

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНТАКТНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ НА РАБОТУ ПАССИВНЫХ СИСТЕМ БЕЗОПАСНОСТИ ВВЭР

**А.В. Морозов, А.Р. Сахипгареев**

*АО «ГНЦ РФ-ФЭИ им. А.И. Лейпунского»*

*249033, Калужская обл., г. Обнинск, пл. Бондаренко, 1*



Представлены результаты экспериментального исследования влияния контактной конденсации парогазовой смеси на работу пассивных систем безопасности АЭС с ВВЭР и парогенератора в аварийном конденсационном режиме. Контактная конденсация имеет место при подаче недогретой жидкости в объем гидроемкости дополнительной системы пассивного залива активной зоны реактора ВВЭР в присутствии накопленных неконденсирующихся газов. Вода, подаваемая в гидроаккумуляторы второй ступени, может быть использована для увеличения времени работы парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме и обеспечения более длительного охлаждения активной зоны. Особенностью исследованных процессов являлась малая скорость истечения воды (менее 1 м/с), вызванная необходимостью обеспечить пассивный характер работы систем безопасности. Опыты проводились на экспериментальной установке при параметрах, характерных для первого контура реакторной установки через сутки после начала аварии, и различных концентрациях газов в парогазовой смеси. В качестве неконденсирующихся газов были использованы азот и гелий, в целях безопасности заменяющий водород. По результатам проведенных опытов установлено, что увеличение концентрации неконденсирующихся газов в объеме модели гидроемкости до 45% приводит к снижению интенсивности контактной конденсации пара из парогазовой смеси на ~29% в эксперименте с азотом и на ~57% – с гелием. Данные, полученные в результате проведения экспериментов, можно использовать для расчетного моделирования аварийных процессов в реакторной установке ВВЭР во время работы комплекса пассивных систем безопасности с учетом отвода парогазовой смеси из парогенератора за счет подачи недогретой жидкости в объем гидроемкостей второй ступени.

**Ключевые слова:** ВВЭР, парогенератор, конденсационный режим, контактная конденсация, неконденсирующиеся газы, парогазовая смесь.

### ВВЕДЕНИЕ

Во многих современных зарубежных и отечественных проектах реакторных установок предусматривается наличие как активных, так и пассивных систем безопасности. К таким системам можно отнести, например, пассивные системы отвода ос-

© *А.В. Морозов, А.Р. Сахипгареев, 2017*

таточного энерговыделения, предназначенные для расхолаживания реакторной установки в случае аварийной ситуации, когда активные системы не могут включиться по каким-либо причинам (например, из-за потери внешних источников электроснабжения).

Используемые в отечественном проекте «АЭС-2006» пассивные системы безопасности позволяют отводить остаточное тепловыделение от активной зоны реактора в течение 24-х часов после начала аварии, причиной которой является гильотинный разрыв главного циркуляционного трубопровода и одновременная потеря всех источников электроснабжения [1, 2]. Система пассивного отвода тепла (СПОТ) отводит тепло от парогенератора (ПГ), переводя его в режим конденсации пара, поступающего из активной зоны. Однако при работе парогенератора в конденсационном режиме его трубный пучок заполняется неконденсирующимися газами, поступающими из реактора, что приводит к постепенному уменьшению конденсационной мощности ПГ. В процессе работы системы гидроемкостью второй ступени (ГЕ-2) в первые 24 часа аварии неконденсирующиеся газы самопроизвольно отводятся из трубного пучка парогенератора в объем гидроемкости системы ГЕ-2 [3]. В результате опорожнения гидроемкости второй ступени и их заполнения парогазовой смесью (ПГС) часть пара из ПГС конденсируется на внутренних стенках емкостей ГЕ-2. Данный процесс идет до тех пор, пока гидроемкости не прогреются до температуры окружающего их пространства защитной оболочки. После слива запасенной в гидроемкостях воды самоотвод парогазовой смеси из парогенератора прекращается, что, в конечном итоге, может привести к ухудшению теплообмена в трубчатке и прекращению подачи конденсата в реактор [4]. В связи с этим возникает задача увеличения времени работы парогенератора в конденсационном режиме, а следовательно, и длительности работы пассивных систем безопасности.

Для увеличения времени работы ПГ в конденсационном режиме предложено несколько технических решений. В частности, в проекте ВВЭР-ТОИ для обеспечения длительного теплоотвода от активной зоны предусматривается использование системы гидроемкостей третьей ступени (ГЕ-3) [5]. Также рассматривается техническое решение, согласно которому удаление ПГС из трубного пучка парогенератора обеспечивается путем снижения давления в емкостях ГЕ-2 за счет подачи в их объем холодной воды из дополнительных баков, расположенных выше системы ГЕ-2 [6]. Но для этого необходимо, чтобы в гидроемкостях второй ступени содержался пар, а не только неконденсирующиеся газы. Данное условие выполняется, так как к концу первых суток аварии средняя массовая концентрация газа в парогазовой смеси в натурной емкости ГЕ-2 не будет превышать 20%, что подтверждается расчетами, проведенными по результатам экспериментов, выполненных на стенде ГЕ2М-ПГ [7]. Относительно низкую температуру подаваемой жидкости (не более 50°C) предполагается поддерживать с использованием качественной теплоизоляции дополнительных баков. При подаче воды в объем ГЕ-2 затруднительно создание пассивным способом напора, которого достаточно для распыления воды на мелкие капли, т.к. ее скорость не будет превышать 1 м/с. Дополнительным преимуществом данного технического решения является то, что вода, поступающая в гидроемкости через сутки с момента начала аварии, обеспечивает дополнительную подпитку реактора теплоносителем.

Прямой контакт пара со струями и каплями жидкости имеет место в многочисленных теплообменных аппаратах, поэтому исследование теплопередачи при контактной конденсации многокомпонентных смесей имеет большое практическое и теоретическое значение. В то же время, проведенный обзор публикаций показал, что процессы теплообмена при контактной конденсации парогазовой смеси на струях и каплях недогретой жидкости при низких скоростях истечения недостаточно изучены, например, в [8] представлены результаты экспериментов с подачей воды в «чистый» пар и в пар с добавлением азота. Подача воды осуществлялась через фор-

сунку. Полученная авторами [8] формула по расчету безразмерной среднемассовой температуры диспергированной струи воды применима для очень малых концентраций азота в паре (менее 1%). В [9] приведены значения измерения температуры турбулентной струи при ее истечении для скоростей от 0,4 м/с. Там же приведены результаты расчетов для струй, вытекающих с начальной скоростью до 2 м/с из цилиндрических отверстий с диаметром до 7 мм. Для этих диаметров и скоростей струю можно считать непрерывной на участке длиной 300 – 450 мм. Однако в [9] не учитывается наличие неконденсирующихся газов, которые сильно снижают эффективность конденсации, вследствие чего этот процесс не заканчивается на сплошной части струи.

В работах [10 – 12] приведены соотношения по расчету диспергированных струй в присутствии паровоздушной смеси. Представленные формулы применимы к каплям, размеры которых не превышают 4 мм. Теплоотдача при конденсации пара и пара из парогазовой смеси на сплошных струях жидкости рассматривалась в [13], но в этой работе не исследуется конденсация на раздробленной струе жидкости. В [14] рассмотрены процессы конденсации парогазовой смеси, возникающие в результате работы спринклерной системы, применяемой на АЭС с реактором типа ВВЭР-1000. Авторами [15] проводились исследования с целью изучения работы спринклерной системы реакторов типа PWR как средства понижения давления и температуры в защитной оболочке и уменьшения локальной концентрации водорода в результате конденсации пара на каплях, образующихся при распылении воды. Эксперименты для изучения теплопередачи при конденсации пара на поверхности полого конуса разбрызгиваемой воды представлены в работе [16]. Роль неконденсирующихся газов в [16] не рассматривалась.

На основании анализа работ по конденсации пара на струях воды [8 – 16] можно сделать вывод о том, что исследованные процессы значительно отличаются от процессов, имеющих место при конденсации парогазовой смеси, поступающей в объем гидроемкостей второй ступени. Из этого следует необходимость выполнения экспериментальных исследований контактной конденсации парогазовых смесей применительно к условиям работы пассивных систем безопасности реактора ВВЭР.

### **МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ НА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКЕ**

Для исследования процессов контактной конденсации парогазовой смеси в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» была создана экспериментальная установка. Основное оборудование и технологические линии установки показаны на рис. 1.

Стенд включает в себя рабочий участок и вспомогательные системы. В состав вспомогательных систем входят парогенератор объемом 300 л с внутренним регулируемым электрическим нагревателем максимальной мощностью 12 кВт; конденсатор системы поддержания давления; накопительный бак пара объемом 48 л; технологические линии с арматурой; система подачи газа. Рабочий участок состоит из модели гидроемкости системы ГЕ-2 объемом ~ 650 л и напорного бака объемом 14 л, необходимого для подачи недогретой жидкости в объем модели гидроемкости. Объемный масштаб рабочего участка стенда составляет 1:400 по сравнению с натурной установкой. Высота модели гидроемкости, определяющая длину участка на которой происходит контактная конденсация, равна ~3000 мм. Ввиду особенностей стенда напорный бак расположен ниже модели гидроемкости второй ступени. Для обеспечения постоянного расхода воды в верхней части напорного бака создавалась газовая подушка. Расход пара из парогенератора стенда на рабочий участок стенда соответствует проектному (масштаб 1:1).

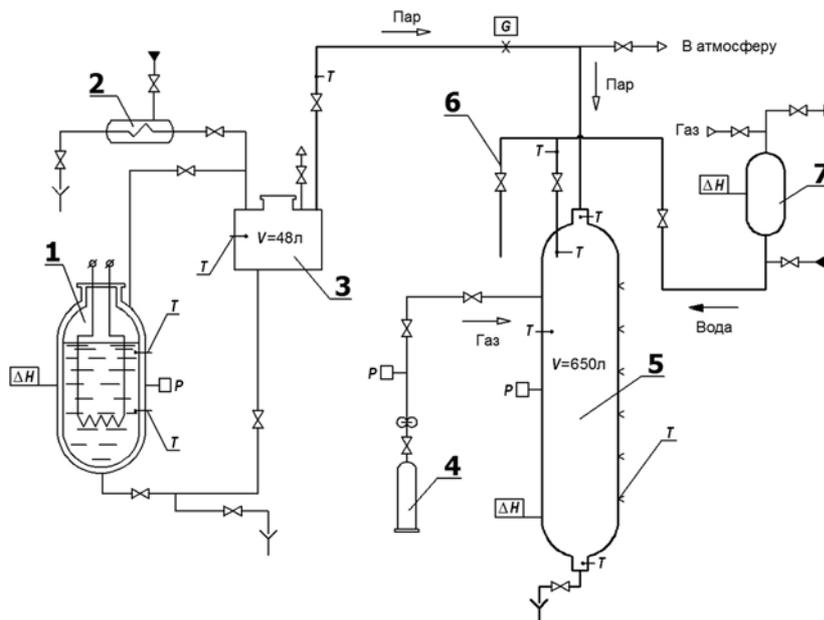


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема экспериментальной установки: 1 – парогенератор; 2 – система поддержания давления; 3 – накопительный бак пара; 4 – система подачи газа; 5 – модель гидроемкости системы GE-2; 6 – дублирующая линия подачи струи жидкости в атмосферу; 7 – напорный бак; P – давление; T – температура;  $\Delta H$  – уровень; G – расход

Парогенератор, накопительный бак и система поддержания давления обеспечивали постоянные параметры (давление, температуру) пара при проведении экспериментов. Регистрация и контроль теплофизических параметров в ходе проведения экспериментов осуществлялись измерительными приборами и датчиками. Контрольно-измерительные приборы, установленные на стенде, позволяли регистрировать следующие основные параметры: давление среды в парогенераторе и гидроемкости GE-2; давление газа, поступающего на стенд; уровень воды в парогенераторе и напорном баке; температуру среды в парогенераторе и модели емкости GE-2 на входе в модель; температуру на поверхности модели GE-2; температуру воды в напорном баке и температуру поверхности стенки трубки, соединяющей напорный бак и модель GE-2; температуру воды на выходе из трубки, входящей в модель емкости GE-2; расход пара из парогенератора.

Регистрация давления по контуру выполнялась с помощью дифференциальных преобразователей МЕТРАН-100-ДИ (класс точности 0,1). Измерение уровня жидкости на стенде осуществлялось дифференциальными приборами МЕТРАН-100-ДД (класс точности 0,1). Для измерения температуры применялись кабельные термопары диаметром 1 мм (погрешность измерений  $1^\circ\text{C}$ ). На стенде также был установлен вихревой расходомер пара Rosemount-8800D (погрешность измерения 1,4%) с нижней границей измерения объемного расхода пара  $5,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Частота опроса измерительных каналов системы сбора составляла 4 Гц.

Опыты проводились в два этапа. На первом этапе были проведены гидродинамические исследования с подачей воды в атмосферу по дублирующей линии (см. рис. 1, поз. 6). Осуществлялось визуальное наблюдение за характером истечения жидкости при различных расходах жидкости. Во время подачи струи жидкости из напорного бака выполнялась фотосъемка для определения ее геометрических параметров: длины сплошного участка, диаметра капель, размера «факела» струи.

На втором этапе проводились эксперименты с подачей воды в объем модели гид-

роемкости ГЕ-2. В начале каждого эксперимента с помощью электронагревателей устанавливалось заданное давление в парогенераторе и накопительном баке. Затем подавался пар в рабочий участок. По мере заполнения стенда паром производилась сдвух паровоздушной смеси, присутствующей в емкости ГЕ-2 и в трубах. Критерием прекращения сдвух паровоздушной смеси являлось выравнивание температурного поля по высоте модели ГЕ-2. Для каждого эксперимента устанавливался изотермический режим по паровому тракту и в гидроемкости ГЕ-2, при котором компенсировались тепловые потери. Пар поступал на конденсатор системы поддержания давления, с помощью которой на протяжении всего эксперимента обеспечивалось стабильное давление в модели ГЕ-2 стенда (точность поддержания давления составляла  $\pm 0,002$  МПа).

После стабилизации расхода пара в модель гидроемкости, заполненную «чистым» паром, из напорного бака подавалась струя жидкости, на которой происходила конденсация пара. Постоянный расход воды обеспечивался за счет поддержания перепада давлений между моделью ГЕ-2 и напорным баком, давление в котором создавалось с помощью газовой подушки.

В результате конденсации происходило увеличение притока пара из парогенератора в модель ГЕ-2. Вода подавалась до тех пор, пока расход пара не выходил на новый стационарный уровень. Конденсат, скапливающийся в нижней части емкости ГЕ-2, дренировался до уровня нижней термодары (см. рис. 1). Далее с помощью системы подачи неконденсирующихся газов происходила накачка необходимой массы азота или гелия в объем модели ГЕ-2 для создания парогазовой смеси с необходимой концентрацией газа. Происходила выдержка по времени для стабилизации расхода пара на стенд. После выхода расхода на стабильный уровень в объем модели вновь подавалась вода, и эксперименты выполнялись по описанной выше методике. Опыты продолжались до тех пор, пока не был пройден заданный диапазон концентраций газа.

Ранее отмечалось, что вследствие совместной работы пассивных систем безопасности во время аварии парогенератор переводится в режим конденсации пара, поступающего из активной зоны. При этом в течение первых 24-х часов аварии производится отвод парогазовой смеси тяжелых (азот) и легких (водород) по сравнению с паром газов в объем опорожняющихся гидроемкостей системы ГЕ-2. Через сутки после начала аварии гидроемкости заполняются парогазовой смесью и, согласно расчетам, давление в первом контуре РУ ВВЭР составит 0,2 – 0,3 МПа [18, 19]. Эксперименты на стенде проводились при параметрах среды (давление, температура), соответствующих натурной установке. Диапазон концентраций газов в парогазовой смеси был расширен по сравнению с расчетным. В целях безопасности водород в опытах моделировался гелием с сохранением мольной концентрации газов. Для исследования различий в характере влияния каждого из газов на процесс контактной конденсации эксперименты выполнялись с отдельной подачей азота и гелия в объем модели гидроемкости.

## **РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

В ходе гидродинамических исследований проводились опыты по определению расхода воды, при котором на выходе из трубки возникал бы участок сплошной струи. Было установлено, что длина сплошного участка струи для данных условий на экспериментальной установке не превышает 160 мм [17].

Начальные параметры проведения экспериментов с подачей недогретой жидкости в объем модели гидроемкости ГЕ-2 представлены в табл. 1.

Было выполнено четыре эксперимента, включавших в себя 24 экспериментальных

режима. Опыты №1 и №2 проводились для определения различия во влиянии, оказываемом азотом и гелием на конденсацию пара при контактной конденсации при параметрах, характерных для работы пассивных систем безопасности ВВЭР. В экспериментах №3 и №4 исследовалось влияние давления среды в модели ГЕ-2, изменяемого в заданном диапазоне, на контактную конденсацию пара из ПГС при фиксированной температуре поступающей жидкости.

Таблица 1

**Основные параметры экспериментов**

№ опыта	Газ	Давление, МПа	Температура среды, °С	Средняя массовая концентрация газа в паре С, %	Средняя температура струи на выходе из трубки, °С
1	Азот	0,2	120	0; 5; 10; 15; 25; 35; 45	20
2	Гелий	0,2	120	0; 5; 10; 15; 25; 35; 45	20
3	Азот	0,2	120	0; 25; 50; 75; 100	25
4	Азот	0,3	133	0; 25; 50; 75; 100	25

При подаче воды в объем модели ГЕ-2 расход пара, поступающего из парогенератора в гидроемкость второй ступени, увеличивался за счет контактной конденсации на струе и каплях жидкости. Значения расходов пара для двух экспериментальных режимов, характеризующихся одинаковыми массовыми концентрациями неконденсирующихся газов в паре, представлены на рис. 2.

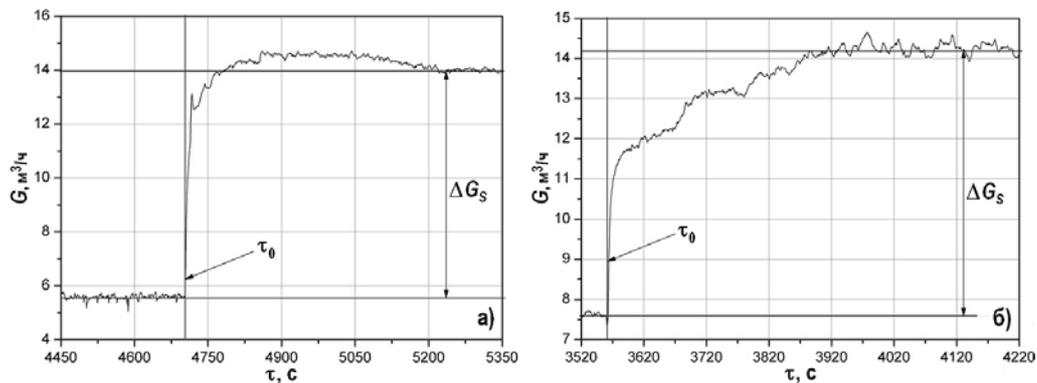


Рис. 2. Изменение расхода пара, поступающего в модель ГЕ-2, при подаче воды: а) – эксперимент №1 ( $C_{N_2}=10\%$ ); б) – эксперимент №2 ( $C_{He}=10\%$ );  $\tau_0$  – начало подачи струи воды;  $\Delta G_S$  – приращение расхода пара за счет конденсации

Как показано на рисунке, в момент времени  $\tau_0$  расход пара увеличивается и выходит на новый уровень. Величина изменения расхода пара с начального до нового уровня  $\Delta G_S$  определяется в конце режима после стабилизации параметров.

При проведении экспериментов подача воды осуществлялась после выравнивания температурного поля по высоте модели гидроемкости. Изменение температуры стенки по высоте модели гидроемкости второй ступени для различных режимов (непосредственно перед началом подачи струи жидкости) показано на рис. 3.

Из показаний термопар, приведенных на рис. 3а, видно, что более быстрое снижение температуры парогазовой смеси происходит внизу гидроемкости. Это связано с тем, что азот имеет большую плотность по сравнению с водяным паром, что приводит к его накоплению в нижней части бака. Противоположная картина наблюдается на рис. 3б. Гелий, имеющий меньшую плотность по сравнению с паром, при первой накачке скапливается в верхней части модели ГЕ-2, снижая температуру среды на входе в емкость.

При дальнейшей накачке происходит перераспределение гелия в объеме модели гидроемкости, что приводит к равномерному снижению температуры среды по высоте модели ГЕ-2. Изменение температуры стенки по высоте модели ГЕ-2 в опытах №3 и №4 аналогично тому, что показано на рис. 3а.

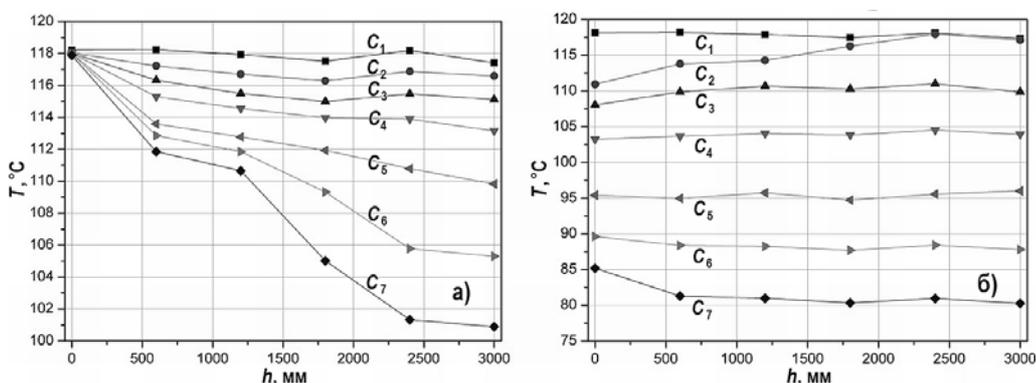


Рис. 3. Изменение температуры стенки по высоте модели ГЕ-2: а) – эксперимент №1 ( $\text{N}_2$ ); б) – эксперимент №2 ( $\text{He}$ );  $h$  – расстояние от верхней крышки гидроемкости;  $C_1 - C_7$  – средние массовые концентрации газов в паре ( $C_1 = 0\%$ ,  $C_2 = 5\%$ ,  $C_3 = 10\%$ ,  $C_4 = 15\%$ ,  $C_5 = 25\%$ ,  $C_6 = 35\%$ ,  $C_7 = 45\%$ )

Для анализа результатов исследований был введен безразмерный комплекс  $\Delta G_{50}/G_w$ , где  $\Delta G_{50}$  – приращение расхода пара только за счет конденсации на струе, учитывающее тот факт, что часть пара конденсируется на трубке, через которую подается недогретая жидкость;  $G_w$  – расход воды, подающейся из напорного бака. Введенный комплекс характеризует интенсивность конденсации пара. Для учета влияния паразитного нагрева трубки на основной линии подачи воды в объем емкости ГЕ-2 были установлены две термопары: одна перед входом в бочку, другая за 10 мм до среза трубки, по которой поступала вода. По показаниям данных термопар определялась величина паразитной конденсации пара на трубке. Погрешность результатов эксперимента, которая складывалась из методической и инструментальной погрешностей, не превышала 10%.

Полученная зависимость безразмерного комплекса  $\Delta G_{50}/G_w$  от концентрации газов в паре представлена на рис. 4.

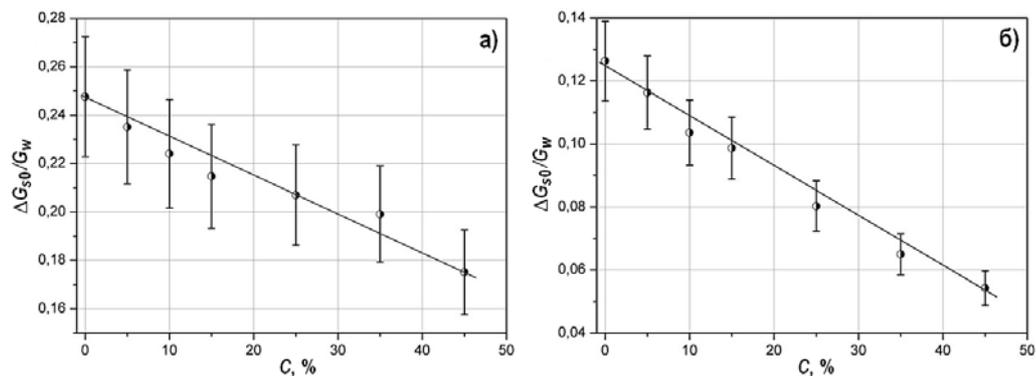


Рис. 4. Зависимость приращения расхода пара при подаче жидкости от концентрации газа в паре: а) – эксперимент №1 ( $\text{N}_2$ ); б) – эксперимент №2 ( $\text{He}$ );  $\Delta G_{50}/G_w$  – безразмерный комплекс;  $C$  – средняя массовая концентрация газа в паре

Как видно из рисунка, по мере увеличения концентрации неконденсирующихся газов в модели гидроемкости второй ступени происходит снижение интенсивности конденсации парогазовой смеси на струе недогретой жидкости. При увеличении средних массовых концентраций неконденсирующихся газов в модели гидроемкости ГЕ-2 до 45% в эксперименте №1 с азотом (рис. 4а) значение безразмерного комплекса  $\Delta G_{50}/G_w$  сни-

зилось на ~29%, а в эксперименте №2 с гелием (рис. 4б)  $\Delta G_{s0}/G_w$  снизилось значительно больше – на 57%.

Помимо экспериментов с различным составом парогазовой смеси на стенде проводились исследования, целью которых было определение влияния давления среды в модели ГЕ-2 на эффективность контактной конденсации пара из ПГС при постоянной температуре подаваемой жидкости. На рисунке 5 показана зависимость безразмерного комплекса  $\Delta G_{s0}/G_w$  от концентрации газа в паре для двух различных давлений – 0,2 и 0,3 МПа.

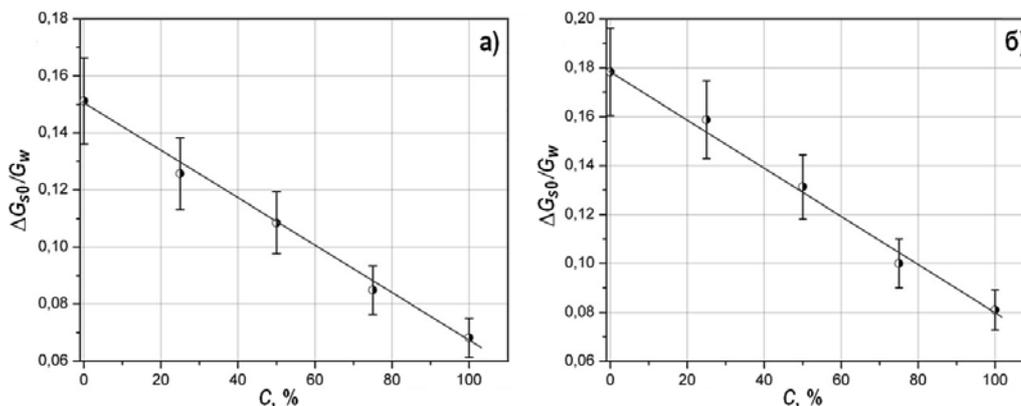


Рис. 5. Зависимость приращения расхода пара при подаче жидкости от концентрации азота в паре: а) – эксперимент №3 (давление 0,2 МПа); б) – эксперимент №4 (давление 0,3 МПа);  $\Delta G_{s0}/G_w$  – безразмерный комплекс;  $C$  – средняя массовая концентрация азота в паре

Было установлено, что в исследованном диапазоне параметров изменение давления (температуры среды) в объеме модели гидроемкости второй ступени при фиксированной температуре поступающей воды не оказывает значительного влияния на интенсивность контактной конденсации пара из парогазовой смеси. Видно, что снижение значения  $\Delta G_{s0}/G_w$  в двух экспериментах составило ~45%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для проведения исследований по оценке влияния неконденсирующихся газов на контактную конденсацию пара при работе пассивных систем безопасности ВВЭР в АО «ГНЦ РФ-ФЭИ» была создана экспериментальная установка, на которой были проведены эксперименты с использованием парогазовых смесей, содержащих азот или гелий.

Результаты экспериментов свидетельствуют о том, что при увеличении средних массовых концентраций неконденсирующихся газов в объеме модели гидроемкости системы ГЕ-2 до 45% в экспериментах с азотом интенсивность конденсации снижается на ~29%, а в эксперименте с гелием – на ~57%.

Из полученных данных следует, что присутствие в объеме гидроемкостей второй ступени неконденсирующихся газов снижает интенсивность контактной конденсации пара из парогазовой смеси на струях и каплях недогретой жидкости тем больше, чем легче газ, находящийся в парогазовой смеси. Гелий, имея меньшую плотность по сравнению с водяным паром, не только заполняет собой верхнюю часть объема гидроемкости, но и распределяется по всей высоте, препятствуя конденсации пара на струе. Азот, будучи тяжелее водяного пара, скапливается в нижней части гидроемкости ГЕ-2, незначительно препятствуя процессам конденсации пара на поступающей струе жидкости.

Анализ результатов экспериментов показал, что в исследованном диапазоне параметров, характерном для работы пассивных систем безопасности ( $P = 0,2 - 0,3$  МПа),

изменение давления пара в объеме модели гидроемкости второй ступени при фиксированной температуре поступающей жидкости не оказывает значительного влияния на интенсивность контактной конденсации пара из парогазовой смеси.

### Литература

1. Калякин С.Г., Сорокин А.П., Пивоваров В.А., Пометько Р.С., Селиванов Ю.Ф., Морозов А.В., Ремизов О.В. Экспериментальные исследования теплофизических процессов в обоснование безопасности ВВЭР нового поколения // Атомная энергия. – 2014. – Т. 116. – Вып. 4. – С. 241-246.
2. Морозов А.В. Теплогидравлическое обоснование работоспособности системы пассивного залива активной зоны реактора ВВЭР: автореф. дис. канд. техн. наук. – Обнинск, 2004.
3. Морозов А.В., Ремизов О.В. Экспериментальное обоснование проектных функций дополнительной системы пассивного залива активной зоны реактора ВВЭР // Теплоэнергетика. – 2012. – № 5. – С. 22-27.
4. Лукьянов А.А., Зайцев А.А., Морозов А.В., Попова Т.В., Ремизов О.В., Цыганок А.А., Калякин Д.С. Расчетно-экспериментальное исследование влияния неконденсирующихся газов на работу модели парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме при запроектной аварии // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2010. – № 4. – С. 172-182.
5. Maltsev M. Additional information on modern VVER Gen III technology // Proceedings of OECD/NEA Workshop on Innovations in Water-cooled Reactor Technologies, Paris, France, February 11-12, 2015.
6. Беркович В.М., Таранов Г.С., Калякин С.Г., Ремизов О.В., Морозов А.В. Разработка и обоснование технологии удаления неконденсирующихся газов для обеспечения работоспособности системы пассивного отвода тепла // Атомная энергия. – 2006. – Т. 100. – Вып. 1. – С. 13-19.
7. Kopytov I.I., Kalyakin S.G., Berkovich V.M., Morozov A.V., Remizov O.V. Experimental investigation of non-condensable gases effect on Novovoronezh NPP-2 steam generator condensation power under the condition of passive safety systems operation // Proceedings of the 17-th International Conference on Nuclear Engineering 2009, ICONE17. – Brussels, 2009. – PP. 735-743.
8. Исаченко В.П. Теплообмен при конденсации. – М.: Энергия, 1977.
9. Кутателадзе С.С. Теплопередача при конденсации и кипении. – М.: Машгиз, 1952.
10. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959.
11. E. Kulic, E. Rhodes. Heat transfer rate to moving droplets in air/steam mixtures // Proceedings of 6-th International Heat Transfer Conference. – Toronto, 1978. – Vol. 1. – PP. 469-474.
12. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000.
13. Иванов В.И. Теплоотдача при конденсации пара на сплошных струях жидкости в конденсаторах смешивающего типа: автореф. дис. . канд. техн. наук. – Санкт-Петербург, 1993.
14. Берман Л.Д., Гордон Б.Г., Богдан С.Н. Теплоотдача от паровоздушной смеси к диспергированной водяной струе в ограниченном объеме // Теплоэнергетика. – 1981. – № 12. – С. 38-42.
15. E. Porcheron, P. Lemaître, A. Nuboer, V. Roshas, J. Vendel. Experimental investigation in the TOSQAN facility of heat and mass transfers in a spray for containment application // Nuclear Engineering and Design. – 2007. – Vol. 237. – PP. 1862-1871.
16. M. Takahashi, A. K. Nayak, H. Murakoso, S. Kitagawa. Study on vapor condensation heat transfer on liquid spray // Proceedings of 7th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE-7481. Tokyo, Japan, April 19-23, 1999.
17. Морозов А.В., Сахунгареев А.Р. Исследование влияния процессов конденсации пара из парогазовой смеси на струе жидкости на работу парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме // ВАИТ. Сер.: Ядерно-реакторные константы. – 2016. – № 3. – С. 100-110.
18. Berkovich V.M., Peresadko V.G., Taranov G.S., Remizov O.V., Morozov A.V., Tsyganok A.A., Kalyakin D.S. Experimental study on Novovoronezh NPP-2 steam generator model

condensation power in the event of the beyond design basis accident // Proceedings of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants 2010, ICAPP 2010. – San Diego, CA, 2010. – PP. 186-192.

19. Морозов А.В., Ремизов О.В. Экспериментальное исследование работы модели парогенератора ВВЭР в конденсационном режиме // Теплоэнергетика. – 2012. – № 5. – С. 16-21.

Поступила в редакцию 17.03.2016 г.

#### **Авторы**

Морозов Андрей Владимирович, ведущий научный сотрудник, доктор техн. наук

E-mail: sas@ippe.ru

Сахипгареев Азамат Радикович, аспирант

E-mail: asahipgareev@ippe.ru

UDC 621.039.58:536.423.4

## **EXPERIMENTAL ESTIMATION OF THE EFFECT OF CONTACT CONDENSATION OF STEAM-GAS MIXTURE ON THE VVER PASSIVE SAFETY SYSTEMS OPERATION**

Morozov A.V., Sakhipgareev A.R.

JSC «SSC RF-IPPE»

1 Bondarenko sq., Kaluga reg., Obninsk, 249033 Russia

#### ABSTRACT

The paper presents the results of experimental study of the effect of contact condensation of steam-gas mixture on the operation of VVER passive safety systems and the steam generator in emergency condensing mode. The contact condensation takes place when subcooled fluid is supplied in the accumulator tank of VVER reactor facility passive core flooding system (the HA-2 system) in the presence of non-condensable gases. Water supplied to the second stage of hydro accumulators can be used for increasing the operating time of the VVER steam generator in the emergency condensing mode and ensuring longer core cooling. Low liquid outlet velocity (less than 1 m/sec), necessitated to ensure safety systems operation in passive mode constitutes the distinguishing feature of the investigated processes.

The experiments were performed on the test facility with the parameters specific to the primary circuit of the reactor facility within 24 hours after the accident initiation for different concentrations of gas in the steam-gas mixture. Nitrogen and helium, which replaces hydrogen, were used as the non-condensable gases. It was established as the result of the experiments that the increase of concentration of non-condensable gas in the volume the HA-2 hydro accumulator model up to 45% leads to the reduction of intensity of contact condensation of steam from the steam-gas mixture by ~29% in the experiment with nitrogen and by ~57% in the experiment with helium. The obtained experimental data can be used for numerical simulation of emergency processes in the VVER reactor facility during operation of passive safety systems taking into account the removal of steam-gas mixture from steam generator by supplying the subcooled liquid jet into the volume of second stage HA-2 accumulator tanks.

**Key words:** VVER, steam generator, condensation mode, contact condensation, non-condensable gases, steam-gas mixture.

## REFERENCES

1. Kalyakin S.G., Sorokin A.P., Pivovarov V.A., Pomotko R.S., Selivanov Yu.F., Morozov A.V., Remizov O.V. Eksperimentalnye issledovaniya teplofizicheskikh protsessov v obosnovanie bezopasnosti VVER novogo pokoleniya [Experimental studies of the thermal physical processes in justification of safety of the new generation of VVER]. *Atomnaya Energiya*. 2014, v. 116, no. 4, pp. 241-246 (in Russian).
2. Morozov A.V. Teplogidravlichesкое obosnovanie rabotosposobnosti sistemy passivnogo zaliva aktivnoy zony reaktora VVER. Diss. kand. tekhn. nauk [Thermohydraulic substantiation of the operation of passive core flooding system of the VVER reactor. Cand. tech. sci. diss.]. Obninsk, 2004. 159 p. (in Russian).
3. Morozov A.V., Remizov O.V. Eksperimentalnoe obosnovanie proektnykh funktsiy dopolnitelnoy sistemy passivnogo zaliva aktivnoy zony reaktora VVER [Experimental substantiation of the design features of passive core flooding system of the VVER reactor]. *Teploenergetika*. 2012, no. 5, pp. 22-27 (in Russian).
4. Lukyanov A.A., Zaitsev A.A., Morozov A.V., Popova T.V., Remizov O.V., Tsyganok A.A., Kalyakin D.S. Raschetno-eksperimentalnoe issledovanie vliyaniya nekondensiruyuschikhsya gazov na rabotu modeli parogeneratora VVER v kondensatsionnom rezhime pri zaproektnoy avarii [Numerical and experimental investigation of the effect of non-condensable gases on the VVER steam generator model operation in condensing mode during beyond design basis accident]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya energetika*. 2010, no. 4, pp. 172-182 (in Russian).
5. Maltsev M. Additional information on modern VVER Gen III technology. Proceedings of OECD/NEA Workshop on Innovations in Water-cooled Reactor Technologies, Paris, France, February 11-12, 2015.
6. Berkovich V.M., Taranov G.S., Kalyakin S.G., Remizov O.V., Morozov A.V. Razrabotka i obosnovanie tekhnologii udaleniya nekondensiruyuschikhsya gazov dlya obespecheniya rabotosposobnosti sistemy passivnogo otvoda tepla [The development and substantiation of technology for removal of non-condensable gases to ensure operability of the passive heat removal system]. *Atomnaya Energiya*. 2006, v. 100, no. 1, pp. 13-19 (in Russian).
7. Kopytov I.I., Kalyakin S.G., Berkovich V.M., Morozov A.V., Remizov O.V. Experimental investigation of non-condensable gases effect on Novovoronezh NPP-2 steam generator condensation power under the condition of passive safety systems operation. Proceedings of the 17-th International Conference on Nuclear Engineering 2009, ICONE17. Brussels, 2009, pp. 735-743.
8. Isachenko V.P. Teploobmen pri kondensatsii [Heat transfer in the condensation]. Moscow. Energiya Publ., 1977, 240 p. (in Russian).
9. Kutateladze S.S. Teploperedacha pri kondensatsii i kipenii [Heat transfer in the condensation and boiling]. Moscow. Mashgiz Publ., 1952, 234 p. (in Russian).
10. Levich V.G. Fiziko-khimicheskaya gidrodinamika [Physical and chemical hydrodynamics]. Moscow. Gosudarstvennoe izdatelstvo fiziko-matematicheskoy literatury Publ., 1959. 700 p. (in Russian).
11. E. Kulic, E. Rhodes. Heat transfer rate to moving droplets in air/steam mixtures. Proceedings of 6-th International Heat Transfer Conference, Toronto, 1978, v. 1, pp. 469-474.
12. Prandtl' L. Hidroaeromekhanika [Aerohydromechanics]. Izhevsk, NITS «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika» Publ., 2000. 576 p. (in Russian).
13. Ivanov V.I. Teplootdacha pri kondensatsii para na sploshnykh struyakh zhidkosti v kondensatorakh smeshivayuschego tipa. Diss. kand. tekhn. nauk [Heat transfer in the steam condensation on the continuous liquid jets in the condensers of the mixing type. Cand. tech. sci. diss.]. Saint Petersburg, 1993. 177 p.
14. Berman L.D., Gordon B.G., Bogdan S.N. Teplootdacha ot parovozdushnoy smesi k dispergiruvannoy vodyanoy strue v ogranichenom ob'yome [Heat transfer from the steam-air mixture to the dispersed water jet within a limited volume]. *Teploenergetika*. 1981, no. 12, pp. 38-42 (in Russian).
15. E. Porcheron, P. Lemaitre, A. Nuboer, V. Roshas, J. Vendel. Experimental investigation in the TOSQAN facility of heat and mass transfers in a spray for containment application.

*Nuclear Engineering and Design*. 2007, v. 237, pp. 1862-1871.

16. M. Takahashi, A.K. Nayak, H. Murakoso, S. Kitagawa. Study on vapor condensation heat transfer on liquid spray. Proceedings of 7-th International Conference on Nuclear Engineering, ICONE-7481. Tokyo, Japan, April 19-23, 1999.

17. Morozov A.V., Sakhipgareev A.R. Study of the effect of steam condensation from the steam-gas mixture on the liquid jet on VVER steam generator operation in condensation mode. *VANT. Ser.: «Nuclear and reactor constants»*. 2016, no. 3, pp. 100-110 (in Russian).

18. Berkovich V.M., Peresadko V.G., Taranov G.S., Remizov O.V., Morozov A.V., Tsyganok A.A., Kalyakin D.S. Experimental study on Novovoronezh NPP-2 steam generator model condensation power in the event of the beyond design basis accident. Proceedings of International Congress on Advances in Nuclear Power Plants 2010, ICAPP 2010. San Diego, CA, 2010, pp. 186-192.

19. Morozov A.V., Remizov O.V. Eksperimentalnoe issledovanie raboty modeli parogeneratora VVER v kondensatsionnom rezhime [Experimental study of the model of the VVER steam generator in condensation mode]. *Teploenergetika*. 2012, no. 5, pp. 16-21 (in Russian).

### Authors

Morozov Andrej Vladimirovich, Principal Researcher, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: sas@ippe.ru

Sakhipgareev Azamat Radikovich, PhD Student

E-mail: asakhipgareev@ippe.ru