

БУБНОВА ТАТЬЯНА АЛЕКСАНДРОВНА

ЖИДКОСТНЫЕ СИСТЕМЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ  
НА РЕАКТИВНОСТЬ КАНАЛЬНЫХ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

05.14.03 – Ядерные энергетические установки, включая проектирование,  
эксплуатацию и вывод из эксплуатации

Автореферат диссертации на соискание  
ученой степени кандидата технических наук

Работа выполнена в Федеральном государственном унитарном предприятии «Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А.Доллежала».

**Научный руководитель** - доктор технических наук, профессор  
ИОНАЙТИС Ромуальд Ромуальдович

**Официальные оппоненты** - доктор физико-математических наук, профессор  
МАЛЫЙ Виталий Петрович  
- кандидат технических наук  
ПЕРЕСАДКО Дмитрий Евгеньевич

**Ведущая организация**

Бубнова Т.А.  
Жидкостные системы  
воздействия на реактивность  
канальных ядерных  
реакторов

Защита состоится

2006

0-00

в заседании диссертационного  
Совета при Техническом  
университете, а/м. ауманская ул.,

У 1751352

**ВОЗВРАТИТЕ КНИГУ НЕ ПОЗЖЕ**  
обозначенного здесь срока

Баумана.

ления, просьба  
., д.5 МГТУ  
2.141.08.

|  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

И.К.

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1751352

Бубнова Т.А. Жидкостные си

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** В настоящее время в России действует 15 энергоблоков АЭС, которые оснащены реакторными установками канального типа, из них 11 энергоблоков с реакторами РБМК. Постоянно возрастающие требования современных отечественных и международных нормативов безопасности влекут за собой необходимость повышения безопасности реакторов РБМК. Одним из направлений повышения безопасности современных ядерных реакторов (ЯР) является увеличение количества систем безопасности и оснащение системами управления запроектными авариями (СУ ЗПА). Одной из таких аварий является отказ стержне-приводной системы останова (СО) реактора. На большинстве реакторов эту проблему решают с помощью жидкостных систем воздействия на реактивность (ЖСВР), построенных на ином принципе действия, чем стержне-приводные СО, что позволяет достичь более высокого уровня безопасности.

Научно-исследовательские работы показывают, что на реакторах РБМК для управления запроектной аварией, связанной с отказом стержне-приводной СО (невод стержней СУЗ в а.з.), необходимо применение средств, обеспечивающих длительное поддержание реактора в подкритическом состоянии. Для этого возможно применение ЖСВР, использующих каналы контура охлаждения системы управления и защиты (СУЗ) для ввода жидкого поглотителя.

Особенность ЖСВР канальных ЯР в том, что используемая в них жидкость является одновременно поглотителем нейтронов и теплоносителем, а так же средой, которая выделяет радиолитические газы, захватывает (эжектирует) и транспортирует их и другие газы в растворенном виде и/или в виде газовых пузырьков по контуру. В связи с этим возникают проблемы обоснования ЖСВР: обеспечение нейтронно-физической эффективности; возможность изменения эффективности во времени при прохождении ЖП через активную зону (а.з.); возможность снижения эффективности ЖП из-за присутствия в нем газовой фазы; изменение высоты столба жидкости в каналах из-за изменения ее плотности; обеспечение вентиляции газовых полостей от радиолитического водорода; изменение водно-химического режима контура СУЗ и коррозионного состояния конструкционных материалов. Данных по принципиальным схемам, расчетным методикам, экспериментальным обоснованиям существующих ЖСВР энергетических ЯР недостаточно для разработки и обоснования таких систем на РБМК из-за особенностей реактора.

В связи с этим актуальны вопросы по разработке ЖСВР и научно-техническому обоснованию ее характеристик и параметров.

Диссертация выполнена в рамках отраслевых работ по договорам с Курской и Ленинградской АЭС, Концерном «Росэнергоатом», его филиалом «Росэнергоатомпроект», ФГУП «Атомэнергопроект».

**Объектом исследования** являются жидкостные системы воздействия на реактивность канальных реакторов.

**Предмет исследования** – принципиальные схемы, технические параметры и характеристики ЖСВР.

**Целями работы** являются:

- создание базы данных о схемах ЖСВР, которые могут быть использованы в РУ РБМК;
- определение научно-технических проблем, связанных с реализацией этих систем на РБМК;
- проведение необходимых экспериментов и расчетных анализов, направленных на обоснование возможности использования ЖСВР на действующих реакторах или в проектах.

Для достижения указанных целей были поставлены и решены следующие **основные задачи**:

- анализ ЖСВР, реализованных на различных РУ, и разработка их классификации; выявление комплекса научно-технических проблем, связанных с реализацией этих систем;
- разработка и обоснование схем ЖСВР для РБМК, использующих для ввода жидкого поглотителя каналы контура охлаждения (КО) СУЗ;
- обобщение результатов физического взвешивания ЖП; определение закономерностей, характерных для исследуемых растворов в каналах СУЗ; разработка инженерной методики оценки эффективности ЖП в каналах разными типами вытеснителей стержней СУЗ;
- реализация модели ввода ЖП в циркуляционный контур и распространения его по контуру с целью выявления факторов, влияющих на эти процессы;
- обобщение существующих эмпирических данных по расходам газа и плотностям двухфазной смеси, образующейся эжекционным способом в каналах с опускным течением, с помощью безразмерных критериев; получение обобщающих зависимостей в критериальном виде;
- разработка инженерных методик определения расхода газа и количества жидкости в каналах ЖСВР, а также определения изменения высоты динамического столба (эжекционное «набухание») в каналах с пленочным течением;
- разработка методик определения технологических параметров ЖСВР;
- выявление особенностей определения дополнительных параметров ЖСВР: теплотехнических, радиолитических, вентиляционных, химико-технологических.

*Методологической основой работы* послужило использование следующих методов научного познания: экспериментальные исследования, анализ и синтез решений. Достоверность научных выводов и практических рекомендаций определяется научно-обоснованным выбором исходных посылок и допущений, используемых при проведении экспериментального и расчетного обоснования ЖСВР, сопоставлением результатов расчетов по разработанным методикам с расчетами по более совершенным методам, а также их сравнением с экспериментальными данными.

По мнению автора, **новыми результатами** являются следующие:

1. Разработана классификация ЖСВР по 18 признакам, позволяющая систематизировать данные по схемам и конструкторским решениям; определен комплекс научно-технических проблем, требующих решения при создании ЖСВР ЯР.

2. Разработана и обоснована схема жидкостной системы удержания реактора РБМК в подкритическом состоянии с вводом ЖП в каналы КО СУЗ.

3. Разработана верифицированная методика оценки поглощающей эффективности водных растворов борной кислоты и нитрата гадолиния в каналах с различными вытеснителями стержней СУЗ на основе обобщенных экспериментальных данных, полученных на критстенде РБМК.

4. Экспериментально исследован процесс ввода ЖП в циркуляционный контур из бака с атмосферным давлением: установлено влияние отношения продолжительности ввода ЖП и времени циркуляции воды по контуру на равномерное распространение ЖП по контуру; определено влияние сопротивления элементов контура на продолжительность истечения поглотителя из бака в контур.

5. Определены безразмерные критерии ( $\beta/Fr_{жв}$ ;  $\beta/\varphi$ ), характеризующие эжекционный захват и перенос газа в вертикальных каналах с опускным течением воды при  $t=10-70^{\circ}\text{C}$  и  $p=0,1-0,22$  МПа. С помощью этих критериев обобщены эмпирические данные по расходам газа и плотностям образующейся газожидкостной смеси, полученные на стендах НИКИЭТ и МГТУ при этих же параметрах.

6. Получены полуэмпирические зависимости  $\beta/Fr_{жв} = f(t)$  и  $\beta/\varphi = f(Fr_{жв})$ , вошедшие в разработанную инженерную методику определения эжекционных параметров (ЭП) каналов {расхода газа и плотности газожидкостной смеси} в диапазоне проектных параметров КО СУЗ реактора РБМК.

7. Показана взаимосвязь параметров ЖСВР, на основе которой разработана методика определения основных параметров этой системы: концентрации, массы и объемов поглотителя, размеров баков и подводящих трубопроводов, продолжительности ввода поглотителя в контур и вывода из контура.

**Автор защищает** приведенные выше научные положения.

### **Практическая ценность работы**

1. Разработанные схемы ЖСВР, использующие для ввода ЖП каналы СУЗ, инженерные методики расчета комплекса ее параметров и характеристик могут использоваться при создании и внедрении ЖСВР на РБМК.

2. Методики определения ЭП и рекомендации могут быть использованы для оптимизации нижней проточной части (ПЧ) каналов быстрой аварийной защиты (АЗ) с пленочным течением охлаждающей воды, с точки зрения обеспечения эффективной вентиляции от радиолитических газов.

3. Созданный научный задел, состоящий из принципиальных схем, методик расчета и расчетных зависимостей, экспериментальных характеристик, может быть использован при создании и обосновании различных ЖСВР.

## **Внедрение результатов работы**

1. Разработанные инженерные методики определения эжекционных параметров использованы для оптимизации проточной части каналов АЗ и их сливных магистралей на энергоблоках РБМК (1-й и 2-й блоки ЛАЭС, 2-й блок КуАЭС) с целью обеспечения невхождения столбов двухфазной смеси в активную зону, и обоснования эффективной вентиляции газовых полостей каналов.

2. Разработанная схема ЖСВР с вводом поглотителя в каналы СУЗ и методы расчета ее параметров использованы:

- в техническом проекте «Жидкостная система подкритичности для 5-го энергоблока Курской АЭС» и в проектной документации, разработанной ФГУП «Атомэнергопроект»;

- в дополнительной системе удержания реактора в подкритическом состоянии, внедренной на 2-ом энергоблоке Игналинской АЭС (Литва).

**Апробация работы.** Основные результаты работ были представлены: на заседаниях секции «Комплексные разработки» научно-технического совета ФГУП НИКИЭТ им.Н.А.Доллежала, на международных научно-технических конференциях «Безопасность реакторов ВВЭР», Подольск, май 2003 г. и «Канальные реакторы: проблемы и решения», Москва-Курчатов, октябрь 2004 г., на отраслевых семинарах «Пассивные системы и водородная безопасность АЭС», Обнинск, октябрь 2003 г., апрель 2004 г.

## **Публикации**

Результаты диссертационной работы изложены в шести статьях, опубликованных в журналах «Атомная энергия», «Атомная техника за рубежом», «Вопросы атомной науки и техники» (Серия: Обеспечение безопасности АЭС), трех докладах, опубликованных в материалах конференций, семи статьях, опубликованных в годовых отчетах ФГУП НИКИЭТ.

## **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, основных выводов и результатов, перечня основных терминов и определений, списка использованных источников. Объем диссертации составляет 201 страница, 58 рисунков, 14 таблиц. Список использованных источников включает 85 наименований.

## **Список условных обозначений**

$d$  – диаметр канала (трубы);  $f$  – площадь;  $H, h$  – высота, уровень;  $\Delta h$  – гидравлические потери;  $Q$  – расход;  $t$  – температура;  $z$  – координата (глубина погружения), степень зеристости;  $V$  – объем;  $C$  – концентрация;  $p$  – производительность очистки;  $P$  – давление;  $w_{ж0}$  – приведенная скорость воды;  $w_{см}$  – скорость газожидкостной смеси;  $\beta$  – расходное газосодержание;  $\delta$  – толщина;  $\phi$  – объемное газосодержание;  $\rho$  – плотность, реактивность;  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения;  $\tau$  – время;  $\Phi$  – нейтронный поток;  $Fr = w/\sqrt{gd}$  – число Фруда.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обосновывается актуальность рассматриваемой проблемы, определен объект исследования, определена цель и поставлены задачи работы, сформулированы положения, определяющие новизну и практическую ценность полученных результатов, перечислены положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** рассмотрены имеющиеся в литературе сведения (схемные решения, конструкционные особенности, экспериментальные исследования) по ЖСВР ЯР различного типа, предложена их классификация.

Анализ существующих решений (рис.1) по ЖСВР показал, что они не применимы для РБМК из-за особенностей реактора. Перспективными решениями для РБМК являются схемы ЖСВР, использующие каналы охлаждения СУЗ и охлаждающую их воду (рис.2).

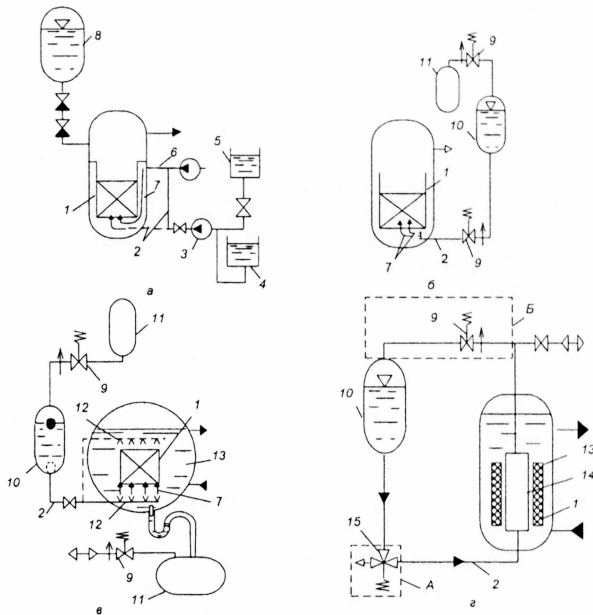


Рис. 1. ЖСВР (реализованные): а-в - с вводом жидкого поглотителя в объем теплоносителя-замедлителя; а-насосами (PWR, ВВЭР); б,в - давлением газа (BWR); в - со сливом замедлителя (CANDU, PHWR); г - с вводом поглотителя в приемные камеры (ПК) (исполнение А-давлением управляющего газа; Б-самотеком): 1 - а.з.; 2- ввод поглотителя; 3 - насос; 4 - бак с ЖП для регулирования; 5 - бак аварийного запаса ЖП; 6 - холодная ветка теплоносителя; 7 -подача поглотителя; 8 - аккумулятор системы охлаждения; 9 - быстродействующий клапан (БКл); 10 - аккумулятор с поглотителем; 11 - ресивер со сжатым газом; 12 - распределительный трубопровод с соплами; 13 - замедлитель; 14 - ПК; 15 - трехходовой БКл.

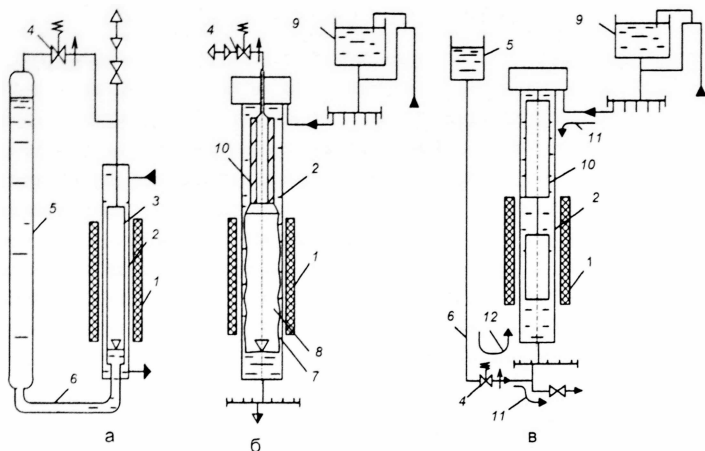


Рис. 2. ЖСВР с вводом поглотителя в отдельные каналы (разрабатываемые): а – в охлаждаемые приемные камеры (ПК); б – в газовые полости (ГП) каналов с пленочным охлаждением, в – в контур охлаждения стержней-поглотителей; 1 – а.з.; 2 – канал; 3 – ПК; 4 – управляющее устройство; 5 – напорный канал-бак с ЖП; 6 – линия ввода ЖП; 7 – пленка охлаждающей воды; 8 – ГП; 9 – бак аварийного запаса охлаждающей воды; 10 – стержень- поглотитель; 11 – подача ЖП в объем теплоносителя; 12 – подача ЖП в обезвоженные каналы по U-образной схеме

Показана важность и необходимость определения характеристик двухфазных течений, образующихся в каналах из-за эжекционного захвата газа, снижающего плотность поглотителя и приводящего к набуханию столба и подъему уровня в а.з., а также обеспечивающего вентиляцию газовых полостей (ГП) и предотвращающего накопление в них водорода.

Проведен анализ результатов экспериментальных исследований двухфазных опускных течений, полученных на стендах НИКИЭТ и МГТУ им. Баумана Крючковым И.И., Шведовым Н.Л., Ганчевым Б.Г., Пересадько В.Г., и существующих методик расчета параметров двухфазного потока (расходное и объемное газосодержания, расход газовой фазы и др.). Обосновывается необходимость проведения экспериментов по исследованию влияния геометрии нижней проточной части на эжекционные характеристики.

Анализируется возможность использования в ЖСВР водных растворов борной кислоты (БК) и нитрата гадолиния (НГ). Обосновывается необходимость разработки расчетной методики для оценки эффективности ЖП в каналах СУЗ с разными типами вытеснителями стержней СУЗ.



Представлены эксперименты по перемешиванию ЖП в корпусных реакторах. Обосновывается необходимость проведения исследований по перемешиванию при вводе поглотителя в циркуляционный контур, применительно к условиям реактора РБМК.

Определены научно-технические проблемы, требующие решения при создании и разработке ЖСВР: обеспечение быстродействия, перемешивание, попадание газа в объем реактора; возможность эжектирования воздуха текущей жидкостью, нейтрализация продуктов радиолиза, изменение водно-химического режима; оптимизация способов вывода ЖП из активной зоны, контроль работоспособности (рис.3). В конце главы даны выводы и сформулированы цели дальнейших исследований.

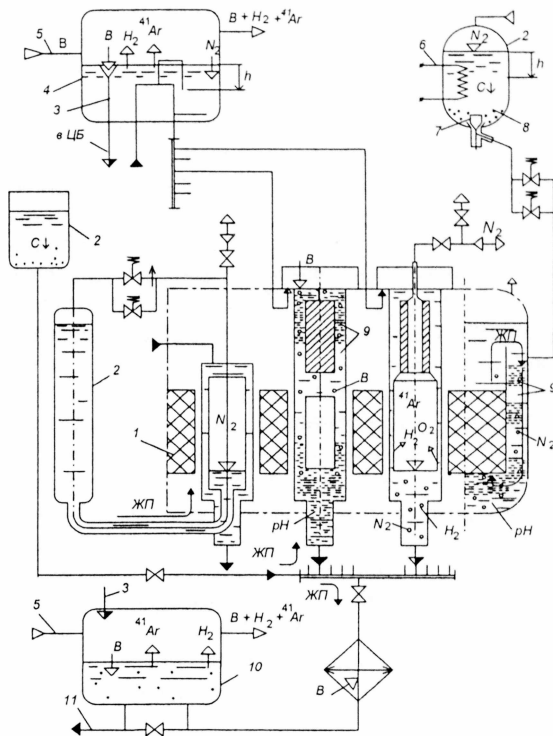


Рис.3. Процессы, происходящие в ЖСВР: 1 – активная зона; 2 – бак-аккумулятор с ЖП; 3 – переливная труба; 4 – напорный бак; 5 – вентиляция; 6 – нагреватель; 7 – газоотсечное устройство; 8 – выпадение поглотителя в осадок; 9 – чередование участков с разной концентрацией («зебрисость»); 10 – циркуляционный бак; 11 – линия подачи к насосам; ЖП – направление ввода жидкого поглотителя;  $C\downarrow$  – снижение концентрации поглотителя;  $^{41}\text{Ar}$  – аргон;  $\text{H}_2$  – водород;  $\text{N}_2$  – азот;  $\text{O}_2$  – кислород; В – воздух.

**Во второй главе** проводится анализ различных схем и конструкторско-технологических решений ЖСВР, предлагаемых для РУ РБМК, и которые могут использоваться для управления ЗПА, связанной с отказом основной стержне-приводной СО. Показано назначение и место таких ЖСВР в структуре СО РУ РБМК. Они могут входить в состав дополнительной СО реактора, как системы длительного поддержания подкритического состояния, дополняющие быстродействующую часть, а так же являться самостоятельными системами, относящимися к СУ ЗПА, и вводимые в действие на остановленном реакторе после срабатывания аварийной защиты. Рассматриваются и обосновываются две принципиальные схемы ЖСВР, наиболее приемлемые с точки зрения простоты и возможности реализации на реакторах РБМК, и использующие для ввода поглотителя каналы СУЗ, температура воды в которых составляет 45-70<sup>0</sup>С, давление – 0,1-0,35 МПа. Одна схема основана на вводе растворов борной кислоты или нитрата гадолиния в каналы СУЗ (рис.2в), другая – на вводе столбов воды (рис.2б).

Наиболее близкой к реализации является схема, в которой ЖП самотеком вводится в КО СУЗ из баков с атмосферным давлением в сливной трубопровод циркуляционного контура с избыточным давлением меньшим 0,1 МПа. При этом баки размещаются выше верхнего уровня а.з. Такая схема позволяет осуществить ввод ЖП в каналы в двух режимах: без циркуляции - при остановленных насосах СУЗ с заполнением обезвоженных каналов СУЗ по U-образной схеме; с циркуляцией по КО СУЗ - при работе насосов СУЗ. Для обеспечения ввода ЖП в режиме без циркуляции реактор должен быть охлажден до температуры графита ≤100<sup>0</sup>С. Это необходимо для того, чтобы не происходило вскипание раствора поглотителя, находящегося в каналах.

Проанализированы возможные способы отключения баков с ЖП от КО СУЗ. Для повышения надежности срабатывания системы наиболее целесообразно использование двух параллельных задвижек, отсекающих баки с ЖП от КО СУЗ. Для снижения вероятности ложного ввода ЖП подводящий трубопровод может быть выполнен с конструкционным разрывом, который восстанавливается перед вводом ЖП в контур. Другой способ снижения вероятности ложного срабатывания - сухое хранение поглотителя, что позволяет снизить вероятность ложного ввода ЖСВР и сохранить надежность срабатывания. Подача ЖП в контур по двум независимым веткам обеспечит более надежную работу ЖСВР чем, если подача будет производиться по одной ветке. Рассмотрены способы обеспечения необходимой скорости ввода ЖП: насосом или действием гидростатического напора (самотеком).

Показаны способы вывода растворенного в воде поглотителя нейтронов: водообменом; штатной системой очистки воды; комбинацией этих способов.

Особенность предлагаемых схем ЖСВР для РБМК заключается в максимальном использовании элементов штатного оборудования РУ: трубопроводов, баков, средств контроля, системы водной очистки.

**В третьей главе** представлены экспериментальные исследования: влияния формы проточной части на эжекционные параметры; нейтронно-физической эффективности растворов нитрата гадолиния в каналах СУЗ; процессов ввода ЖП в циркуляционный контур и его перемешивания; описаны экспериментальные стенды, методики проведения экспериментов по получению необходимых опытных данных; результаты экспериментов и их анализ.

Эксперименты по исследованию влияния формы проточной части проведены на полномасштабном стенде-модели СУЗ РБМК (НИКИЭТ) с прозрачным каналом. Эжекция газа в полость канала осуществлялась через газовую трубку в крышке канала из атмосферы. Для измерения объема захватываемого газа к этой трубке был подключен газовый барабанный счетчик с жидкостным затвором (ГСБ-400). Пленочное течение воды по стенкам канала обеспечивалось штатными элементами ИМ АЗ. Исследовалась нижняя проточная часть канала, образуемая внутриканальной опорой, обеспечивающей поступление воды, стекающей в виде пленки по стенкам канала, в его центральную часть через боковые пазы. Результаты экспериментов получены в диапазоне расходов воды 3,6-5,0 м<sup>3</sup>/ч и  $t=20-24^{\circ}\text{C}$  при размещении уровня воды в проточной части с эквивалентными диаметрами 46 мм, 72 мм и 84 мм. Предельная относительная погрешность определения расхода газа составила  $\pm 15\%$ . Разброс значений относительно среднеарифметического составил  $\sim 6-35\%$ . Полученные результаты для опоры с кольцевым подводом эжектируемого газа сравнились с полуэмпирической зависимостью расхода газа от приведенной скорости воды при  $t = 24^{\circ}\text{C}$  в экспериментах НИКИЭТ с центральным подводом эжектируемого газа. Сравнение этих данных позволяет сделать вывод, что способ организации прохода эжектируемого газа к месту его захвата жидкостью не влияет на эжекционные характеристики канала, которые, главным образом, зависят от скорости жидкости, чем она больше, тем больше расход эжектируемого газа, и наоборот.

Эксперименты по взвешиванию водных растворов НГ разных концентраций в канале СУЗ проводились на критсборке стенда РБМК (РНЦ «Курчатовский Институт»). Влияние концентраций НГ в растворе на эффективность канала СУЗ с вытеснителем и незагруженного канала представлено величиной приращения реактивности при добавлении в воду разного количества НГ. Относительная погрешность измерения значений реактивности оценена в  $\sim 3\%$ . При сопоставлении результатов взвешивания природной БК и НГ предположен одинаковый ход зависимости их эффективностей от концентрации при соотношении концентраций 10 г/л : 1,5 г/л, соответственно. Для определения влияния толщины кольцевого зазора ( $\delta$ ) в канале, заполняемого ЖП, на его эффективность ( $\rho$ ) приятно допущение линейной зависимости между  $\rho$  и  $\delta$  (рис.4).

Сделан вывод, что при  $\delta < 4$  мм на поглощающую способность поглотителя сильно влияет его объем, а при  $\delta > 4$  мм влияние объема незначительно (см.рис.4).

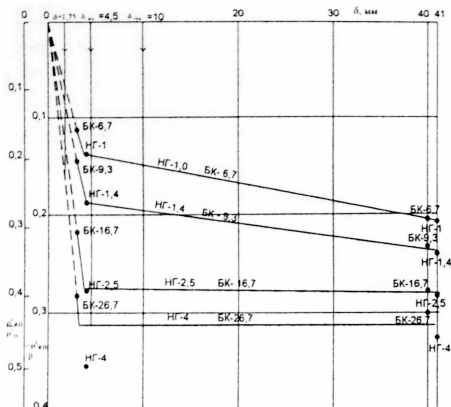


Рис.4. Влияние толщины кольцевого зазора с ЖП на его физическую эффективность: НГ – нитрат гадолиния; БК – борная кислота. • - экспериментальные значения. На поле указаны концентрации ЖП, г/л.

Вытеснители существующих стержней СУЗ имеют различные по высоте диаметры, поэтому для упрощения расчетов предложено использовать эквивалентный зазор ( $\delta_{эк}$ ) (см.рис.4), который представляет собой кольцо толщиной, постоянной по всей длине канала, и в котором размещен весь объем жидкости, находящийся в канале с вытеснителем в области активной зоны.

Эксперименты по вводу ЖП в циркуляционный контур и перемешиванию проводились на полномасштабном гидродинамическом стенде - модели контура СУЗ-РБМК с прозрачным каналом и трубой для ввода ЖП в контур из бака. Бак с поглотителем размещался на высоте 36-37 м относительно места его ввода в контур. Температура воды в контуре и баке составила - 7-25<sup>0</sup>С, расходе воды через канал - 3 м<sup>3</sup>/ч, объем циркулирующей в контуре воды - 0,16 м<sup>3</sup>, а объем вводимого в контур поглотителя – 0,016 – 0,024 м<sup>3</sup>. Для визуализации процессов перемешивания и распространения поглотителя по контуру использовался водный раствор нигрозина.

Исследовалось влияние продолжительности (времени) ввода поглотителя в контур, а также объемов и расходов вводимого поглотителя на равномерность перемешивания. Для характеристики распространения поглотителя по контуру введено понятие «времени полного оборота»( $\tau_{по}$ ) объема контурной воды, участвующей в циркуляции:  $\tau_{по} = V_K / Q_K$ , где  $V_K$  – объем воды контура,  $Q_K$  – расход воды в контуре. В ходе исследований время ввода ЖП в контур ( $\tau_{жп}$ ) принималось меньшим, равным и большим  $\tau_{по}$ . Выводы о степени равномерности рас-

пространения и перемешивания поглотителя с контурной водой делались по стабильности окраски контурной воды, проходящей по каналу.

Основные выводы по эксперименту:

- на время ввода поглотителя влияют гидравлические сопротивления трубы, подводящей ЖП, и трубы, соединяющей контур с напорным (дыхательным) баком (НБ);

- на равномерность распространения ЖП по контуру влияет соотношение  $\tau_{жп}$  и  $\tau_{по}$ .

Для определения времени ввода ЖП в контур предлагается использовать выражение для расчета времени опорожнения бака с переменным уровнем. При этом коэффициент гидравлического сопротивления, входящий в это выражение должен включать сопротивления подводящей ЖП трубы и трубы, соединяющей контур с НБ. Разница расчетных и экспериментальных значений продолжительности ввода при этом составила  $\pm (5-10)\%$ .

Равномерность перемешивания предложено численно характеризовать степенью «зестристости» ( $z$ ):  $z = \tau_{жп} / \tau_{по}$ . Для равномерного перемешивания поступающего в контур поглотителя необходимо, чтобы  $z \geq 1$  (рис.5).

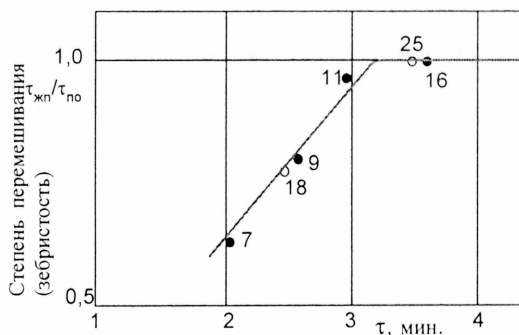


Рис.5. Влияние времени ввода ЖП на равномерность перемешивания:

● -  $\tau_{по} = 3,2$  мин.; ○ -  $\tau_{по} = 3,4$  мин. На полях указаны вводимые объемы ЖП, л.

**В четвертой главе** представлены инженерные методики определения параметров ЖСВР: эжекционных (расхода эжектируемого газа, плотности газожидкостной смеси) и величины набухания динамического столба в каналах с опускающим течением; эффективности ЖП в каналах СУЗ при различных концентрациях и типах вытеснителей стержней СУЗ; технологических – массы и объема поглотителя, скорости его ввода и вывода; тепловых, водно-химических, радиолитических.

В основу модели определения величины эжекции газа в канале с пленочным течением легли следующие положения:

- образование двухфазных смесей эжекционным способом состоит из двух последовательных процессов - захват газа жидкостью и унос пузырьков газа потоком;
- при эжекции газа, которая начинается при приведенных скоростях воды  $w_{ж0}=0,13-0,16$  м/с, образуется два режима течения: режим ЗГФ, характеризующийся малым расходом эжектируемого газа (до 200 л/ч); режим опускного спутного движения жидкой и газовой фаз;
- в режиме спутного течения весь захваченный газ уносится потоком жидкости, поэтому в качестве параметра, характеризующего захват газа, предложено использовать расходное газосодержание  $\beta$ ;
- величина уноса пузырьков газа текущей жидкостью определяется критерием Фруда по приведенной скорости течения:

$$Fr_{ж0} = w_{ж0} / \sqrt{gd}, \quad (1)$$

где  $d$  - диаметр канала (участка где происходит эжекционный захват), м;  
 $w_{ж0}$  - приведенная скорость течения, м/с;  $g=9,8$  м/с<sup>2</sup> - ускорение свободного падения.

Для обобщения экспериментальных данных по эжекционному захвату газа разных авторов предложен безразмерный комплекс  $\beta / Fr_{ж0}$ , зависящий от температуры и характеризующий величину эжекционного захвата газа. Имеющийся массив экспериментальных данных с относительной погрешностью  $\pm 11\%$  аппроксимируется зависимостью этого комплекса в функции температуры (рис.6):

$$\beta / Fr_{ж0} = 1,515e^{-0,0525t} \quad (2)$$

Экспериментальные данные по объемному и расходному газосодержаниям опускных двухфазных течений удовлетворительно обобщаются зависимостью безразмерного симплекса  $\beta/\phi$  от критерия Фруда ( $Fr_{см} = w_{см} / \sqrt{gd}$ ), рассчитанного по скорости смеси  $w_{см}$  (рис.7). Полученная зависимость позволяет определить плотность смеси ( $\rho_{см}$ ) опускного потока по известным  $\beta$  и  $Fr_{см}$ .

Зависимость  $\beta/\phi=f(Fr_{см})$  (см. рис.7) хорошо согласуется с расчетом по формуле для определения  $\phi$  в опускных течениях со спутным движением фаз, полученной Ганчевым Б.Г. в диапазоне параметров  $p = 0,1-0,22$  МПа,  $t_{ж}=4-60^{\circ}\text{C}$ ;  $Fr_{см} = 0,44-1,67$ . Полученная зависимость также достаточно хорошо согласуется с экспериментальными данными по  $\phi$ , полученными Пересадько В.Г. при  $t_{ж}=20-50^{\circ}\text{C}$  в каналах ( $d_k=80$  мм) с пленочным течением в режиме ЗГФ. На основании чего сделан вывод о возможности использования полученной зависимости (см.рис.7) для оценки  $\rho_{см}$  в режиме ЗГФ в каналах с пленочным течением.

Рассмотрен также режим опускного течения с чистым зависанием газовой фазы, когда отсутствует унос газа жидкостным потоком (т.е.  $\beta=0$ ), и который существует при  $w_{ж0}\leq 0,25$  м/с. На основе экспериментальных данных Пересадько В.Г. по этому режиму для определения  $\rho_{см}$  предложена зависимость  $\phi$  от безразмерной скорости  $w_{\phi} = w_{ж0} / \left[ 1,53 \cdot \sqrt{\sigma g / (\rho_{ж} - \rho_{г})} \right]$ .

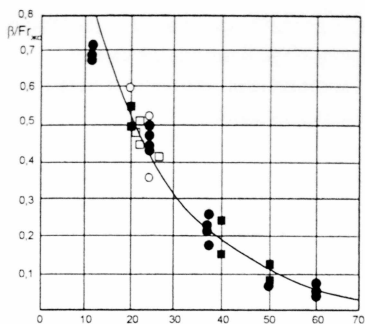


Рис. 6. Обобщенные данные по влиянию температуры на эжекционный захват газа: ●, ▲, △ -  $d_k = 44, 71, 84$  мм; ■ - 52 мм; □ - 82 мм; ○ - 46 мм

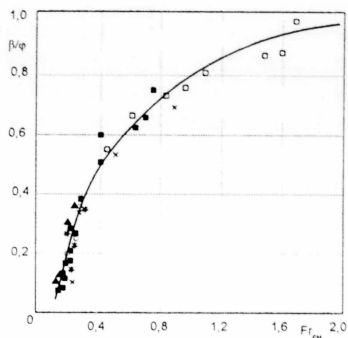


Рис.7. Зависимость симплекса  $\beta/\phi$  от числа Фруда  $Fr_{см}$  для опусного течения: ● -  $d_k = 40$  мм; ○ - 52 мм; ■, □ - 82/74 мм (кольцевой зазор); ▲ - 82 мм; △ - 82 мм; x - расчет \* - режим ЗГФ.

Представленные на рис.6-7 полуэмпирические зависимости включены в методику расчета расхода эжектируемого газа и плотности газожидкостной смеси, образующейся в вертикальных каналах с опусным течением в режиме спутного движения фаз и в режиме ЗГФ. Исходные данные этой методики: расход и температура воды, геометрические размеры проточной части. Критерием применимости методик явилось удовлетворительное совпадение расчета по методике (сплошные линии, рис.8) и экспериментов (точки, см.рис.8).

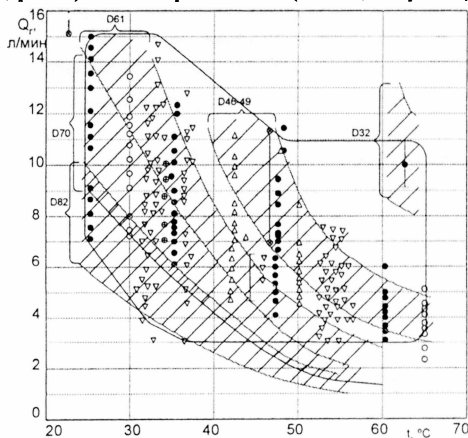


Рис.8 – Зависимость расхода эжектируемого газа в каналах АЗ РБМК от температуры: — - расчетные значения при  $Q_{ж}=3,6-4,5$  м<sup>3</sup>/ч; точки – замеры на АЭС. На полях указаны возможные диаметры проточной части канала, мм.

Эжекционное «набухание» (повышение) столба воды в каналах с пленочными течением происходит из-за уменьшения плотности водовоздушной смеси.

В режиме ЗГФ «набухание» происходит из-за уменьшения плотности воды в канале, а относительное «набухание» определяется выражением:

$$\Delta h_{\text{нб}} = \rho_{\text{ж}} / \rho_{\text{см}} - 1. \quad (3)$$

В режиме спутного движения фаз в газожидкостном потоке эжекционное «набухание» происходит из-за увеличения потерь напора в сливных магистралах. Используя гомогенную модель течения двухфазной смеси в сливных трубопроводах относительное «набухание» составит:

$$\Delta h_{\text{нб}} = 1 / (1 - \beta)^2 = (\rho_{\text{ж}} / \rho_{\text{см}})^2 - 1. \quad (4)$$

В зависимости от режима течения ожидаемый уровень в канале с двухфазной смесью, характеризующейся  $\rho_{\text{см}}$ , будет на  $\Delta h_{\text{нб}}$  (3), (4) выше уровня, рассчитанного без учета образования двухфазной смеси. Разработана инженерная методика для определения уровня в канале с пленочным течением, использующая представленные выше положения по «набуханию» столба.

Для оценки эффективности ЖП ( $\mathcal{E}_{\text{жп}}$ ) в каналах СУЗ разработана методика, использующая обобщенные данные по эффективности растворов БК и НГ в каналах в зависимости от концентрации ЖП и толщины заполняемого им кольцевого зазора (см.рис.4). В методике приняты следующие положения: ЖП эффективен только в области вытеснителя; геометрия водного пространства вокруг вытеснителя заменяется на кольцевые зазоры толщиной  $\delta_{\text{эвб}}$ , соответствующие типу применяемого на РУ стержня СУЗ. Эффективность ЖП ( $\rho_{\delta}^{\text{ш}}$ ) в штатном канале СУЗ с  $\delta_{\text{эвб}}$ , заполненном на всю высоту активной зоны (Н):

$$\rho_{\delta}^{\text{ш}}(H) = (\rho_{\delta} / \rho_{\text{ст}}) \rho_{\text{ст}}^{\text{ш}}, \quad (5)$$

где  $(\rho_{\delta} / \rho_{\text{ст}})^{\text{ш}}$  – отношение экспериментальных значений эффективностей ЖП в кольцевом зазоре  $\delta$  и стержня-поглотителя (см.рис.5);  $\rho_{\text{ст}}^{\text{ш}}$  – эффективность штатного стержня-поглотителя.

Суммарная поглощающая способность ЖП в каналах СУЗ ( $\mathcal{E}_{\text{жп}}$ ) определяется с использованием одногруппового приближения теории возмущений:

$$\mathcal{E}_{\text{жп}} = \int_0^H \frac{\rho(H)}{H} \cdot N(z) dz \cdot \int_0^H \frac{\Phi^2(z)}{\Phi_{\text{ср}}^2} dz, \quad (6)$$

где Н – высота активной зоны;  $N(z)$  – зависимость положения стержней СУЗ по высоте активной зоны;  $\Phi(z)$  – значение нейтронного потока на высоте  $z$ ;  $\Phi_{\text{ср}}$  – среднее значение плотности нейтронного потока в аксиальном направлении.

Критерием применимости методики явилось удовлетворительное совпадение (в пределах  $\pm 15\%$ ) расчета по методике с расчетами по программам (рис.9).

Методика и порядок определения основных технологических параметров жидкостной системы с вводом ЖП в КО СУЗ зависит от того, определяется объем бака с ЖП расчетом или его объем уже задан, что возможно в случае использования существующих баков, или когда объем бака определен размерами помещения.



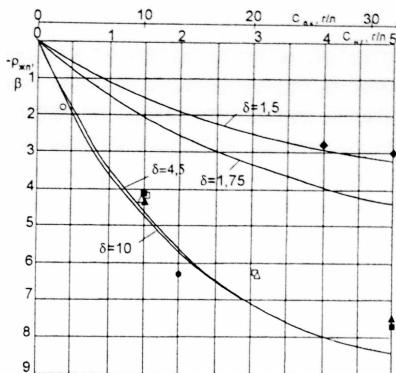


Рис.9. Влияние концентрации ЖП на физическую эффективность жидкостной системы для РУ: — расчет по методике. Расчеты по программе SADCО: ●, ■, ▲, ◆ - НГ для ЛАЭС-4, САЭС-1, КуАЭС-5; ○, □, △ - БК для ЛАЭС-4, САЭС-1;  $\delta$  - толщина зазора, мм.

Для определения диаметра подводящей ЖП трубы предлагается графический способ с использованием зависимости времени опорожнения бака с переменным уровнем от диаметра трубы ввода. Диаметр подводящей ЖП трубы выбирается из требования обеспечения времени опорожнения бака, которое должно быть не менее продолжительности (времени) распространения ЖП по контуру.

Предложены принципы похода к определению дополнительных параметров ЖСВР, позволяющие анализировать тепловые и радиационные характеристики, а также характеристики обеспечения взрывобезопасности и водного режима.

**В пятой главе** представлены практические результаты работы. Разработанные инженерные методики по оценке эжекционного захвата газа в каналах с пленочным охлаждением и эжекционного «набухания» использованы при обосновании параметров гидрогазового контура АЗ на 1-ом и 2-ом э/блоках ЛАЭС, 2-ом э/блоке КуАЭС. Разработанные схемы и конструкторские решения по жидкостной системе с вводом ЖП в КО СУЗ реактора РБМК, экспериментальное и расчетное обоснования ее параметров вошли в технический проект жидкостной системы удержания для 5-го э/блока Курской АЭС, а также использовались при реализации аналогичной системы на 2-ом э/блоке Игналинской АЭС.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1 Систематизированы и сопоставлены литературные данные по ЖСВР ЯР, включающие принципиальные схемы и конструкторские решения, результаты экспериментальных исследований. Разработана классификация ЖСВР по 18-ти характерным признакам. Сформулированы научно-технические проблемы, возникающие при обосновании этих систем.

2. Разработаны и проанализированы различные схемы ЖСВР для РБМК, использующие каналы СУЗ для ввода ЖП. Рассмотрены системы, использующие в качестве поглотителя охлаждающую воду и водные растворы БК и НГ.

3. Исследована эффективность нитрата гадолиния в каналах СУЗ. Для НГ и БК получены единые зависимости, определяющие влияние концентрации и толщины заполняемого поглотителем кольцевого зазора на эффективность канала.

4. Разработана верифицированная методика оценки эффективности жидких поглотителей в каналах СУЗ, основанная на экспериментальных данных.

5. Исследованы процессы ввода ЖП в циркуляционный контур с использованием визуализации течения. Определено, что для равномерного распространения, поступающего в контур ЖП, необходимо, чтобы продолжительность его ввода была не меньше времени полного оборота объема контурной воды.

6. Исследовано влияние формы нижней проточной части канала с пленочным охлаждением на его эжекционные характеристики. Показано, что расход эжектируемого газа зависит от расхода и температуры воды, а также от диаметра проточной части, где осуществляется захват газа.

7. Впервые получены полуэмпирические зависимости  $\beta Fr_{ж\omega} = f(t_{ж\omega})$ ,  $\beta/\varphi = f(Fr_{ож})$ , включенные в методику расчета эжекционных параметров для вертикальных каналов с опускным течением в режимах спутного движения фаз и ЗГФ.

8. Разработана методика расчета основных технологических параметров ЖСВР с вводом ЖП в КО СУЗ (концентрации, массы и объемов, размеров баков и подводящих трубопроводов, времени ввода ЖП в контур и вывода).

9. Созданный научный задел, состоящий из принципиальных схем, методик расчета и расчетных зависимостей, экспериментальных характеристик, может быть использован при обосновании различных жидкостных систем воздействия на реактивность, разрабатываемых для разных типов реакторов.

**Основные результаты диссертации отражены в следующих работах:**

1. Бубнова Т.А., Ионайтис Р.Р. Развитие жидкостных систем останковки ядерных реакторов // АТЗР. – 2003. – №5. – С.3-12.

2. Бубнова Т.А., Ионайтис Р.Р. Состояние разработок жидкостных систем останова ядерных реакторов // Атомная энергия. – 2003. – Т.94. – Вып.5. – С.344-353.

3. Бубнова Т.А., Ионайтис Р.Р. Проблемы и экспериментальные исследования жидкостных систем останковки // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. – 2003. – Вып.2. – С.5–15.

4. Параметры и характеристики жидкостной системы воздействия на реактивность (РУ РБМК) / В.Н.Васина, Р.Р. Ионайтис, Т.А.Бубнова и др. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. – 2003. – Вып.2. – С.17-31.

5. Бубнова Т.А., Ионайтис Р.Р., Шведов Н.Л. Завоздушивание и опускное течение водо-воздушных смесей в гидравлическом контуре СУЗ ядерного реактора // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. – 2003. – Вып.2. – С.32-47.

6. Бубнова Т.А., Ионайтис Р.Р. Анализ поведения радиолитического водорода в каналах охлаждения СУЗ РУ РБМК // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Обеспечение безопасности АЭС. – 2003. – Вып.2. – С.48-59.

Отпечатано в типографии ФГУП НИКИЭТ им. Н.А.Доллежала  
Заказ 6. Тираж – 100 экз. Формат 60х90 1/16 Подписано в печать 08.02.06

Автореферат отпечатан по решению диссертационного совета Д 212.141.08  
при МГТУ им.Н.Э.Баумана