

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ НЕРАВНОВЕСНЫХ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ПАССИВНОГО ЗАЛИВА АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ВВЭР

А.В. Морозов, О.В. Ремизов, А.А. Цыганок

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



Приведены результаты экспериментальных исследований процессов взаимодействия насыщенного пара и холодной воды в вертикальном паропроводе системы пассивного залива реактора ВВЭР из гидроемкостей второй ступени. Предложена физическая модель истечения воды из вертикальной заглушенной трубы с переменным уровнем во встречный поток насыщенного пара. Получена полуэмпирическая формула для расчета времени опорожнения вертикальных заглушенных труб.

Ключевые слова: реактор ВВЭР, вертикальная заглушенная труба, вода, пар, истечение.

Keywords: VVER reactor, vertical blanked-off tube, water, steam, outflows.

ВВЕДЕНИЕ

В современных проектах АЭС повышение безопасности обеспечивается с помощью систем, работа которых основана на различных принципах действия. В частности, в проекте реактора ВВЭР-1200 (проект «АЭС-2006») предусмотрено использование пассивных систем безопасности. Одной из них является дополнительная система пассивного залива активной зоны из гидроемкостей второй ступени (система ГЕ-2).

Система ГЕ-2 состоит из восьми гидроаккумулирующих емкостей (объемом 120 м³ каждая), заполненных водой при атмосферном давлении. Слив теплоносителя осуществляется за счет нивелирного напора. По линии слива гидроемкости второй ступени через обратные клапаны подключены к реактору. Верх гидроемкостей подсоединен к выходным коллекторам парогенераторов с помощью паровой линии, оснащенной специальными обратными клапанами, настроенными на открытие при снижении давления в первом контуре до 1,5 МПа. В системе реализовано четырехступенчатое профилирование во времени расхода, подаваемого в активную зону, в соответствии со снижением остаточного энерговыделения. Работа системы пассивного отвода тепла и запасенный объем воды в гидроемкостях позволяют при аварии охлаждать реактор в течение не менее 24 часов [1].

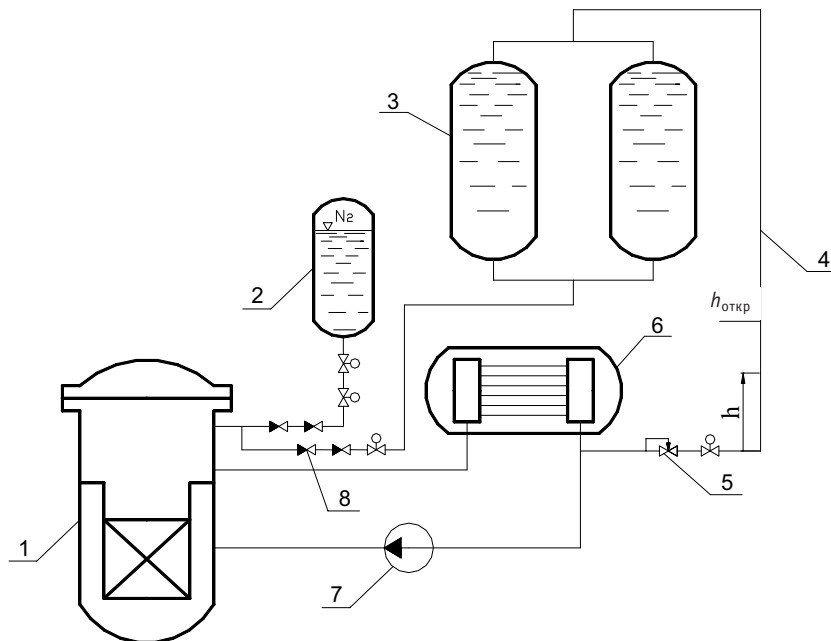


Рис. 1. Система пассивного залива АЗ реактора ВВЭР-1200 (один канал из четырех): 1 – реактор; 2 – гидроемкость первой ступени (ГЕ-1); 3 – гидроемкости второй ступени (ГЕ-2); 4 – паровая линия; 5 – специальный обратный клапан; 6 – парогенератор; 7 – ГЦН; 8 – обратный клапан

Процессы, происходящие в системе гидроемкостей второй ступени, можно поделить на несколько последовательных этапов. Исходным событием для срабатывания системы ГЕ-2 (рис. 1) является авария на АЭС, связанная с разгерметизацией первого контура реакторной установки и падением давления в реакторе. Запуск системы в работу происходит при снижении давления в первом контуре до 1,5 МПа.

Излив жидкости из гидроемкостей начнется после открытия обратного клапана 8 на сливной линии. Это произойдет лишь тогда, когда разность давлений между напорной и сливной линиями достигнет величины $\Delta P_{откр}$, которая соответствует определенной высоте осушения паровой линии $h_{откр}$.

В случае, если граница раздела фаз не достигает нужной отметки в результате процессов, сопровождающих рост давления в системе, обратный клапан 8 на сливной линии не открывается, истечения из гидроемкостей не происходит, а в паровой линии 4 начинаются неравновесные процессы взаимодействия пара и холодной воды. Взаимодействие происходит в заглушенной вертикальной трубе (верхняя заглушка – заполненные водой гидроемкости).

После того, как в ходе протекания неравновесных процессов в паропроводе происходит его частичное опорожнение и граница раздела фаз достигает отметки $h_{откр}$, открывается обратный клапан на линии слива и начинается истечение жидкости из гидроемкостей.

Истечение происходит с возрастающим расходом, вызванным ростом перепада давления на обратном клапане 8, что является следствием уменьшения высоты столба жидкости в паровой линии 4 (из-за ее опорожнения), а следовательно, и снижения потерь движущего напора среды первого контура. После того, как давление в верхней части гидроемкостей достигает необходимого уровня, система начинает подавать в реактор охлаждающую воду с начальным проектным расходом.

Процессы взаимодействия пара и воды в заглушенной трубе системы ГЕ-2, происходящие с глубоким недогревом жидкости (до 150°C) и отсутствием искусственных центров образования пузырей (дырчатого листа), значительно отличаются от барботажа [2].

Параметры формирующегося парокапельного потока определяются совместным влиянием нестационарной конденсации пара на каплях различных размеров, движущихся с различными скоростями, и пленочной конденсации на осушенной холодной стенке, а также процессом тепломассопереноса [3].

Нестационарные процессы взаимодействия пара и холодной воды в паровой линии могут отрицательно повлиять на время запуска системы ГЕ-2 в работу. По регламенту максимальное время выхода системы на проектный расход, определенное из условий обеспечения охлаждения активной зоны при максимальной течи, не должно превышать 100 с. В связи с этим оказалось необходимым экспериментальное исследование процессов истечения холодной воды во встречный поток пара в вертикальной заглушенной трубе, направленное на выяснение механизма взаимодействия двух сред.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

Для выполнения исследований была разработана экспериментальная установка (рис. 2), которая состояла из парогенератора, накопительных баков, рабочего участка с мерным баком и технологических линий с запорной арматурой. Технологическое оборудование и трубопроводы были оснащены регулируемыми нихромовыми электронагревателями и теплоизолированы [4].

Выяснить механизм взаимодействия пара и холодной воды на паропроводе натуральных размеров (высота ~ 30 м) довольно сложно, поэтому эксперименты были проведены на моделях вертикального участка системы ГЕ-2 натурального диаметра, но меньшей высоты. Всего было создано три рабочих участка диаметром 50 и 98 мм и высотой 1000 и 3000 мм. На рисунке 3 показана конструкция одного из них – РУ-1000/98.

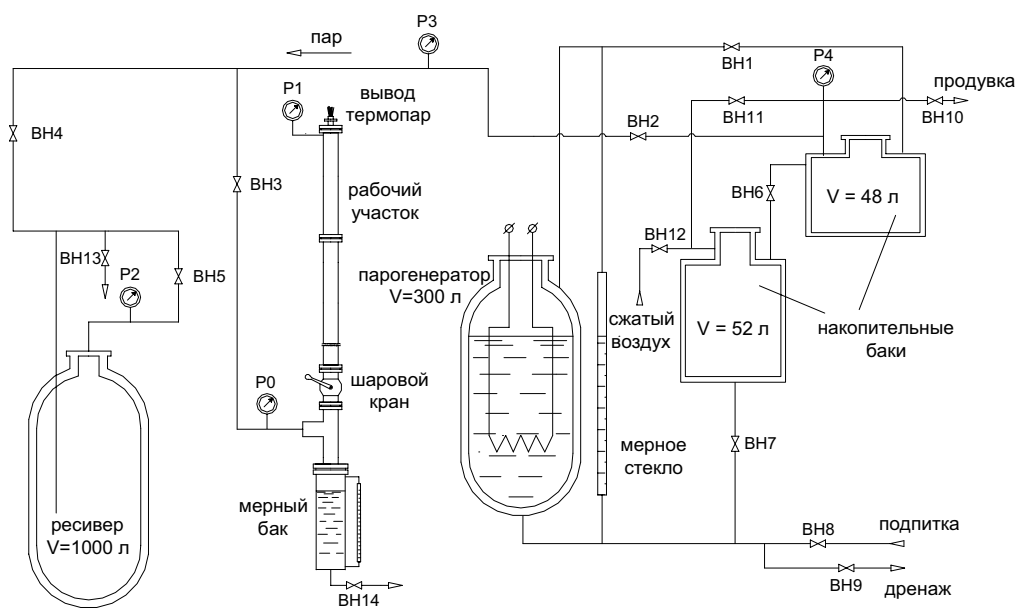


Рис. 2. Технологическая схема экспериментальной установки

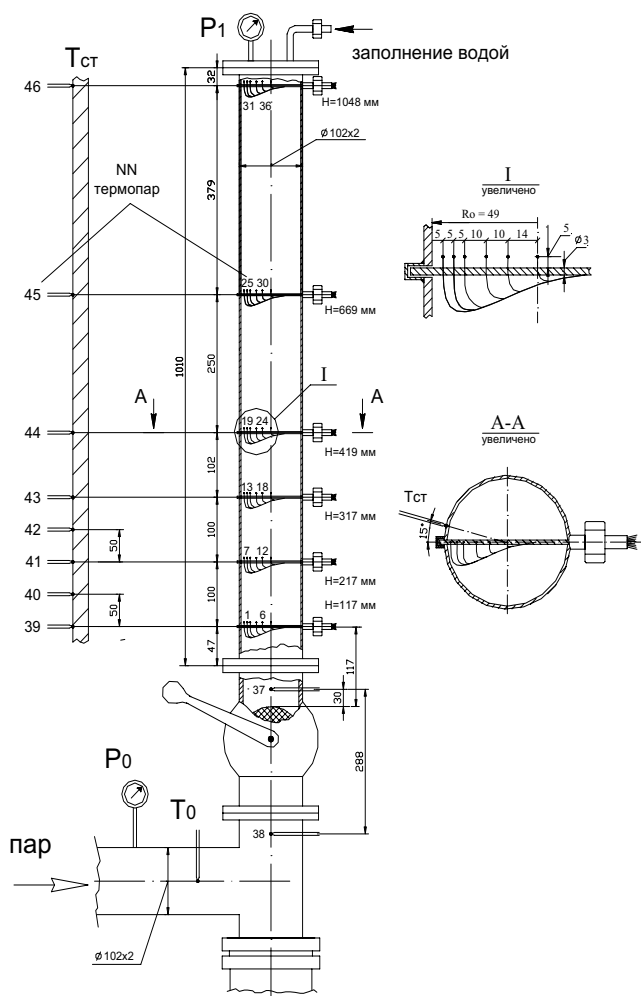


Рис. 3. Рабочий участок РУ-1000/98

ментах термопар позволяла регистрировать процессы смены фаз «пар – вода» с частотой 5 Гц. В верхней части рабочего участка расположен патрубок с вентилем для заполнения водой и датчик измерения давления Сапфир-22М-ДИ-2150.

Температуру наружной стенки рабочего участка измеряли поверхностными термопарами, приваренными к трубе в восьми сечениях по высоте, причем шесть из них располагались на тех же высотных отметках, что и внутренние термопарные гребенки. Во избежание блокирования паровой линии стекающей жидкостью в нижней части рабочего участка расположен тройник, через который жидкость стекает в мерный бак. К мерному стеклу бака прикреплена шкала с ценой деления 1 мм.

Для каждого эксперимента электронагревателями предварительно устанавливался изотермический режим, затем пар подавался к мерному баку и шаровому крану. Для удаления начальной паровоздушной смеси из нижней точки мерного бака производилась продувка в атмосферу. После подготовки парового контура рабочий участок заполнялся дистиллированной водой. Во избежание сохранения воздушной полости в верхней части участка выход воздуха при заполнении осуществлялся через импульсную линию датчика давления. Давление воды в рабочем участке во всех экспериментах составляло 0,1 МПа, а температура соответствова-

Рабочий участок представлял собой заглушенную трубу из нержавеющей стали диаметром 102x2 мм и высотой 1000 мм. Рабочий участок оснащен шестью термопарными гребенками, которые регистрировали прохождение фронта раздела фаз «пар – жидкость», а также температурные поля в текущем паровом объеме по мере осушения трубы. Каждая гребенка состояла из шести хромель-копелевых термопар, жестко закрепленных на несущем стержне диаметром 3 мм и измеряющих профиль температуры по радиусу трубы. Наружный диаметр защитной оболочки кабельных термопар из нержавеющей стали составлял 0,8 мм. Горячие спаи термопар (открытого типа) сварены лазером заодно с защитной оболочкой. Перед экспериментами каждая термопара была отградуирована в кипящей воде. Полученная экспериментальным путем динамическая характеристика используемых в экспери-

ла температуре окружающей среды ($\sim 25^\circ\text{C}$). После полной подготовки технологических линий и рабочего участка включалась система сбора данных и открытием шарового крана пар подавался в трубу [5].

Регистрация уровня изливающейся жидкости в мерном стекле производилась с помощью видеокамеры. Сбор и обработка экспериментальных данных осуществлялись системой на базе персонального компьютера.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Первоначально экспериментальные исследования были выполнены на рабочих участках внутренним диаметром 50 мм и высотой 1000 и 3000 мм – РУ-1000/50 и РУ-3000/50.

К гидродинамическим характеристикам исследуемого процесса относятся скорость изменения объема (расход) изливаемой жидкости и динамика давления в рабочем участке. Результаты измерения объемов жидкости и относительного избыточного давления в эксперименте с рабочим участком РУ-3000/50 представлены на рис. 4.

Прекращение роста объема изливающейся жидкости и резкое повышение давления определяют момент опорожнения трубы – время истечения. В данном эксперименте оно составило 173,0 с. В опыте с рабочим участком высотой 1000 мм (РУ-1000/50) время истечения равнялось 46,0 с.

На рисунке 5 приведен пример записи показаний термопар, расположенных в нижней части рабочего участка РУ-3000/50, в одном из экспериментов (высота расположения термопар отсчитывалась от шарового крана, т.е. от нижней границы столба жидкости в рабочем участке). Из рисунка видно, что после открытия

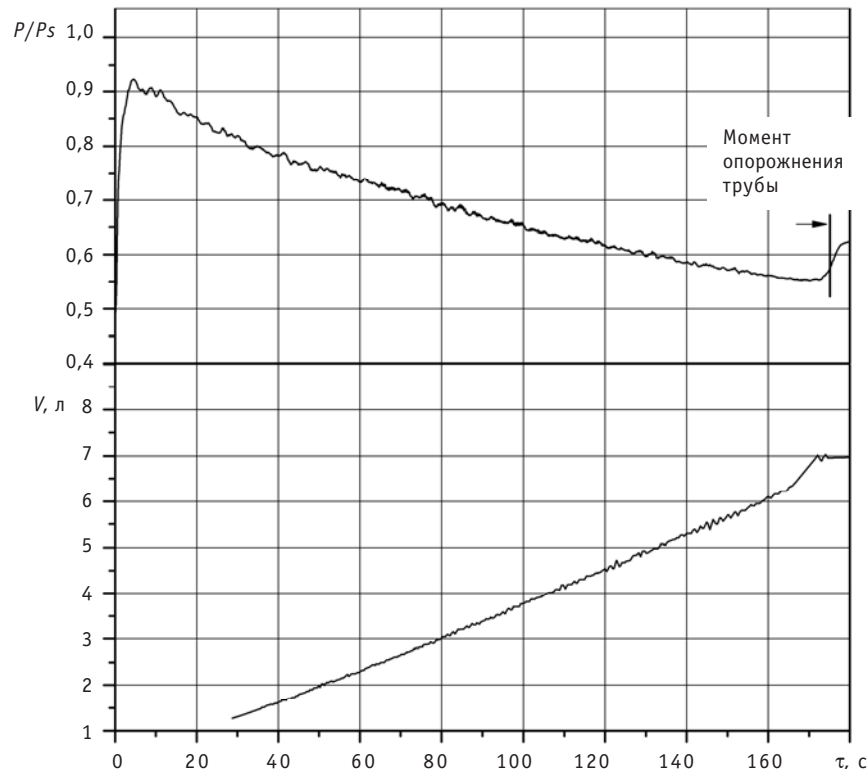


Рис. 4. Изменение относительного давления в верхней точке рабочего участка РУ-3000/50 и объема жидкости в мерном баке

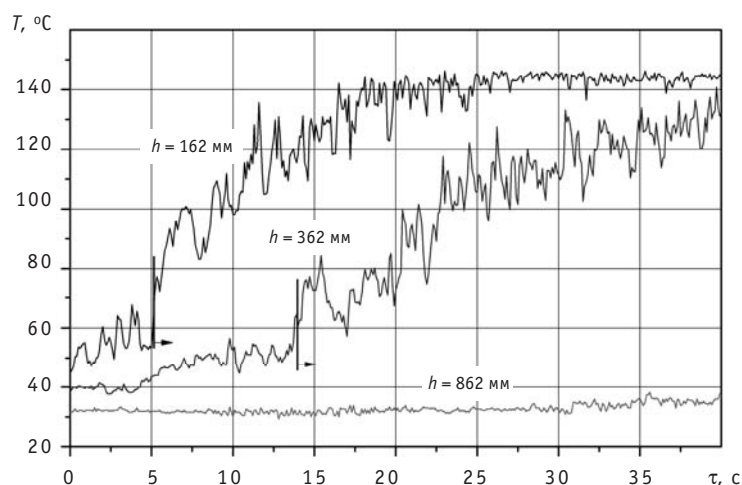


Рис. 5. Изменение температуры двухфазного потока в центре рабочего участка РУ-3000/50 в начальный период истечения; h – высота расположения термодатчиков

шарового крана в момент времени $\tau=0$ с в объеме жидкости начинается рост температуры. Причем этот процесс последовательно с некоторым интервалом регистрируется термодатчиками, расположенными на разных высотах.

На рисунке 5 отмечены времена прохождения границ раздела фаз точек расположения термодатчиков, составившие ~5,5 и 14 с для термодатчиков, установленных на высотах 162 и 362 мм соответственно. После прохождения границы раздела фаз (термодатчики находятся в паровой фазе) наблюдается постепенный рост показаний термодатчика до температуры насыщения. Такое значение температуры сохранялось до момента опорожнения трубы, следовательно, в этой зоне постоянно присутствует парокапельная смесь, состоящая из восходящего потока пара и падающих объемов жидкости. Амплитуда пульсаций температуры после прохождения границы раздела фаз постепенно уменьшалась, а частота пульсаций увеличивалась, что свидетельствует о росте температуры падающих объемов жидкости, регистрируемых термодатчиком, и об уменьшении их размеров (дроблении). Это также сви-

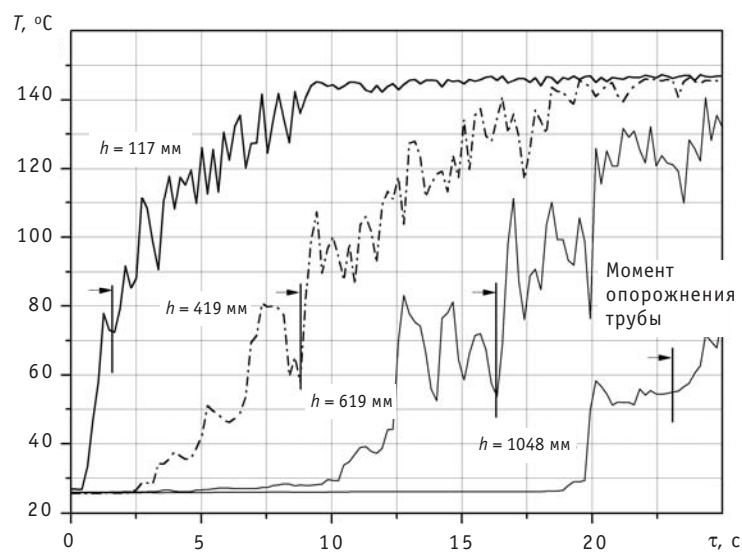


Рис. 6. Изменение температуры двухфазного потока в центре рабочего участка РУ-1000/98; h – высота расположения термодатчиков

детельствует о продвижении границы взаимодействия пара и воды вверх в процессе истечения.

Для выяснения влияния диаметра трубы на время опорожнения были проведены эксперименты на рабочем участке РУ-1000/98 высотой 1000 мм и диаметром 98 мм. Распределение температур по высоте трубы показано на рис. 6.

Аналогично экспериментам на рабочих участках диаметром 50 мм в данных опытах также наблюдался последовательный рост показаний термодатчиков, свидетельствующий о продвижении границы раздела фаз «пар-жидкость» вверх по мере опорожнения трубы.

ОБОБЩЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ИСТЕЧЕНИЯ НЕДОГРЕТОЙ ВОДЫ ВО ВСТРЕЧНЫЙ ПОТОК ПАРА

Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований позволил выявить следующие характерные особенности механизма опорожнения заглушенных труб во встречный поток пара:

- из-за интенсивной конденсации пар не доходит до верха трубы с образованием там уровня, т.е. происходит «зависание» водяного столба у верхней крышки рабочего участка;

- в трубе образуется ярко выраженная граница раздела фаз «пар-жидкость», движущаяся вверх по мере опорожнения;

- истечение воды происходит двумя путями – за счет формирования и свободного отрыва объемов жидкости с «зеркала» воды и удаления части жидкости вместе со стекающей по стенке пленкой конденсата;

- при падении объемы жидкости дробятся на более мелкие и прогреваются за счет конденсации на них потока пара, в связи с чем вслед за поднимающейся границей раздела фаз следует парокапельная смесь;

- параметры формирующегося парокапельного потока определяются совместным влиянием нестационарной конденсации пара на каплях различных размеров, движущихся с разными скоростями, и пленочной конденсацией на стенке; образующаяся сложная двухкомпонентная система характеризуется значительной неоднородностью распределения в объеме и изменением во времени размеров движущихся капель и параметров обеих фаз.

Графическое изображение описанной выше физической модели опорожнения заглушенной трубы во встречный поток пара представлено на рис. 7.

Измеренные экспериментально времена истечения и рассчитанные по ним скорости истечения воды во встречный поток пара приведены в табл. 1.

На основании полученных результатов была определена полуэмпирическая формула, описывающая процессы истечения воды из заглушенных сверху вертикальных труб в пар.

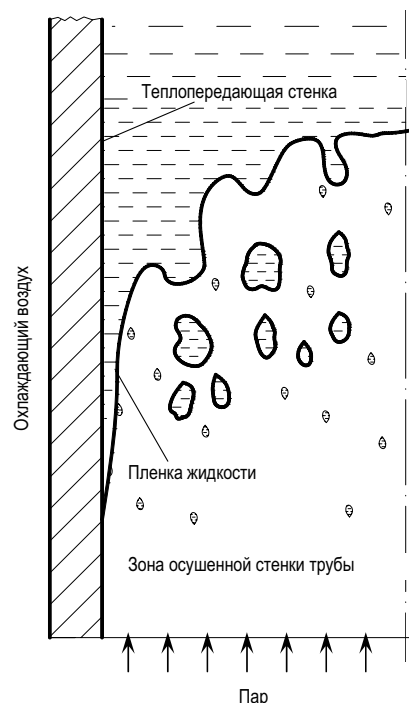


Рис. 7. Графическое изображение процесса взаимодействия воды со встречным потоком насыщенного пара в вертикальной заглушенной трубе

Таблица 1

Характеристики истечения воды во встречный поток пара в рабочих участках

Рабочий участок	Внутренний диаметр d , м	Высота трубы h , м	Время истечения $\tau_{\text{ист}}$, с	Средняя скорость истечения W , м/с
РУ-3000/50	$50 \cdot 10^{-3}$	3,0	173	$18,1 \cdot 10^{-3}$
РУ-1000/50	$50 \cdot 10^{-3}$	1,0	46,0	$24,7 \cdot 10^{-3}$
РУ-1000/98	$98 \cdot 10^{-3}$	1,0	23,0	$47,3 \cdot 10^{-3}$

Средняя скорость истечения рассчитывается по известной формуле:

$$W = c_0 \cdot \sqrt{gd}, \quad (1)$$

где c_0 – безразмерная эмпирическая константа, определяемая физикой процесса; $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения; d – внутренний диаметр трубы, м.

В нашем случае коэффициент c_0 должен быть дополнен коэффициентом ε_h , который является функцией отношения высоты к диаметру трубы, и выражение (1) примет вид

$$W = c \cdot \sqrt{gd} \cdot \varepsilon_h. \quad (2)$$

Для геометрии исследуемых рабочих участков $c_0 = 0,019$, а ε_h определяется зависимостью

$$\varepsilon_h = 1 + 17,1 \cdot \left(\frac{h}{d}\right)^{-1}. \quad (3)$$

Итоговое выражение для расчета средней скорости истечения

$$W = 0,019 \cdot \sqrt{gd} \cdot \left[1 + 17,1 \cdot \left(\frac{d}{h}\right)\right]. \quad (4)$$

Время истечения можно рассчитывать по зависимости

$$\tau_{\text{ист}} = \frac{h}{W} = \frac{h}{0,019 \cdot \sqrt{gd} \cdot \left[1 + 17,1 \cdot \left(\frac{d}{h}\right)\right]}. \quad (5)$$

Данная формула применима для расчета времени истечения недогретой воды

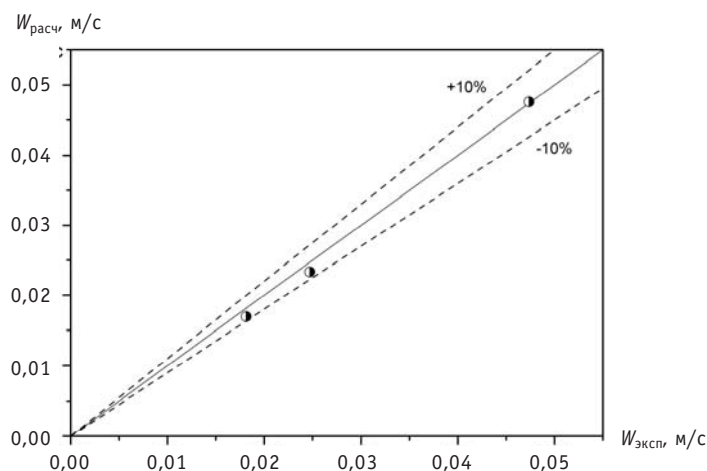


Рис. 8. Сравнение расчетных значений скоростей истечения с экспериментальными данными

во встречный поток пара из вертикальных труб высотой $h \geq 1$ м и диаметром $d = 0,05\text{--}0,1$ м.

Сравнение расчетных и экспериментальных данных по скоростям истечения представлено на рис. 8. Отклонение экспериментальных точек от предложенной расчетной зависимости не превышает 10%.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Опыты, проведенные на экспериментальной установке с использованием трех рабочих участков различной высоты ($h=1,0; 3,0$ м) и диаметра ($d=0,05; 0,098$ м), показали, что скорость подъема границы раздела фаз «насыщенный пар-недогретая вода» изменялась в диапазоне 18–47 мм/с.

На основании проведенных экспериментов предложена физическая модель исследуемого процесса и получена полуэмпирическая зависимость для определения средней скорости истечения недогретой жидкости во встречный поток пара в вертикальной заглушенной трубе.

Полученные впервые экспериментальные данные по скоростям истечения холодной воды во встречный поток пара в вертикальной заглушенной трубе могут использоваться для корректировки проектной гидравлической схемы системы ГЕ-2 и приведения ее к необходимым характеристикам с учетом заданного времени выхода системы на проектный расход.

Литература

1. Беркович В.М., Копытов И.И., Таранов Г.С. и др. Особенности проекта АЭС нового поколения с реактором ВВЭР-1000 повышенной безопасности // Теплоэнергетика. – 2005. – № 1. – С. 9–15.
2. Кутателадзе С.С., Стырикович М.А. Гидравлика газожидкостных систем. – Л.: Энергоиздат, 1958. – 232 с.
3. Берман Л.Д., Гордон Б.Г., Богданов С.М. Опытные зависимости для расчета теплообмена при конденсации пара на диспергированной струе воды // Теплоэнергетика. – 1983. – № 3. – С. 19–22.
4. Морозов А.В., Цыганок А.А. Экспериментальные исследования теплогидравлических процессов в пассивной системе безопасности АЭС/XV школа-семинар молодых ученых и специалистов «Проблемы газодинамики и тепломассообмена в энергетических установках» (Калуга, 23–27 мая 2005 г.): Сб. трудов. – М.: МЭИ, 2005. – Т. 2. – С. 176–179.
5. Морозов А.В., Ремизов О.В., Цыганок А.А. Истечение воды из замкнутых емкостей во встречные потоки различных газовых сред // Известия Академии наук. Энергетика. – 2005. – № 1. – С. 110–118.

Поступила в редакцию 1.09.2009

The paper presents the results of experimental investigation of changes in physical characteristics of the SM reactor core in the course of its conversion to new fuel with the increased content of U-235 in a fuel rod. The methodical peculiarities of the experiments are described. The functional dependences and values of the temperature and power coefficients of reactivity have been determined as well as the effectiveness and calibration characteristics of the control rods and reactivity effects when reloading the fuel assemblies. The performed micro-runs have been analyzed in terms of the feasibility of the reactor with pilot fuel assemblies. Data have been obtained to introduce changes into the reactor design documents and to revise the safety analysis. Based on the obtained results, the recommendations have been made on the possibility to use the new pilot fuel assemblies as standard ones.

УДК 621.039.52:615.849.1

Subcritical Systems for Neutron Therapy: Simulation Techniques & Performance Criteria \Yu.A. Kurachenko; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 3 tables, 7 illustrations. – References, 11 titles.

Simulation techniques based on combined transport codes application to new neutron facilities beams are proposed. «In air» & «in phantom» characteristics of the facilities are optimized for the neutron capture therapy. It is displayed that new facilities provide absolute safety, simplicity of technology and exploiting; they are highly competitive with these existing and designing ones for the neutron capture therapy.

УДК 621.039.553.34

Status of Study on Heat Transfer in Fuel Pin Bundles and Some Problems of Liquid-Metal Cooling \A.V. Zhukov, J.A. Kuzina, A.P. Sorokin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 14 pages, 1 table, 11 illustrations. – References, 28 titles.

Data on heat transfer and temperature fields of fuel pins in triangular and square lattices with liquid-metal cooling are systematized. Necessity of detailed additional studies for square pin lattices is emphasized.

УДК 621.039.51:536.248.2

The generalize of Experimental Data on the Critical Heat Flux in the Clusters with Triangular Disposition of Rods \A.A. Ivashkevitch; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 6 pages, 2 tables. – References, 18 titles.

The correlation for the critical heat flux in form $q_{кр} = x_{bx} L_k$ in the uniformly heated clusters with the triangular disposition of the rods is obtained. As compared with the early suggested correlations the proposed correlation generalizes the experimental data in the more broad diapasons of the regime parameters and with smaller standard deviation.

УДК 621.039.58:532.529.5

Experimental Study of Non-equilibrium Thermal-hydraulic Processes in a Passive VVER Core Reflooding System \A.V. Morozov, O.V. Remizov, A.A. Tsyganok; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 1 table, 8 illustrations. – References, 5 titles.

The paper presents the results of experimental investigations of the interaction between saturated steam and cold water at its flowing out from a vertical tube of the passive VVER core reflooding system from the second-stage hydroaccumulators. A physical model of the process of water outflow into countercurrent saturated steam flow in a vertical blanked-off tube with a variable level has been proposed. The semi-empirical correlation has been obtained for calculating the time of discharge from vertical blanked-off tubes.

УДК 621.039.58:536.423

Experimental Measurement of the Thermal Capacity of the VVER Steam Generator Model in Condensation Mode in the Event of the Beyond Design Basis Accident \A.V. Morozov, O.V. Remizov, A.A. Tsyganok, D.S. Kalyakin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 7 illustrations. – References, 4 titles.

The experimental measurement of the thermal capacity of the VVER steam generator model in