J.P., Blundell C., Moxon D.* SCARABEE - single and two phase natural convection in sodium and molten core materials//Science and Technology of FAST REACTOR SAFETY: Proc. of an international conference held in Guernsey on 12-16 May 1986. - BNES, London, 1987. - Vol. 2. - P.401-406.
17. *Финк Дж., Часанов М., Лейбовиц Л.* Теплофизические свойства двуокиси урана//Атомная техника за рубежом. - 1982. - № 11. - С.20-25.

Поступила в редакцию 15.11.99.

НОВАЯ РУБРИКА

Начиная с первого номера журнала, редколлегия открывает новую рубрику “Из истории ядерной науки и техники”. В этой рубрике мы предполагаем публиковать работы, которые были выполнены до начала 80-х гг. и не были опубликованы по режимным соображениям. В настоящее время такие работы существуют в виде отчетов, с которых уже сняты соответствующие грифы. Конечно, наш журнал не сможет опубликовать все работы. Мы будем придерживаться двух критериев. Во-первых, историческая ценность работы, отражающая вклад российских (советских) ученых в мировую науку. Здесь будут важными и приоритетными соображения, которые, по понятным причинам, не будут иметь юридического значения. Во-вторых, ценность выполненных в те годы работ на сегодняшний день. Идея создания исторической рубрики появилась в связи с представлением в редакцию журнала статьи доктора химических наук, заслуженного деятеля науки и техники Алексея Георгиевича Карабаша. Посвящена изучению повышения направленности взрыва и была выполнена в середине 40-х гг. и до сих пор нигде не публиковалась. Прочитайте работу и почувствуйте дыхание интереснейшего времени создания ядерной военной техники. В ближайших номерах журнала мы надеемся опубликовать еще две-три работы, по поводу которых у нас есть предварительные договоренности с авторами и с соответствующими режимными службами.

Одна из работ - это отчет 40-х гг., выполненный Э.А. Стумбуром и В.А. Малыхом, в котором изложены теоретические основы работы пузырьковой камеры (аналогичные исследования с экспериментальным обоснованием были удостоены Нобелевской премии в начале 50-х гг.).

Главный редактор журнала
Ю.А. Казанский

ПРЕЛОМЛЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН И ПОВЫШЕНИЕ НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ ВЗРЫВА ПРИМЕНЕНИЕМ СОБИРАЮЩИХ ЛИНЗ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

А.Г. Карабаш

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



В статье изложено впервые установленное в 1945 г. явление преломления детонационных волн, проявляющееся в кумулятивном эффекте собирающих «линз ВВ» в системах конденсированных взрывчатых веществ (ВВ), имеющих разные скорости детонации.

Сложный физико-химический процесс детонации бризантных взрывчатых веществ – синхронное сочетание высокоскоростной цепной реакции превращения ВВ и фронта ударной волны, протекает направленно со сверхзвуковой скоростью (5000 - 10 000 м/с).

На основании большого числа экспериментов, в упрощенной теоретической модели, показана главная закономерность явлений при детонации – аналогия с общими законами распространения направленных волновых процессов (законом Снелля и др.).

Экспериментальные данные и новые принципы повышения направленного действия взрыва были учтены в фундаментальных исследованиях при создании РДС – 1.

ПРЕЛОМЛЕНИЕ ДЕТОНАЦИОННЫХ ВОЛН

Известно явление преобразования фронта детонационной волны на границе раздела конденсированных взрывчатых веществ с воздухом, металлами и другими инертными средами: на граничной косоj поверхности заряда ВВ формируется фронт ударных волн и продуктов взрыва, направление которого изменяется в со-

ответствии с соотношением $\frac{D}{u}$, где D - скорость детонации ВВ, u - скорость разлета

продуктов взрыва на границе ВВ с инертной средой.

На этом основан известный кумулятивный эффект у зарядов, имеющих на торце в направлении преграды кумулятивную выемку (воздушную полость) конической или специальной формы. В этой выемке, вне границ заряда ВВ, происходит фокусирование разлетающихся продуктов взрыва и возникших при взрыве ударных волн, формирование кумулятивной струи.

В отличие от этих известных фактов, произведенными сериями опытов было установлено изменение направления фронта - явление преломления детонацион-

ных волн на границе раздела двух конденсированных ВВ. Преломление детонационных волн происходит в быстротекущей химической реакции детонации в массе соприкасающихся ВВ.

Экспериментально исследовано влияние физико-химических и геометрических факторов при этом явлении.

При взрыве зарядов, составленных из двух твердых ВВ, имеющих разные скорости детонации и плоскость раздела, наклонную к общей оси зарядов, на свинцовых плитах был непосредственно зафиксирован след преломленного взрывного луча. В таких опытах (например, № 64) производили взрыв расположенного горизонтально на плите удлиненного заряда (квадратного сечения), составленного из двух частей - тетрила ($D_T = 7500$ м/с) и аммотола ($D_A = 4800$ м/с), соприкасающихся в наклонной плоскости (угол $\alpha = 38^\circ$). При распространении детонации из тетрила в аммотол ось полученного на свинцовой плите продольного углубления преломлялась на границе раздела ВВ и на участке аммотола отклонялась (на 13°) от геометрической оси заряда в сторону нормали к плоскости раздела.

В другой серии опытов взрывали аналогичные заряды цилиндрической формы, составленные из тетрила и аммотола с наклонной плоскостью раздела (угол $\alpha = 37^\circ$), установленные на плитах в вертикальном положении. Образовавшиеся в свинцовых плитах воронки имели резко выраженную асимметричную форму. Вершина воронки, соответствующая максимальному углублению в толстой плите, или пробитое сквозное отверстие в более тонкой плите, оказались смещенными в том же направлении - в сторону нормали к косой поверхности нижнего заряда аммотола, значительно отклоняясь (под углом 10°) от оси цилиндрического заряда и геометрического центра воронки (опыт 65, рис.1).

С целью сопоставления произведены взрывы в вертикальном положении контрольных комбинированных зарядов цилиндрической формы, составленных из тех же ВВ (тетрил, аммотол), но имеющих плоскость раздела, перпендикулярную к оси заряда: при этом воронки получались вполне симметричные, преломления детонационных волн не наблюдалось, как этого и следовало ожидать (опыт 7, рис.3).

Полученные в опытах «отпечатки» на свинцовых плитах, фиксирующие изменение направления максимального действия детонации на границе раздела ВВ, наглядно показали, что преломление детонационных волн происходит при условиях, когда соприкасающиеся ВВ имеют разные скорости детонации и наклонную плоскость раздела; эффект возрастает с увеличением угла между направлением детонационной волны и нормалью к плоскости раздела, до некоторой оптимальной величины этого угла.

По результатам измерений был вычислен, в соответствии с общим физическим законом распространения направленных волновых процессов, «показатель преломления» детонационной волны на границе раздела двух соприкасающихся

$$\text{взрывчатых веществ (1,2): } n_{2-1} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} \cong \frac{D_1}{D_2},$$

где α_1 и α_2 - углы между направлением детонационной волны и нормалью к плоскости раздела двух ВВ, а D_1 и D_2 - соответствующие скорости их детонации.

Получено удовлетворительное совпадение обоих соотношений, рассчитанных по указанным выше опытными данными. Например, в опыте №64 для системы ВВ тетрил-аммотол:

$$\frac{\sin 38^\circ}{\sin(38^\circ - 13^\circ)} = 1,46; \quad \frac{D_T}{D_A} \cong \frac{7500}{4800} \cong 1,56.$$

Как известно, при распространении детонации из одного ВВ в другое нормальная скорость детонации устанавливается лишь на некотором расстоянии от плоскости инициирования, по мере формирования стационарного взрывного процесса. Вследствие этого преломление детонационных волн происходит не точно в плоскости соприкосновения двух ВВ, а в некотором объеме пограничного участка заряда, что можно отчетливо наблюдать по отпечаткам на свинцовых плитах.

Выполненные эксперименты однозначно показали, что эффект преломления детонационных волн зависит как от геометрических условий, так и от физико-химических факторов, определяющих скорость детонации ВВ: от природы соприкасающихся ВВ, от плотности и физического состояния ВВ, присутствия флегматизаторов и т.д. Это подтвердилось опытами. Например, явление преломления наблюдалось как при комбинации разных ВВ, так и при наличии в заряде из одного и того же ВВ (тетрила) участков различной плотности.

Предложенная как первое приближение схема явления не выражает, конечно, всей сложности процесса преобразования фронта детонационных волн на границе раздела двух взрывчатых веществ.

СОБИРАЮЩИЕ ЛИНЗЫ ВВ

На основе установленного явления преломления детонационных волн было предложено и экспериментально испытано применение собирающих линз ВВ для повышения направленного действия взрыва.

Опыты показали, что путем сочетания определенных форм поверхностей раздела различных взрывчатых веществ возможно получить системы ВВ собирающие, концентрирующие взрывной импульс внутри заряда ВВ, или же, наоборот, рассеивающие.

Собирающие линзы из взрывчатых веществ - отливки или запрессовки соответствующей геометрической формы (собирающего типа), помещаемые внутри заря-

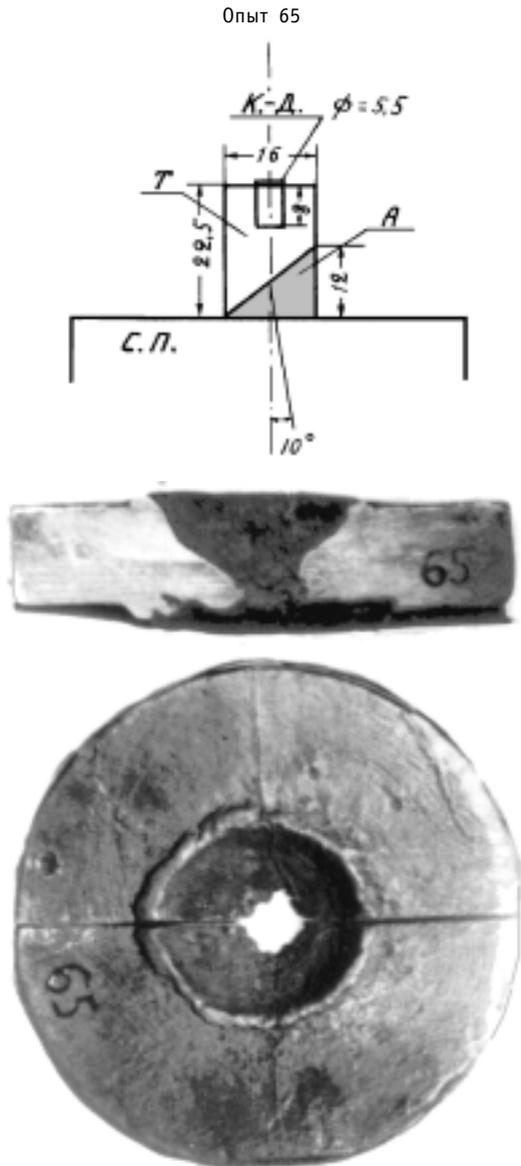


Рис. 1. Преломление детонационных волн на границе раздела двух ВВ (тетрил /аммотол): Т - тетрил прессованный, $\rho_0 = 1,62 \text{ г/см}^3, D_T \cong 7500 \text{ м/с}$; А - аммотол 85/15 прессованный, $\rho_0 = 1,2 \text{ г/см}^3, D_A \cong 4800 \text{ м/с}$; ТНТ - тротил литой, $\rho_0 = 1,6 \text{ г/см}^3, D_{ТНТ} \cong 6700 \text{ м/с}$; К. - Д. - капсюль - детонатор; К.В. - кумулятивная выемка; С.П. - свинцовая плита

да ВВ симметрично его оси и имеющие скорость детонации меньшую, чем ВВ основного заряда.

Следует отметить, что известные в практике комбинированные кумулятивные заряды существенно отличны от зарядов, являющихся предметом данного исследования. Комбинированные заряды обычно составляют из двух частей, причем головную часть (в сторону преграды) изготовляют из наиболее мощного ВВ, в целях максимального использования его действия. В таких комбинированных зарядах эффект кумуляции достигается только за счет кумулятивных выемок - воздушных полостей.

В отличие от этого, в зарядах с линзами ВВ повышение направленного действия взрыва достигается за счет внутреннего (в массе ВВ) кумулятивного эффекта, благодаря тому, что в линзе ВВ плоский фронт детонационных волн искривляется, происходит фокусирование детонационных волн и повышение плотности энергии взрыва по оси заряда.

Этот эффект зафиксирован экспериментом. На тонком металлическом листе, помещенном перпендикулярно торцу цилиндрического заряда в плоскости, совпадающей с его осью, при взрыве фиксировался след газовой струи, причем последняя, в случае зарядов с линзами, была более длинной и сжатой, чем у контрольных зарядов без линз.

Было проведено экспериментальное исследование двух типов зарядов с собирающими линзами ВВ: первый тип - с внутренним кумулятивным эффектом, второй - заряды с двойной кумуляцией. Методика и проведение экспериментов описаны ниже.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Все серии опытов проводили, главным образом, с цилиндрическими зарядами из прессованного тетрила ($\rho_0 = 1,62 \text{ г/см}^3$) в виде стандартных изделий (шашек) заводского изготовления с соответствующим штатным капсюлем-детонатором лучевого действия, расположенным в гнезде на верхнем торце по оси заряда.

Прецизионность производства использованных изделий штатной заводской продукции ВВ, имеющих стандартные характеристики, гарантировала воспроизводимость результатов опытов и сопоставимость их в различных сериях экспериментов.

Линзы изготовляли из прессованного аммотола состава $85\% \text{ NH}_4 \text{ NO}_3 + 15\% \text{ TNT}$ ($\rho_0 = 1,2 \text{ г/см}^3$) или из литого тротила ($\rho_0 = 1,60 \text{ г/см}^3$) и помещали в углублениях, высверленных в тетриловых шашках при помощи шаблона.

Заряды с линзами в средней части составляли из двух половинок, пришлифованных друг к другу и скрепленных бумажной оболочкой (на лаке).

Объем линз варьировался в пределах 5-15% от общего объема заряда.

В каждой серии опытов габариты испытуемых зарядов с линзами, расположение капсюля-детонатора, бумажная оболочка и другие их параметры точно соответствовали размерам и характеристикам контрольных зарядов (без линз), а взрывы и тех и других зарядов производили в идентичных условиях.

Заряды устанавливали вертикально в непосредственном контакте с поверхностью толстых цилиндрических свинцовых плит (из чистого однородного литого свинца), точно в их центре. Плиты располагали на толстом стальном листе.

После взрыва зарядов образовавшиеся в свинцовых плитах воронки подвергали точным измерениям: диаметра (минимального и максимального), глубины и объема, который определяли наполнением водой из калиброванной бюретки до верхнего среза воронки.

Размеры воронок, а также их форма, общий вид и состояние поверхности по-

зволюют судить о величине и характере взрывного импульса в направлении оси заряда.

На рис.2-5 приведены в качестве примеров фотоснимки (выполненные в одинаковом масштабе) разрезанных по диаметру свинцовых плит, которые дают возможность наглядно сопоставлять воронки, полученные после взрыва различных испытуемых и контрольных зарядов.

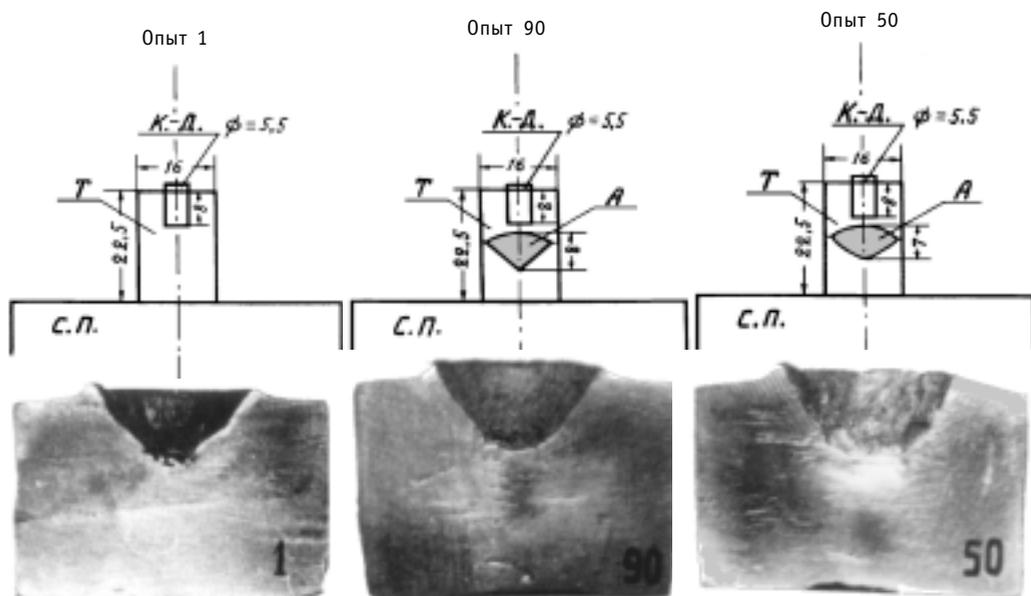


Рис. 2. Повышение направленного действия взрыва собирающими линзами ВВ: опыт 1 – контрольный заряд из тетрила; опыты 90, 50 – заряды из тетрила с линзами из аммотола (в средней части заряда)

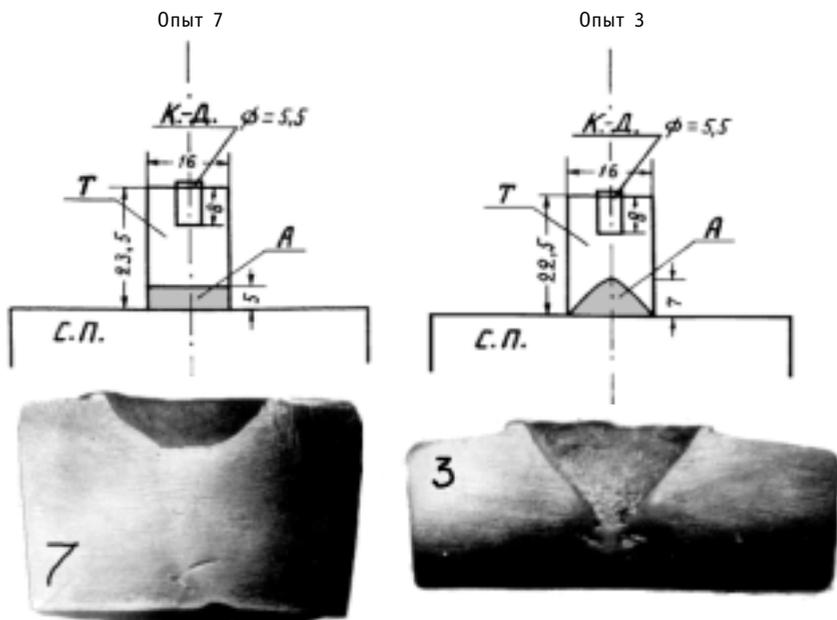


Рис.3. Внутренний кумулятивный эффект собирающих линз ВВ: опыт 7 – заряд из тетрила с участком цилиндрической формы из прессованного аммотола; опыт 3 – заряд из тетрила с собирающей линзой из прессованного аммотола

ИСПЫТАНИЕ ЗАРЯДОВ С СОБИРАЮЩИМИ ЛИНЗАМИ ВВ, С ВНУТРЕННИМ КУМУЛЯТИВНЫМ ЭФФЕКТОМ

Выполнены серии опытов с цилиндрическими сплошными зарядами, у которых линзы ВВ помещали в средней части заряда или у его торца (в контакте с преградой). Многочисленные опыты однозначно показали значительное повышение направленного действия взрыва при устройстве в таких зарядах собирающих линз (плосковыпуклых или двояковыпуклых) из ВВ, имеющих скорость детонации меньшую, чем ВВ основного заряда. Это выражается в увеличении общего объема воронок и их глубины, а также в их своеобразной конической форме, по сравнению с обычными сферическими воронками контрольных зарядов без линз.

Наибольший эффект получен при расположении линз в средней части сплошных зарядов, выпуклой поверхностью в сторону преграды. В случае зарядов из тетрила ($D=7500$ м/с) с такими линзами из тротила ($D=6700$ м/с) или аммотола 85/15 ($D=4800$ м/с) объем воронок увеличился на 40 и 38%, а их глубина на 25 и 20%, соответственно, по сравнению с контрольными зарядами без линз (из одного тетрила).

Для иллюстрации на рис.2 представлено сравнение воронок после взрыва контрольного заряда (опыт 1) и зарядов, имеющих линзы из аммотола (опыты 50,90).

В случае помещения таких же линз в нижней части тетриловых зарядов, получены воронки больше по объему на ~30% и по глубине на 20-15%, чем у контрольных зарядов из одного тетрила.

Примеры этой серии опытов показаны на рис.3 и 4. Здесь также сопоставлены воронки после взрыва тетриловых зарядов, имеющих участки в виде цилиндров и в форме линз из аммотола (опыты 7 и 3, рис.3) и тротила (опыты 94 и 13, рис.4). Наглядно видна эффективность геометрической формы собирающих линз: в случае зарядов с участками цилиндрической формы одинакового веса (вместо линз)

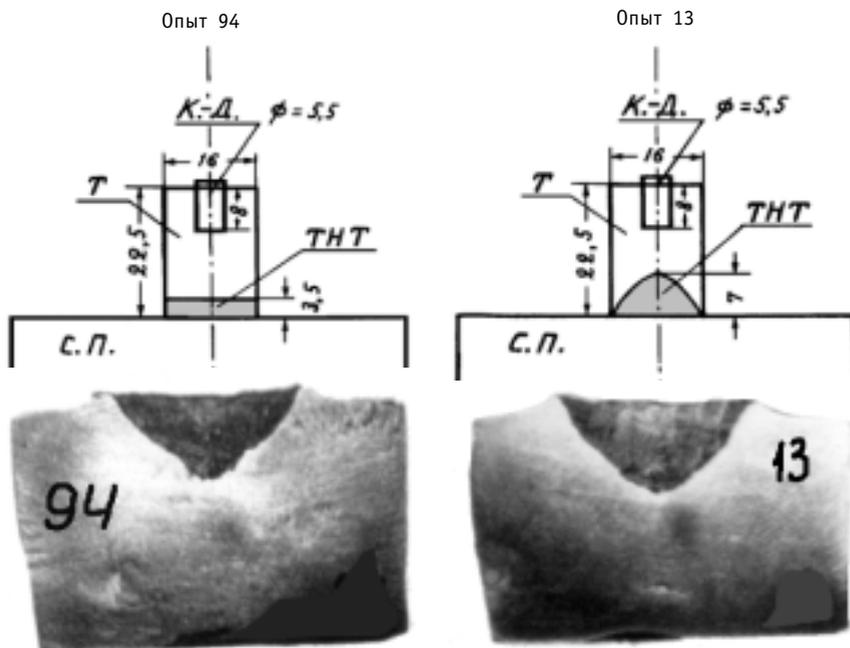


Рис. 4. Внутренний кумулятивный эффект собирающих линз ВВ: опыт 94– заряд из тетрила с участком цилиндрической формы из литого тротила; опыт 13 – заряд из тетрила с собирающей линзой из литого тротила (в нижней части заряда)

характер воронок на плитах свидетельствует об отсутствии кумулятивного эффекта.

Положительный эффект показали собирающие линзы из тетрила малой плотности ($\rho_0=0,70$ г/см³, $D=4500$ м/с) в стандартном тетриловом заряде с плотностью $\rho_0=1,62$ г/см³, $D=7500$ м/с.

Большой интерес представляло использование высокобризантных ВВ **гексогена** ($\rho_0=1,6$ г/см³, $D=8200$ м/с) и **тэна** ($\rho_0=1,69$ г/см³, $D=8400$ м/с). При устройстве в штатных цилиндрических зарядах из этих ВВ линз из тротила ($\rho_0=1,60$ г/см³, $D=6700$ м/с) и аммотола ($\rho_0=1,2$ г/см³, $D=4800$ м/с) были достигнуты **значительные эффекты кумуляции**.

С целью повышения **безопасности** обращения с этими весьма чувствительными ВВ использовались **сплавы 70% гексогена + 30% ТНТ и 70% тэна + 30% ТНТ**. В таких сплавах достигается флегматизирующий эффект.

Сравнительными опытами было показано, что устройством собирающих линз из тротила или аммотола в средней части сплошных тетриловых зарядов достигается такой же или больший эффект повышения направленного действия взрыва (объем и глубина воронки) как и у равных по габаритам кумулятивных тетриловых зарядов с конической выемкой на торце.

Следует обратить внимание на состояние поверхности внутри воронок в свинцовых плитах. Сферические воронки в опытах с контрольными тетриловыми зарядами (без линз) имеют шероховатую темную поверхность. В отличие от этого, воронки, образованные зарядами тетрила с линзами ВВ, имеют гладкую блестящую поверхность оплавленного свинца. Это свидетельствует о значительно более высокой температуре при направленном взрыве зарядов с линзами, чем простых контрольных зарядов, что подтверждает большой внутренний кумулятивный эффект.

ИСПЫТАНИЕ ЗАРЯДОВ С РАССЕЙВАЮЩИМИ ЛИНЗАМИ ВВ

Рассмотренные выше закономерности физико-химического процесса детонации в системах различных ВВ, зависимость от геометрических факторов, дополнены экспериментами, иллюстрирующими глубокую аналогию этих закономерностей с классическими принципами геометрической оптики, общими для волновых процессов.

Проведена серия опытов с зарядами тетрила ($\rho_0=1,62$ г/см³, $D=7500$ м/с), которые по геометрическим и весовым параметрам были идентичны описанным в предыдущем разделе, но имели линзы из аммотола ($\rho_0=1,2$ г/см³, $D=4800$ м/с) рассеивающей формы – плосковогнутые. При взрыве их в единообразных условиях методики на свинцовых плитах получены воронки сферической формы, имеющие значительно уменьшенные – до 50–40 % объем и глубину по сравнению с контрольными зарядами тетрила без линз. Примеры из этой серии представлены в табл.1.

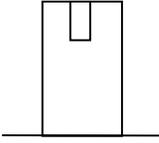
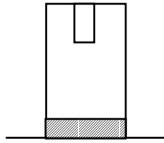
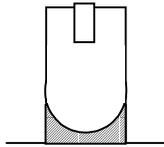
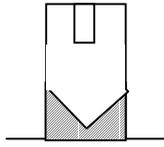
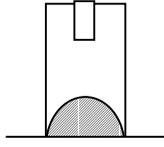
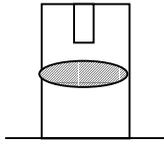
Сопоставление в таблице опытов № 92 и 3-б, как и других аналогичных, подтверждает закономерность, что при расположении линз ВВ вблизи капсуля – детонатора, в средней части заряда, достигается максимальный внутренний кумулятивный эффект детонации.

ИСПЫТАНИЕ ЗАРЯДОВ С СОЧЕТАНИЕМ ВНУТРЕННЕГО И ВНЕШНЕГО КУМУЛЯТИВНЫХ ЭФФЕКТОВ

Произведена отдельная серия опытов с зарядами, в которых линзы ВВ помещались между детонатором и обычной кумулятивной выемкой (воздушной полостью),

Таблица 1

Влияние геометрической формы и местоположения линз ВВ в зарядах на кумулятивный эффект при детонации

№ опыта	Форма линзы	Схема заряда	Сравнение размеров воронок в свинцовых плитах, в %	
			глубина	объем
1 – а	Контрольный заряд тетрила без линзы		0	0
7	Заряд с цилиндрической запрессовкой аммотола		- 27	- 26
21	Рассеивающая линза (сферическая)		- 33	- 42
22	Рассеивающая линза (коническая)		- 40	- 49
3 – б	Собирающая линза из аммотола у торца заряда		+ 20	+ 8
92	Собирающая линза из аммотола в средней части заряда		+ 20	+ 37

имеющейся на торце заряда. В таких зарядах с двойной кумуляцией сочетается обычный кумулятивный эффект (внешний) с внутренним кумулятивным эффектом, обусловленным собирающей линзой ВВ.

В опытах этой серии собирающие линзы из тротила или аммотола (85% NH_4NO_3 + 15% ТНТ) располагались внутри цилиндрических тетриловых зарядов между детонатором и конической кумулятивной выемкой. Как в испытуемых, так и в контрольных тетриловых зарядах, имеющих совершенно одинаковые размеры, кумулятивную выемку конической формы высверливали с помощью шаблона.

Воронки в массивных свинцовых плитах, полученные при взрыве испытуемых зарядов с линзами, имеющими выпуклую поверхность в сторону преграды, были на 20-30% больше по объему и на 10% глубже, чем у контрольных кумулятивных зарядов без линз. Сравните опыты 71 и 37-А на рис.5. Также значительно увеличилась деформация (обжатие) свинцовых плит. Однако общий внешний вид и форма воронок качественно не изменились.

Все эти экспериментальные данные подтверждают, что у зарядов испытанного 2-го типа происходит суммирование двух кумулятивных эффектов - внутреннего, обусловленного линзами, и внешнего.

В специальной серии опытов было испытано влияние формы поверхности соприкосновения двух ВВ на передачу детонации, причем были выбраны наименее благоприятные условия, когда промежуточный детонатор изготовлялся из ВВ с пониженной бризантностью. Детонационную цепь цилиндрического заряда составляли из трех участков: а) тетриловый детонатор со стандартным капсюлем-детонатором лучевого действия; б) промежуточный детонатор из аммотола 85/15; в) основной заряд из тетрила или из сплава 70% гексогена + 30% ТНТ, или из сплава 70% тэна + 30% ТНТ.

При испытаниях таких детонационных цепей в том случае, когда основной заряд (в) соприкасался с промежуточным детонатором (б) по плоской поверхности, перпендикулярной оси заряда, как правило, детонация основного заряда не происходила, хотя промежуточный детонатор и взрывался.

Наоборот, если пограничная поверхность промежуточного детонатора была выпуклой (в форме конуса или полусферы), то во всех опытах детонация основного заряда была полной и наблюдалось нормальное пробивание свинцовых плит.

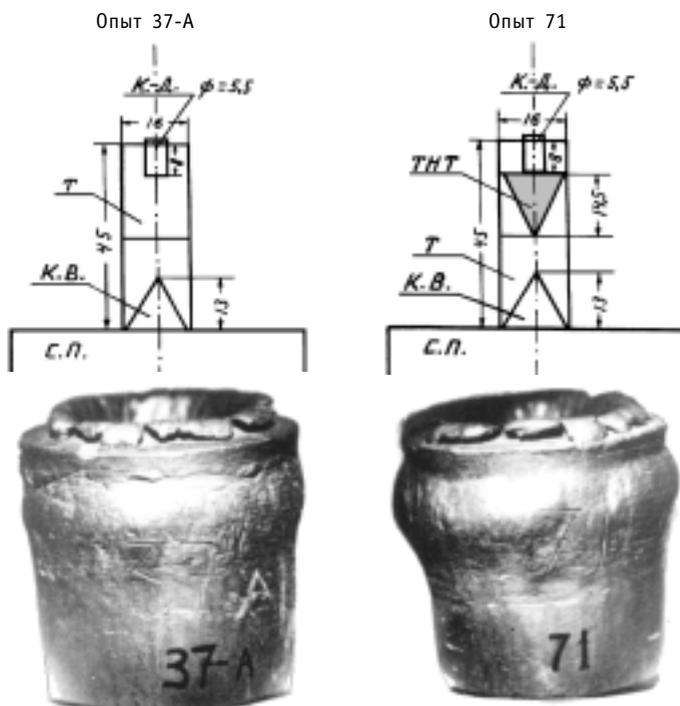


Рис. 5. Суммирование кумулятивных эффектов внутреннего и внешнего при детонации: опыт 37-А – контрольный кумулятивный заряд из тетрила с кумулятивной выемкой; опыт 71 – аналогичный кумулятивный заряд с собирающей линзой из тротила

Эти факты также объясняются изменением фронта детонационных волн в пограничном слое двух ВВ и дают основание для выбора оптимальной формы промежуточного детонатора.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментально установлено явление преломления детонационных волн на границе раздела конденсированных взрывчатых веществ; исследовано влияние геометрических и физико-химических факторов, показавшее соответствие эффекта преломления общим физическим законам распространения направленных волновых процессов.

Для изменения формы фронта детонационных волн внутри зарядов ВВ предложены линзы - отливки или запрессовки соответствующей конфигурации из других взрывчатых веществ, имеющих разную скорость детонации.

Показано, что при устройстве в зарядах ВВ линз собирающего типа (плосковыпуклых, двояковыпуклых, конусообразных) из взрывчатых веществ, имеющих меньшую скорость детонации, чем ВВ основного заряда, достигается значительный эффект повышения направленного действия взрыва.

Наоборот, в случае линз рассеивающего типа, наблюдается противоположный эффект. Предложены два типа зарядов.

1). Цилиндрические сплошные заряды с собирающими линзами ВВ в средней части заряда или у его торца - заряды с внутренним кумулятивным эффектом. Благодаря устройству линз в этих зарядах достигается значительное повышение бризантного эффекта в направлении оси заряда, без снижения фугасного действия.

2). Заряды с двойной кумуляцией, в которых собирающие линзы ВВ помещаются между детонатором и обычной кумулятивной выемкой (воздушной полостью). Показано, что при таком сочетании происходит суммирование двух кумулятивных эффектов - внутреннего и внешнего, благодаря чему достигается существенное повышение направленного действия взрыва.

Результаты исследований изложены в двух отчетах и докладе автора [1], в его диссертации на соискание ученой степени доктора химических наук (гл. 10). В официальном отзыве ИХФ АН СССР (1955) отмечено: «В 1946 г. эта работа была доложена на семинаре отдела взрывчатых веществ Института химической физики АН СССР, где она вызвала большой интерес со стороны специалистов в области взрывчатых веществ (ВВ)... А.Г. Карабаш впервые применил устройство из одного ВВ («линза») для изменения формы фронта детонационной волны в другом ВВ. Термин «линза» прочно вошел в обиход. При помощи «линз» А.Г. Карабашу удалось обнаружить усиление действия взрыва за счет так называемого внутреннего (в массе ВВ) кумулятивного эффекта...» Применение линз ВВ отмечено в работах по созданию РДС-1 [1, 2] и применительно к кумулятивным зарядам [4].

Список литературы

1. *Карабаш А.Г.* Преломление детонационных волн. Повышение направленного действия взрыва применением собирающих линз ВВ: Доклад на семинаре отдела взрывчатых веществ. (Заседание 52, 13 июня 1946 г.). - М.: Институт химической физики АН СССР, 1946.
2. *Круглов А.К.* Как создавалась атомная промышленность в СССР. - М.: ЦНИИ Атоминформ, 1995. - С. 144.
3. *Жучихин В.И.* Первая атомная. Записки инженера-исследователя. - М.: ИздАт, 1993. - С. 27.
4. *Баум Ф.А., Станюкович К.П., Шехтер Б.И.* Физика взрыва. - М.: - Физматгиз, 1959. - С. 477-478.

Поступила в редакцию 23.11.99.

ВИКТОР ВЛАДИМИРОВИЧ ОРЛОВ (к семидесятилетию со дня рождения)



Виктору Владимировичу Орлову, профессору, доктору физико-математических наук, академику РАЕН, лауреату Государственной и Ленинской премий исполнилось семьдесят лет.

Творческая биография этого талантливое человека связана с ядерной энергетикой. После окончания физфака МГУ Д.И. Блохинцев пригласил его на работу в теоретический отдел Лаборатории «В» (теперь ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт), где он проработал с 1953 по 1976 гг.

Теоретические исследования В.В. Орлова по теории ядерных реакторов (резонансное поглощение, теория возмущений, математические

методы оптимизации) и теории переноса излучений нашли свое применение при разработке и обосновании реакторов Белоярской и Билибинской АЭС, а также для судовых реакторов. В это же время он предложил и обосновал перспективные методы регулирования реакторов («выгорающие поглотители»), которые нашли применение в реакторах атомных подводных лодок и тепловых реакторах АЭС. Эти работы были отмечены Государственной премией.

Начиная с 1959 г., Виктор Владимирович всю свою энергию отдает новому направлению – реакторам на быстрых нейтронах. В это время он был руководителем отделения ядерной энергетике, заместителем научного руководителя Физико-энергетического института и научным руководителем работ, которые в 1972 – 73 гг. завершились пуском реактора БН-350, а в 1980 г. – вводом в строй первого промышленного реактора на быстрых нейтронах БН-600, а также разработкой проекта более мощного быстрого реактора БН-800. Работы по реакторам на быстрых нейтронах были отмечены Ленинской премией, одним из лауреатов которой стал и В.В. Орлов.

В 1976 – 1988 гг. Виктор Владимирович работал в Курчатовском институте, где организовывал отделы по разработке энергетического реактора на основе ядерного синтеза и возглавил разработку новых концепций быстрых реакторов (на основе гетерогенных активных зон и по использованию пара и тяжелых металлов в качестве теплоносителей).

В 1988 г. Л.Д. Рябев и Е.О. Адамов пригласили В.В. Орлова на работу в НИКИЭТ в качестве заместителя директора и научного руководителя разработок перспективных ядерных реакторов для АЭС. Здесь В.В. Орлов

организовал получившие широкую известность еженедельные семинары, на которых анализировались идеи и разработки по основным направлениям ядерной энергетики: по концепции развития энергетики на основе быстрых реакторов нового поколения, по экономике ядерной энергетики, по безопасности, топливному балансу и отработавшему топливу, по нераспространению ядерных материалов и т.п. Все это позволило разработать долгосрочную стратегию ядерной энергетики, которая была утверждена коллегией Минатома.

В процессе высокорезультативной личной творческой активности В.В. Орлов внес неординарный вклад в подготовку и воспитание научных кадров и заслуженно может считаться основателем перспективной научной школы в области ядерной энергетики. В течение ряда лет он вел преподавательскую работу в МИФИ и его Обнинском филиале, который позднее стал Обнинским институтом атомной энергетики. Под его руководством защищено более 20 кандидатских и докторских диссертаций.

Известна и активная общественно-научная деятельность В.В. Орлова. В 1989 – 1991 гг. он был вице-президентом и президентом Ядерного общества СССР, а с 1998 г. является председателем НТС №1 Минатома РФ. Кроме того В.В. Орлов много лет является членом диссертационных советов.

Редколлегия журнала, отмечая выдающуюся роль В.В. Орлова в становлении и развитии научно-практических основ ядерной энергетики, сердечно поздравляет его с юбилеем и искренне желает ему дальнейшего физического и творческого долголетия.

Редколлегия журнала

В 2000 г.



**В ОБНИНСКОМ ИНСТИТУТЕ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ
СОСТОЯТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ КОНФЕРЕНЦИИ:**

**МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
“Математическая физика, моделирование и
приближенные методы”,
посвященная академику А.Н. Тихонову.**

Дата проведения - с 15.05 по 19.05 2000 г.

Председатель оргкомитета – академик А.А. Самарский.

Председатель локального оргкомитета - ректор ОИАТЭ, профессор Ю.А. Казанский.

Тезисы не более 300 слов в формате LATEX.

Адрес для контактов:

г. Обнинск Калужской обл., Студгородок, 1. ОИАТЭ. Кафедра ПМ. Проф. В.А. Галкину

Тел./факс: (08439)7-08-22. E-mail: tikhonov@iate.obninsk.ru.

Internet: www.pm.obninsk.ru.

**СТУДЕНЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ
“Радиация и биосфера”,
посвященная 100-летию Н.В. Тимофеева-Ресовского.**

Дата проведения – с 01.11 по 05.11. 2000 г.

Председатель оргкомитета – ректор ОИАТЭ, профессор Ю.А. Казанский.

E-mail: kazansky@iate.obninsk.ru.

ABSTRACTS OF THE PAPERS**УДК 621.311.25:621.039(571.16)**

Nuclear Power Engineering in the Power Supply System of Tomsk | V.N. Mescheryakov, V.I. Boiko, F.P. Koshelev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 6 pages. – References, 7 titles.

A comparison of ecological and economical aspects of coal and nuclear energy usage in the power supply system of Tomsk is made.

Ecological and economical consequences of hypothetical situation when NPP-1 and NPP-2 of Siberian chemical plant would be replaced by heat-power plants working on coal are surveyed.

УДК 621.039.586

The Analysis of Conditions of Transient Process for the De-energization of the Power Unit | A.Yu. Prohodtsev, N.L. Sal'nikov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 7 pages, 1 illustration, 2 tables. – References, 7 titles.

Forming of initial and boundary conditions for usage of the RELAP5 code for an analysis of the transient process under de-energization of the VVER-1000 unit is considered. It is shown that the worst conditions as to the safety in design accidents under de-energization of the unit are formed in the case fast reduction device failure.

УДК 539.17.013

Exact and Numerical Solutions of Nonlinear Thermal Conductivity and Kinetic Equations | V.A. Galkin, M.A. Zaboudko; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 10 pages, 8 illustrations. – References, 11 titles.

The methods of solution of nonlinear thermal conductivity and kinetic equations are considered in this paper. Some exact solutions for Stefan problem are received. Numerical regularization is made on the base of the Galerkin method. Convergence problems are investigated.

УДК 621.039.524.7:621.039.574.5

Heavy-Water Installations in Russia | O.V. Shvedov, A.S. Gerasimov, G.V. Kiselev, V.V. Seliverstov, V.V. Petrunin, V.V. Shidlovsky; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 11 pages. – References, 4 titles.

The review of work of the State Scientific Center of Russian Federation-Institute of Theoretical and Experimental Physics - scientific leader in the heavy-water reactors design is represented in this paper. Results of exploitation of the industrial heavy-water reactor L-2, working in isotopic mode are described. It is informed about the conceptual propositions on the development of new isotopic heavy-water reactor for providing of requirement in radionuclides. The results of examination of subcritical systems for extermination of long-lived radioactive wastage and production of energy are stated.

УДК 519.6, 539.1

Atomic Dynamics of Liquid Potassium and Potassium-oxygen Melt from Data of the Molecular-dynamics Simulation and Inelastic Neutron Scattering Experiments | I.Yu. Shimkevich, M.V. Zaezjev, V.V. Kuzin, A.G. Novikov, V.V. Savostin, A.L. Shimkevich; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetica" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 9 pages, 5 illustrations. – References, 36 titles.

An algorithm and procedure for the molecular-dynamics (MD) simulation of liquid potassium and the potassium-oxygen melts are presented. The results of MD-calculation are compared with experimental data on the inelastic neutron scattering. Such approach is the most effective method for studying structural and dynamical properties of condensed matter on the microscopic level.

УДК 621.039.554.34

Experimental and Numerical Investigations of Mass- and Heat-Exchange Processes under the Loss Coolant Accident \A.D. Efanov, V.V. Lozhkin, B.I. Kulikov, O.A. Sudnitsin, Yu.A. Bezrukov, S.N. Zaitzev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 15 pages, 14 illustrations. – References, 6 titles.

Experimental investigations of thermo-hydraulic characteristics, temperature modes of fuel assemblies simulators and velocities of wetting front under the maximal design accident at the stage of repeated gulf of reactor core are carried out on full-scale models of fuel assemblies of VVER-1000 with 7 and 37 rods. The experiments were conducted on repeated gulf loop of the stand (SVD-1).

УДК 536.24

Turbulizing Influence of Smooth Cylindrical Elements on Intensification of Heat-Exchange of Symmetric Passage Pipe Bundles \A.A. Anisin, A.K. Anisin, V.T. Buglaev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 13 pages, 5 illustrations, 2 tables. – References, 5 titles.

The opportunity is analysed for intensification of heat transfer of transversally streamlined symmetric passage pipe bundles under usage of smooth turbulizing rods sequentially disposed at centers of pipe cells in its arrangement scheme. Realization of the introduced arrangement scheme of pipe elements as a combined surface of the bundle of pipes of different diameters and its heat-air-dynamic characteristics obtained by experimental way, testify to opportunity of practical application of the offered approach to increase the efficiency of pipe heat-exchange devices.

УДК 532.526.4:621.039.534

Diagnostics of Distance up to the Point of Rupture of the Pipe Line using the Change of Hydraulic Characteristics \E.F. Avdeev, V.V. Bolshunova; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 4 pages, 1 illustration, 2 tables. – References, 4 titles.

New approach is developed for finding out the distance up to the point of partial rupture in loop contours or main pipe lines using the change of the hydraulic characteristics under initiation of leak.

УДК 621.039.564.5

Ultrasound Waveguide Multipoint System of Visualisation of Two-phase Coolant \V.I. Melnikov, V.V. Kontelev, V.V. Ivanov, X.-M. Prasser, V. Zippe; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 8 pages, 4 illustrations. – References, 17 titles.

New ultrasonic diagnostic system for high-speed visualization of coolant in pipelines is represented in the paper. The principle of activity, design features and technique of visualization of two-phase streams is described. The results of experimental testing of this system on the thermal-physical stand are given.

УДК 621.039.534.63

Effect of «Hanging» of Liquid Sodium and Its Influence on Operation of Heat Exchangers of an Evaporative - Condensation Type \M.N. Arnoldov, V.N. Bogomolov, O.G. Grigoriev, V.N. Zamusskiy; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 8 pages, 4 illustrations. – References, 9 titles.

Phenomenon of relocation of considerable volumes of liquid sodium stipulated by effect of its «hanging» on interior devices of complex construction high-temperature thermal pipes (HTTP) over contour of the sodium HTTP is described. Influence of this effect on operation of evaporative - condensation systems (ECS) is shown. Necessity of checking of the sodium level for identification of abnormal modes of the ECS connected with drainages of capillary - porous structure of evaporation zone is proved.

УДК 51-72: 621.039.586: 536.42

Calculation Model of Long-Term Axial Advance of Heat-generating Mass under LMFR Accident with Fuel Assemblies Melting \G.N. Vlasichev, G.B. Usynin; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 9 pages, 3 illustrations. – References, 17 titles.

The model is developed for long-term advance of the melted heat-generating mass from the reactor core to pressure head chamber under accident with blocking of separate fuel assembly of fast reactor. The model is intended for estimation of depth and time of advance of the heat-generating mass. The model of a non-stationary effective heat conductivity is utilized for mathematical description. The approximate numerical solution of an initial two-dimensional differential heat conductivity equation with anisotropy in axial and radial directions is obtained. The numerical estimations of the fuel downward propagation from the core in one fuel assembly and in group of 7 fuel assemblies of the fast reactor are carried out.

УДК 534.222.2:662.2

Refraction of Detonation Waves and Increase of Directional Effect of Explosion by Application of Collecting Lenses of Explosive Substances \A.G. Karabash; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 10 pages, 5 illustrations, 1 table. – References, 4 titles.

Phenomenon of refractivity of detonation waves, set in 1945 and revealed itself in a cumulative effect of the collecting lenses in systems of condensed explosive substances with different velocity of detonation, is described in this paper.

The main regularity of the phenomenon under detonation is the analogy to the general laws of distribution of propagation undulatory processes (the Snell law etc.) is shown in the simplified theoretical model on the basis of great number of experiments.

The experimental data and new principles of increasing the directional effect of explosion were taken into account in basic researches at making RDS-1.

НАШИ АВТОРЫ

Е.Ф. Авдеев – к.т.н., доцент, заведующий кафедрой теплофизики Обнинского института атомной энергетики (ОИАТЭ). Область научных интересов: гидродинамические и тепловые процессы в контурах ЯЭУ: турбулентное смешение теплоносителя, гидродинамика струйных мишеней.

М.Н. Арнольдов – д.т.н., профессор, главный научный сотрудник ГНЦ РФ-Физико-энергетического института. Закончил Московский энергетический институт в 1957 г. Область научных интересов: технология жидкометаллических теплоносителей.

В.Н. Богомолов – к.т.н., ведущий научный сотрудник лаборатории технической диагностики ГНЦ РФ-ФЭИ. Закончил Томский политехнический институт, автор и соавтор более 150 научных работ. Область научных интересов: планирование и проведение экспериментов в области диагностирования технического состояния и идентификации аномальных режимов работы реакторных установок.

В.И. Бойко – д.ф.-м.н., профессор, декан физико-технического факультета, заведующий кафедрой «Физико-энергетические установки» Томского политехнического университета.

В.В. Большунова – аспирантка кафедры «Теплофизика» ОИАТЭ, закончила ИАТЭ в 1997 г. Область научных интересов: автоматика и теплотехнические измерения.

Г.Н. Власичев – к.т.н., докторант кафедры «Ядерные реакторы и энергетические установки» физико-технического факультета Нижегородского государственного технического университета (НГТУ). Область научных интересов: тяжелые аварии с расплавлением активной зоны ядерного реактора, тепло- и массообмен.

В.А. Галкин – д.ф.-м.н., профессор, зав. кафедрой прикладной математики ОИАТЭ.

О.Г. Григорьев – заместитель начальника отдела расчетно-теоретических исследований и обоснования разработок реакторных установок ГНЦ РФ-ФЭИ. Закончил Московское высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана в 1983 г. Область научных интересов: разработка конструктивных схем реакторных установок и экспериментальных стендов с жидкометаллическими теплоносителями, теплофизика, теплотехника и гидродинамика этих установок, исследование переходных и аварийных режимов их работы. Соавтор более

20 статей, докладов на конференциях и 80 отчетов ГНЦ РФ-ФЭИ.

М.А. Забудько – аспирант кафедры прикладной математики ОИАТЭ.

В.Н. Замиусский – к.т.н., с.н.с. лаборатории технической диагностики ГНЦ РФ-ФЭИ. Закончил в 1993 г. ОИАТЭ. Автор более 20 публикаций. Область научных интересов: постановка экспериментов, обработка экспериментальных данных в области диагностики ЯЭУ.

В.В. Иванов – к.т.н., доцент кафедры «Ядерные реакторы и энергетические установки» НГТУ. Область научных интересов: исследование двухфазных потоков.

В.В. Контелев – к.т.н., инженер кафедры «Ядерные реакторы и энергетические установки» НГТУ. Область научных интересов: исследование двухфазных потоков; высокоскоростная визуализация.

Ф. П. Кошелев – к.т.н., доцент кафедры «Физико-энергетические установки» Томского политехнического университета.

В.И. Мельников – д.т.н., профессор кафедры «Ядерные реакторы и энергетические установки» НГТУ. Область научных интересов: диагностика двухфазных потоков; разработка и исследование новых систем контроля параметров промышленного оборудования.

В.Н. Мещеряков – заместитель главного инженера Сибирского химического комбината, г.Северск.

Х.-М. Прассер – доктор, глава департамента «Анализ аварийных ситуаций» Института ядерной безопасности, научно-исследовательского центра Rossendorf, Дрезден, Германия. Область научных интересов: нестационарные газожидкостные потоки; исследование двухфазных потоков; высокоскоростная визуализация; электропроводная техника.

Г.Б. Усынин – д.т.н., заведующий кафедрой «Ядерные реакторы и энергетические установки» физико-технического факультета НГТУ. Область научных интересов: безопасность ядерных реакторов, ядерные топливные циклы, оптимизация АЭС.

В. Циппе – доктор департамента «Анализ аварийных ситуаций» Института ядерной безопасности, научно-исследовательского центра Rossendorf, Дрезден, Германия. Область научных интересов: нестационарные газожидкостные потоки; исследование двухфазных потоков; высокоскоростная визуализация; электропроводная техника.

OUR AUTHORS

M.N. Arnoldov – Dr. Sci. (Engineering), Professor, head researcher of the State Scientific Centre of Russian Federation – Institute of Physics and Power Engineering (SSC RF-IPPE), graduated from the Moscow Power Institute in 1957. Scientific interests: physical chemistry of liquid metal coolants.

E.F. Avdeev – Cand.Sci. (Engineering), Associate Professor, head of the thermal physics department of the Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering (OINPE). Scientific interests: hydrodynamics and thermal processes in outlines of NPP: turbulent mixing of coolant, hydrodynamics of jet targets.

V.N. Bogomolov – Cand. Sci. (Engineering), graduated from the Tomsk Polytechnic Institute, leader researcher of the technological laboratory of the SSC RF-IPPE. The author of more than 150 works. Scientific interests: scheduling and carrying out experiments, data interpretation in the field of diagnostics of nuclear reactor installations.

V.I. Boiko – Dr.Sci. (Phys.-Math.), Professor, dean of the physical-technical faculty, head of “Physical Power Installations” department of the Tomsk Polytechnical University.

V.V. Bolchounova – post-graduated student at the thermal physics department of the OINPE, graduated from the OINPE in 1997. Scientific interests: automatics and thermal engineering measurement.

V.A. Galkin – Dr.Sci. (Phys.- Math.), Professor head of the applied mathematics department of the OINPE.

O.G. Grigoriev – deputy chief of department of design-theoretical investigations and justifications of developments of reactor installations in the SSC RF-IPPE. Graduated from the Moscow higher technical school named by N.E. Bauman in 1983. Scientific interests: development of the design schemes of reactor installations and experimental stands with liquid metal coolants, thermal physics, thermal engineering and hydrodynamics of these installations, investigations of transient and emergency modes of their operation. The co-author more than 20 papers, reports on conferences and 80 reports of the SSC RF-IPPE.

V.V. Ivanov – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the nuclear reactors and

power installations department of the Nizhny Novgorod State Technical University (NNSTU). Scientific interests: two-phase flow investigation.

V.V. Kontelev – Cand. Sci. (Engineering), engineer of the nuclear reactors and power installations department of the NNSTU. Scientific interests: two-phase flow investigation; fast visualisation.

F.P. Koshelev – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the department «Physical Power Installations» of the Tomsk Polytechnical University.

V.I. Melnikov – Dr. Sci. (Engineering), Professor of the nuclear reactors and power installations department of the NNSTU. Scientific interests: two-phase flow diagnostics; development and investigation of new devices for control and monitoring of industrial equipment.

V.N. Mescheryakov – deputy chief engineer of the Tomsk Siberian Plant.

H.-M. Prasser – Dr., head of department “Accident Analysis” of the Institute of Safety Research of the Forschungszentrum Rossendorf. Scientific interests: transient gas-liquid flow; gas fraction measurement; fast visualisation; conductivity sensors.

G.B. Usynin – Dr. Sci. (Engineering), professor, head of the nuclear reactors and power installations department of the NNSTU. Scientific interests: reactor safety, nuclear fuel cycles, NPP optimization.

G.N. Vlasichev – Cand. Sci. (Engineering), doctorant of the nuclear reactors and power installations department of the NNSTU. Scientific interests: heavy accidents with core melting, heat- and mass transfer.

M.A. Zaboudko – post-graduate student of the applied mathematics department of the OINPE.

V.N. Zamiusskiy – Cand. Sci. (Engineering), senior researcher of the technological laboratory of the SSC RF-IPPE. The author of more than 20 works. Scientific interests: setting of experiments in the field of diagnostics of nuclear power installations.

W. Zippe – Dr. of department “Accident Analysis” of the Institute of Safety Research of the Forschungszentrum Rossendorf. Scientific interests: transient gas-liquid flow; gas fraction measurement; fast visualisation; conductivity sensors.