

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

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

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

*** ОКБ «Гидропресс», г. Подольск*



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

ВВЕДЕНИЕ

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

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

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

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

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

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

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

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

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

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

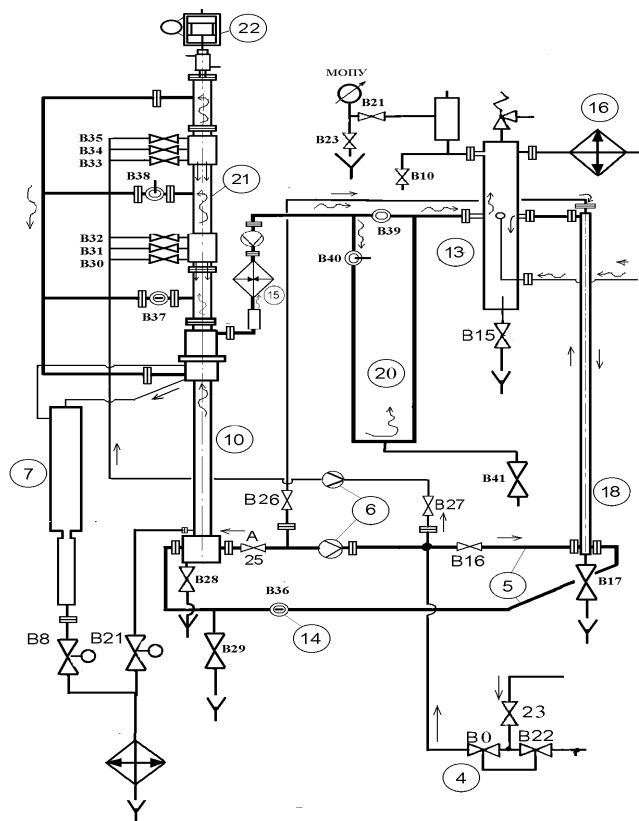


Рис. 1. Схема петли повторного залива (ПЗ-37.3): 4 - перекидной клапан, сдвоенный; 5 - перемычки короткая (ПК) и длинная (ПД); 7 - сосуд унесенной влаги; 10 - рабочая колонка РК (модель ТВС); 13 - паровой компенсатор-смеситель КС (имитатор разрыва); 18 - напорный коллектор НК (модель НКР); 20 - модель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

высоте 255 мм. Последняя по высоте от начала обогрева, стальная цельноточеная решетка служила токоподводом. Выше этой решетки устанавливалась дырчатая плита со 121 отверстием диаметром 5,5 мм, как и на штатной плите.

Исследования проведены при параметрах, соответствующих стадии повторного залива по сценарию ОКБ ГП, начиная примерно с 20-30 с после аварии, и срабатывания аварийной защиты, в том числе: при давлениях от 0,15 до 0,5 МПа, скоростях залива от 1,5 до 14,0 см/с, температурах воды на входе от 50 до 140 °С, максимальной "стартовой" температуре оболочки от 400 до 800 °С и максимальном линейном тепловом потоке на стержне 0,9-2,9 кВт/м, со снижением его по закону остаточного тепловыделения до завершения повторного смачивания (400 - 1200 с).

Режим повторного залива воспроизводился на предварительно осушенной и

прогретой сухим насыщенным паром рабочего давления модели ТВС и остального оборудования петли ПЗ-37, после чего на пучок подавалась мощность. Уровень мощности автоматически повышался до "стартового" значения и поддерживался постоянным до достижения оболочки любого из стержней "стартовой" температуры. После чего одновременно начиналось снижение мощности по закону остаточного тепловыделения и включалась подача охлаждающей воды. В зависимости от скомплектованной по заданию схемы и типа залива - нижний, верхний, комбинированный - охлаждающая вода подавалась непосредственно в нижнюю камеру через напорный коллектор, в верхнюю камеру одновременно сверху и снизу с высот, адекватных положению патрубков ввода в реактор воды СА03. Режим прекращался отключением мощности, когда все стержневые термодатчики достигали температуры, соответствующей температуре насыщения.

В эксперименте измеря-

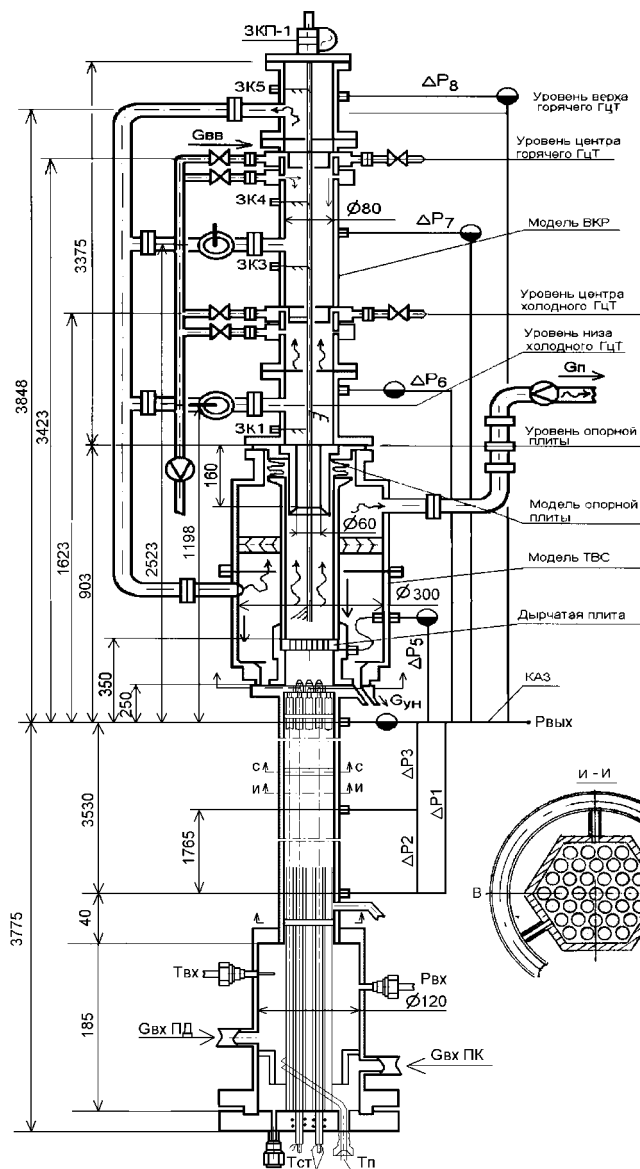


Рис. 2. Схема модели ТВС с ВКР

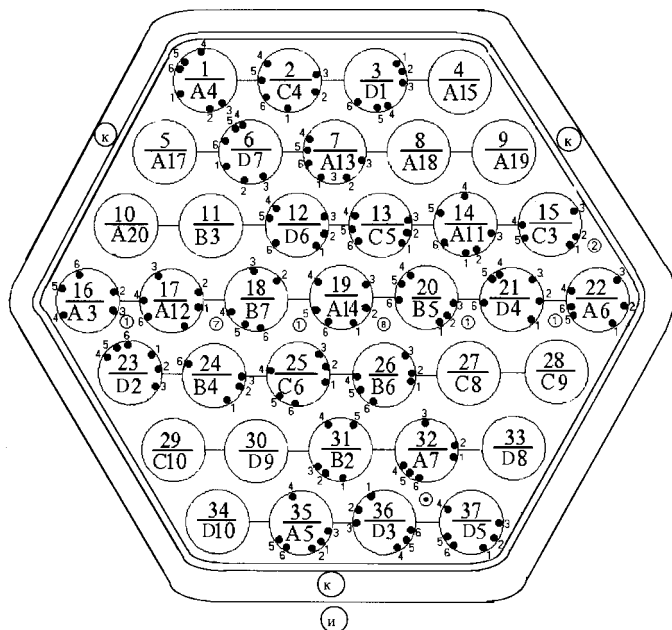


Рис. 3. Схема распределения датчиков по сечению рабочей колонки

КВ-37-4 (вид сверху): $\frac{19}{A14}$ - номер стержня / тип имитатора и номер имитатора по паспорту; \bullet ⑦, ⑧, ⑨ - термопары: стеночная, поточная, корпусная, теплоизоляции

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

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

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

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

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

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

Результаты измерений в первом базовом варианте с фиксированным расходом (без

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

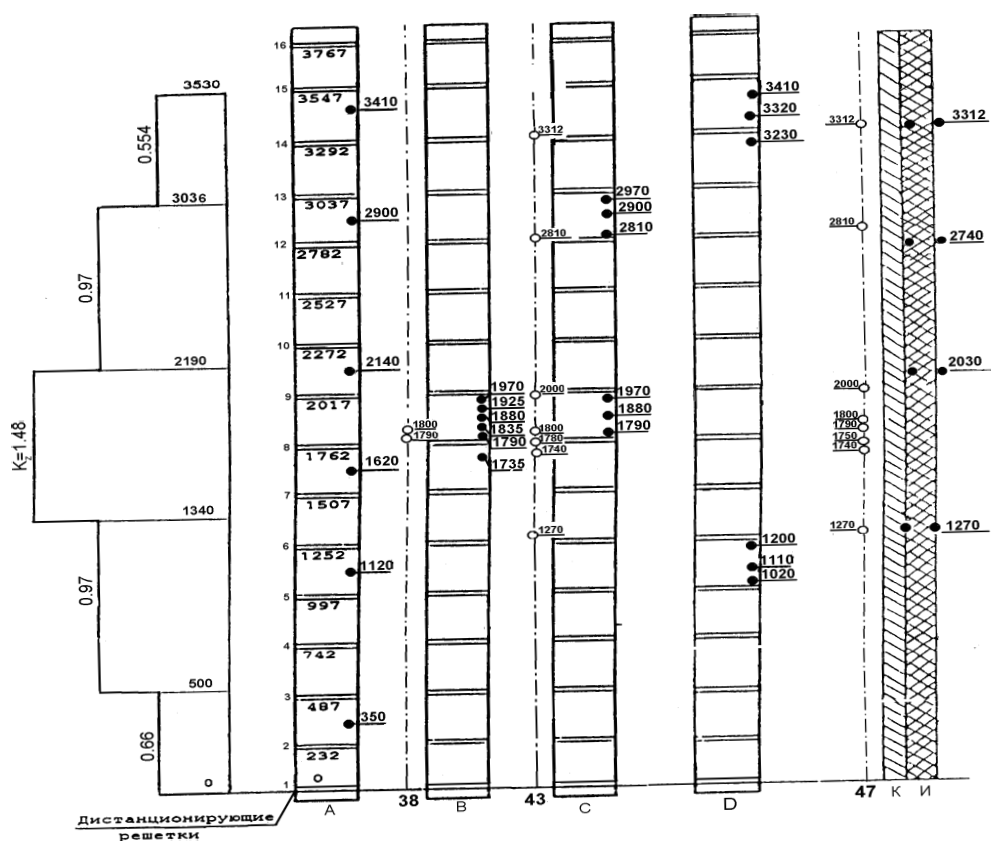


Рис. 4. Профиль тепловыделения и расположение термопар по высоте в рабочей колонке KB-37/4: А, В, С, Д- типы имитаторов; К - корпус; И - изоляция; • - термопары для измерения температуры стенки; о- термопары для измерения температуры жидкости; 1-16 - номер дистанционирующей решетки; 47- номер гидравлической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

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

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

- повышение давления снижает время залива, не сказываясь существенно на значениях максимальных температур (рис. 6);

- увеличение стартовых значений мощности и температуры оболочки, приво-

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

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

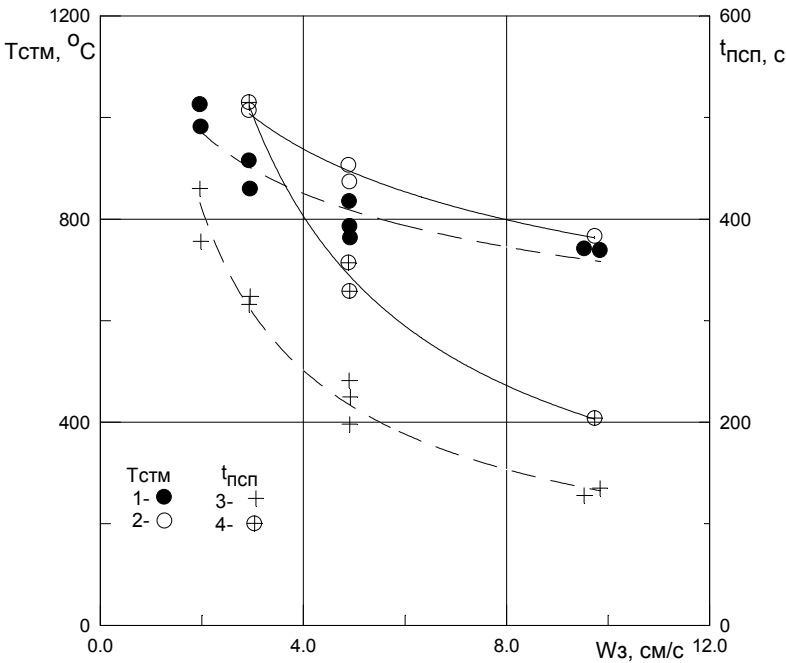


Рис. 5. Зависимость максимальной температуры имитатора (МТИ) и времени наступления повторного смачивания пучка (НПС) от скорости залива для КВ-37-1 (залив снизу): $P=276$ кПа, $T_{вх}=50^{\circ}\text{C}$: 1, 3 - $q_{\lambda c}=1.8$ кВт/м; 2, 4 - $q_{\lambda c}=2.5$ кВт/м.

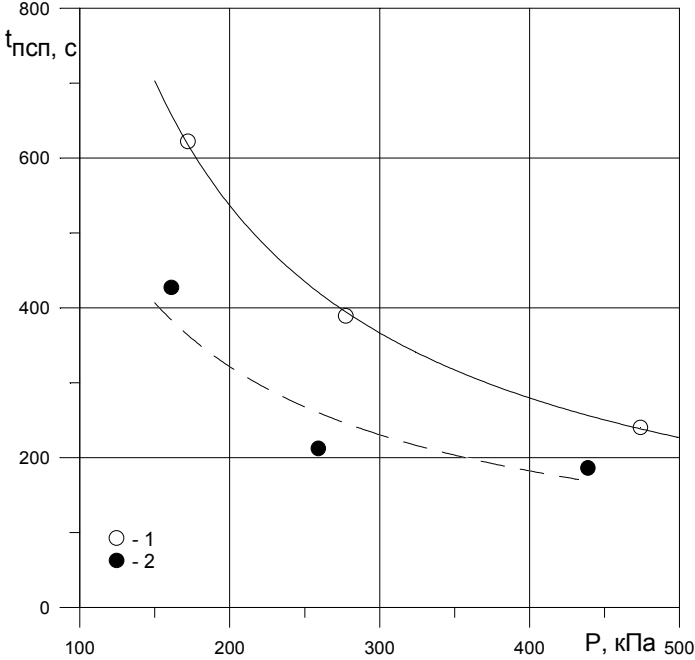


Рис. 6. Зависимость времени НПС пучка КВ-37-1 от давления (залив снизу), $W_z=5$ см/с, $\Delta T_{нед}=44^{\circ}\text{C}$: 1 - $q_{\lambda c}=2.6$ кВт/м; 2 - $q_{\lambda c}=1.8$ кВт/м

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

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

где Q_0 - количество тепла, накопленное в обогреваемом стержне, на момент начала залива ($t=t_c$); $\sum Q$ - количество тепла, выделенное в обогреваемом стержне до

момента завершения повторного смачивания ($t=t_{\text{псп}}$); $\frac{\rho \omega \cdot F_n}{n_{\text{ст}}}$ - расход, приходящийся на один обогреваемый стержень (кг/с); $n_{\text{ст}}$ - количество обогреваемых стержней в пучке.

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

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

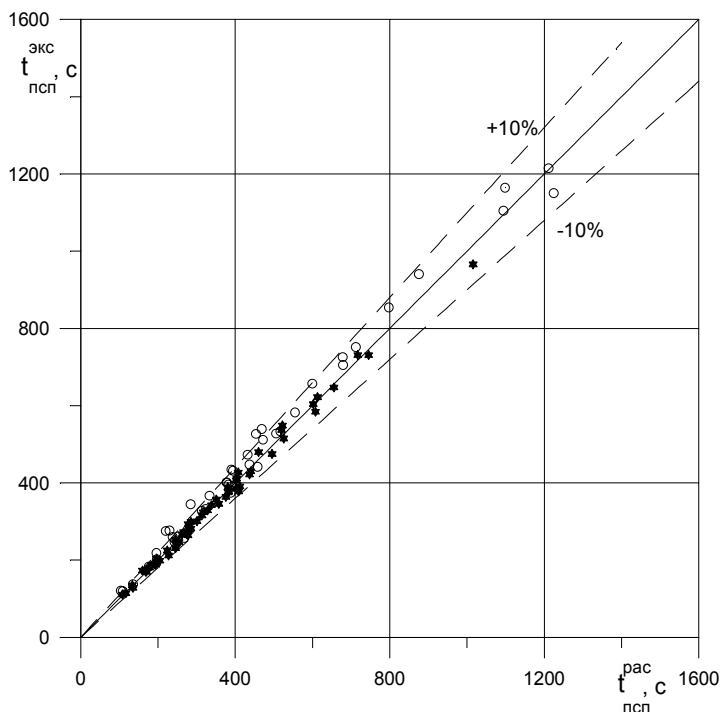


Рис. 7. Сравнение времени НПС для KB-37-1 и KB-7 с расчетом по зависимости (1) (залив снизу):
 о- KB-7; • - KB-37-1, KB-37-3, $P=150-580$ кПа, $W_3=1.43-14$ см/с, $q_{\text{лс}}=1.1-2.9$ кВт/м, $T_{\text{вх}}=48-134^\circ\text{C}$,
 $T_{\text{стс}}=400-800^\circ\text{C}$

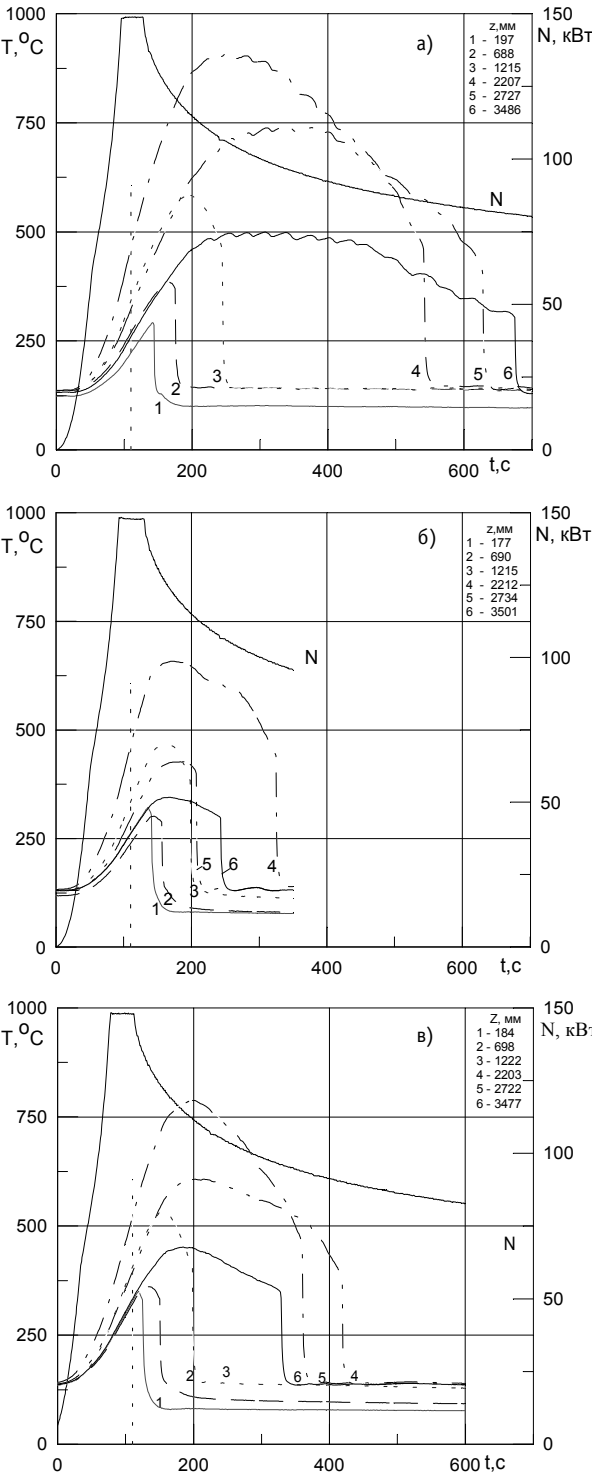


Рис. 8. Температура имитатора: $P=276\text{кПа}$; $T_{\text{СТС}}=600^\circ\text{C}$; $q_{\text{лс}}=1.8-1.9\text{кВт/ч}$; а) один фронт смачивания $W_3=1.98\text{см/с}$, $T_{\text{вх}}=87^\circ\text{C}$; б) два фронта смачивания - сопутных $W_3=4.9\text{см/с}$, $T_{\text{вх}}=51^\circ\text{C}$; в) два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

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

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

Результаты опытов показали, что при открытии вентиля у НКР происходит снижение до 2 раз реального количества воды, поступающей в модель ТВС, за счет ухода воды в НКР и создания в нем уровня, а затем и слива ее в КС при достижении уровнем отметки «разрыва». В этом случае при «стартовых» тепловом потоке 1.8кВт/м и температуре стержней 700°C , максимальная температура возросла до 944°C , а время наступления смачивания до 429с (рис. 9).

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

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

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

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

Проведены две группы опытов:

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

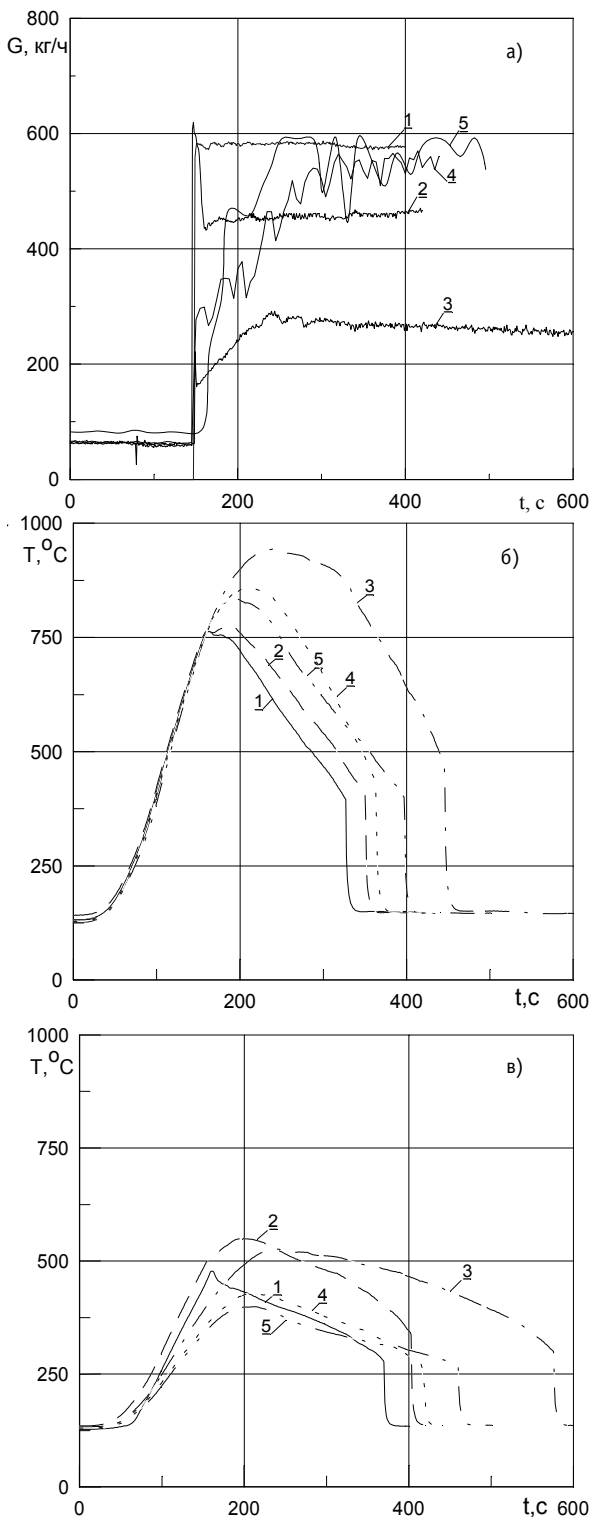


Рис. 9. Расход охлаждающей воды через пучок модели ТВС и температура стенки имитатора. $P=240-275$ кПа; $W_3=4,9-5,0$ см/с; $T_{СТС}=698-735$ °C, $T_{ВХ}=51$ °C; $q_{\lambda C}=1,72-1,8$ кВт/м: а) расход охлаждающей воды через пучок РК; б) температура имитатора с максимальной температурой; в) температура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

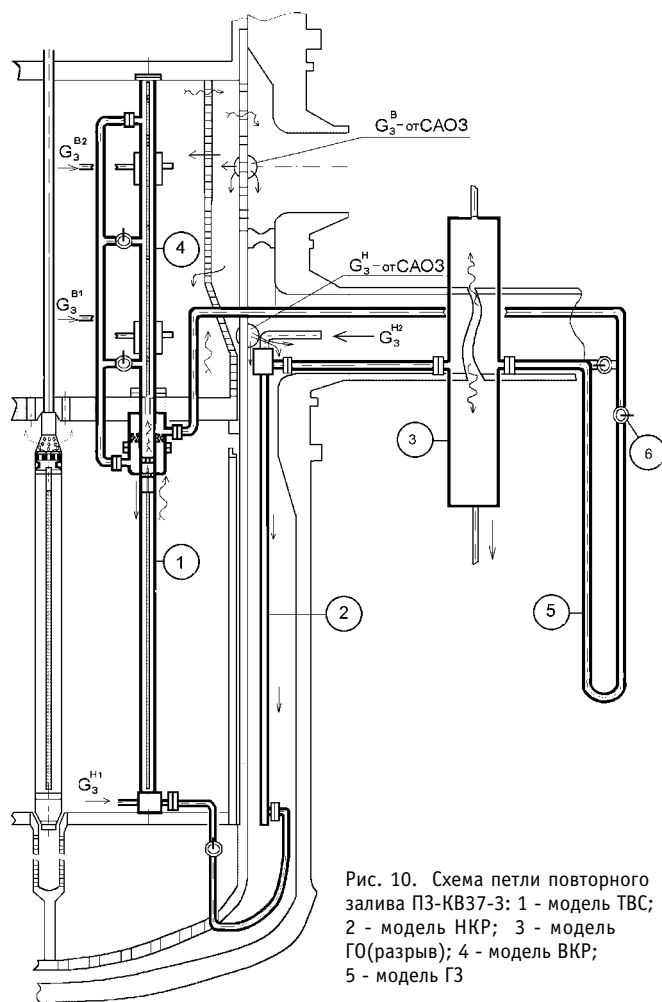


Рис. 10. Схема петли повторного залива ПЗ-КВ37-3: 1 - модель ТВС; 2 - модель НКР; 3 - модель ГО(разрыв); 4 - модель ВКР; 5 - модель ГЗ

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

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

Результаты опытов первой группы показали существенное различие условий охлаждения

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

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

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

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

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

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

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

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

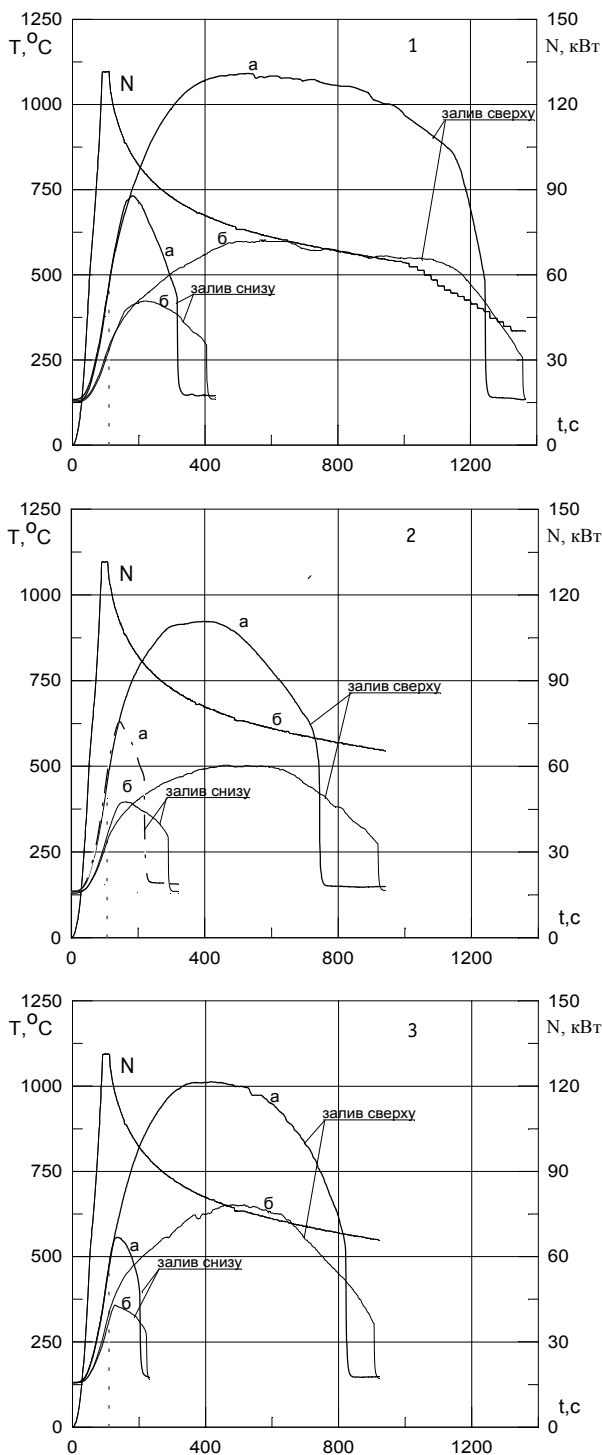


Рис.11. Температура стенки имитатора при заливе сверху и снизу: $P=293 \text{ кПа}$; $T_{\text{стс}}=500^\circ\text{C}$; $T_{\text{вх}}=51^\circ\text{C}$; $q_{\lambda c}=1,8 \text{ кВт/м}$; 1 - $W_3=2,9 \text{ см/с}$; 2 - $W_3=4,9 \text{ см/с}$; 3 - $W_3=9,8 \text{ см/с}$; а) имитатор с максимальной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

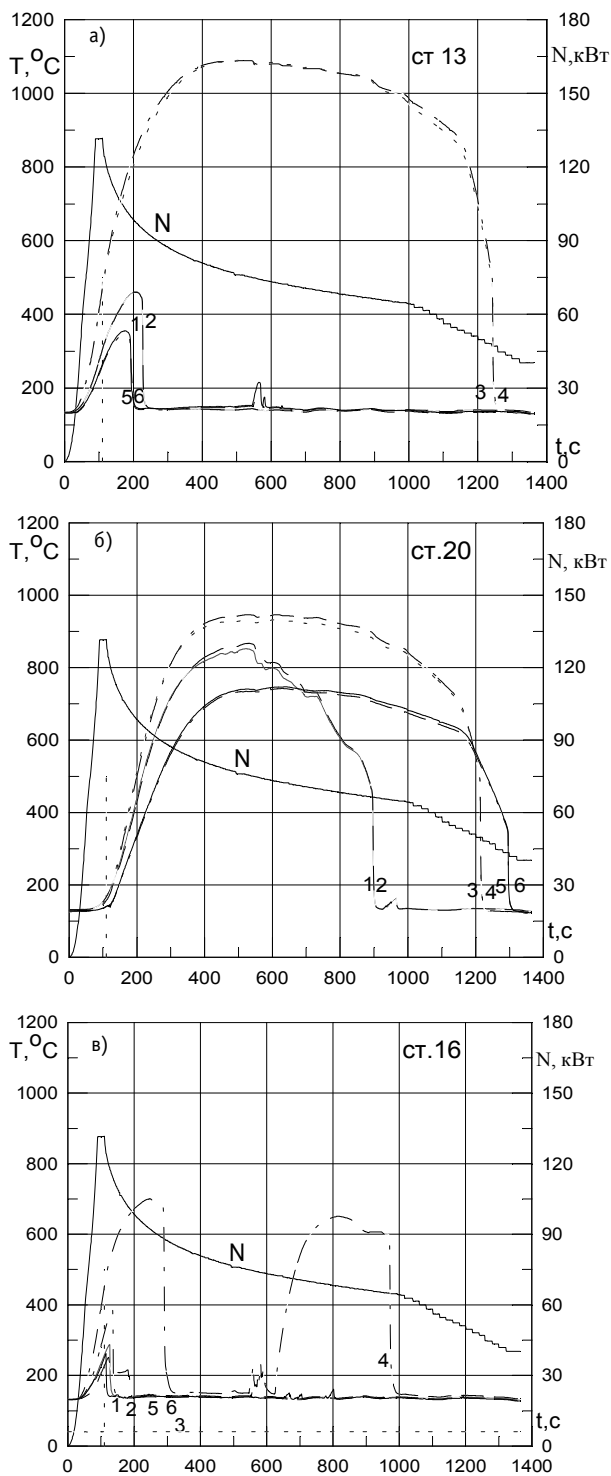


Рис. 12. Температура стенки имитаторов при заливе сверху $P=281$ кПа; $W_3=2,9$ см/с; $T_{стг}=500^\circ\text{C}$; $T_{вх}=51^\circ\text{C}$; $q_{лс}=1,77$ кВт/м: а) имитатор с максимальной температурой; б) имитатор без теплоподвода в центре; в) имитатор с теплоподводом, угловой

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

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

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

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

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

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

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

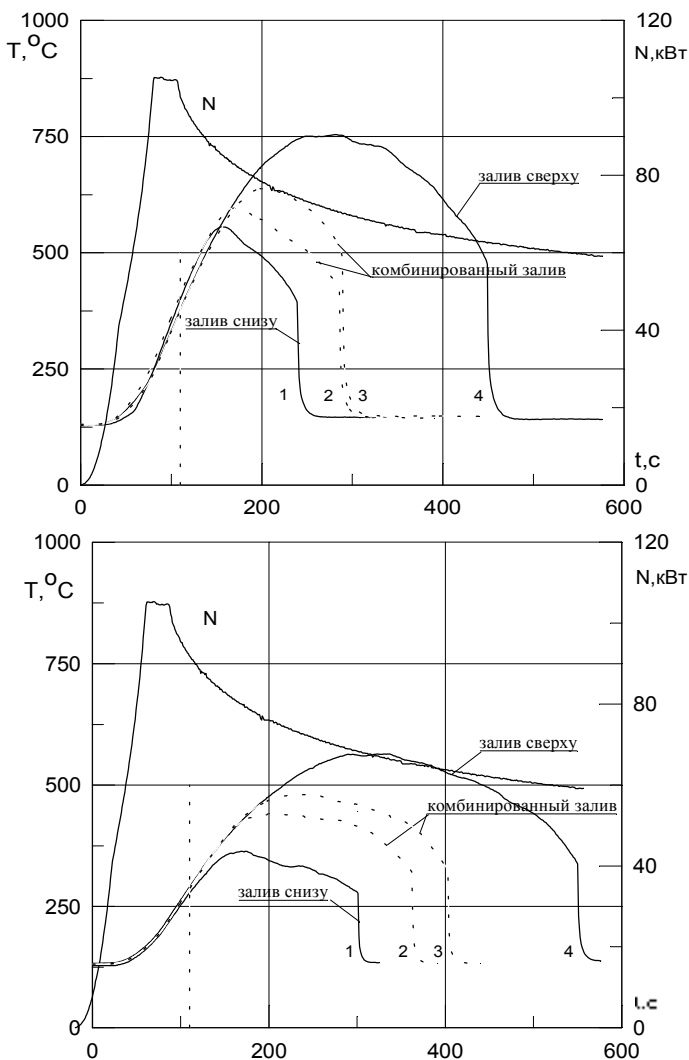


Рис. 13. Температура стенки имитаторов (КВЗ 7-3): $P=274 \text{ кПа}$; $T_{вх}=50^\circ\text{C}$; $q_{\lambda c}=1,3 \text{ кВт/м}$; $T_{стс}=400^\circ\text{C}$; W_3/W_3^* : 1- 0/5; 2 - 2/3; 3 - 3/2; 4 - 5/0 см/с: а) имитатор с максимальной температурой; б) имитатор с максимальным временем наступления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

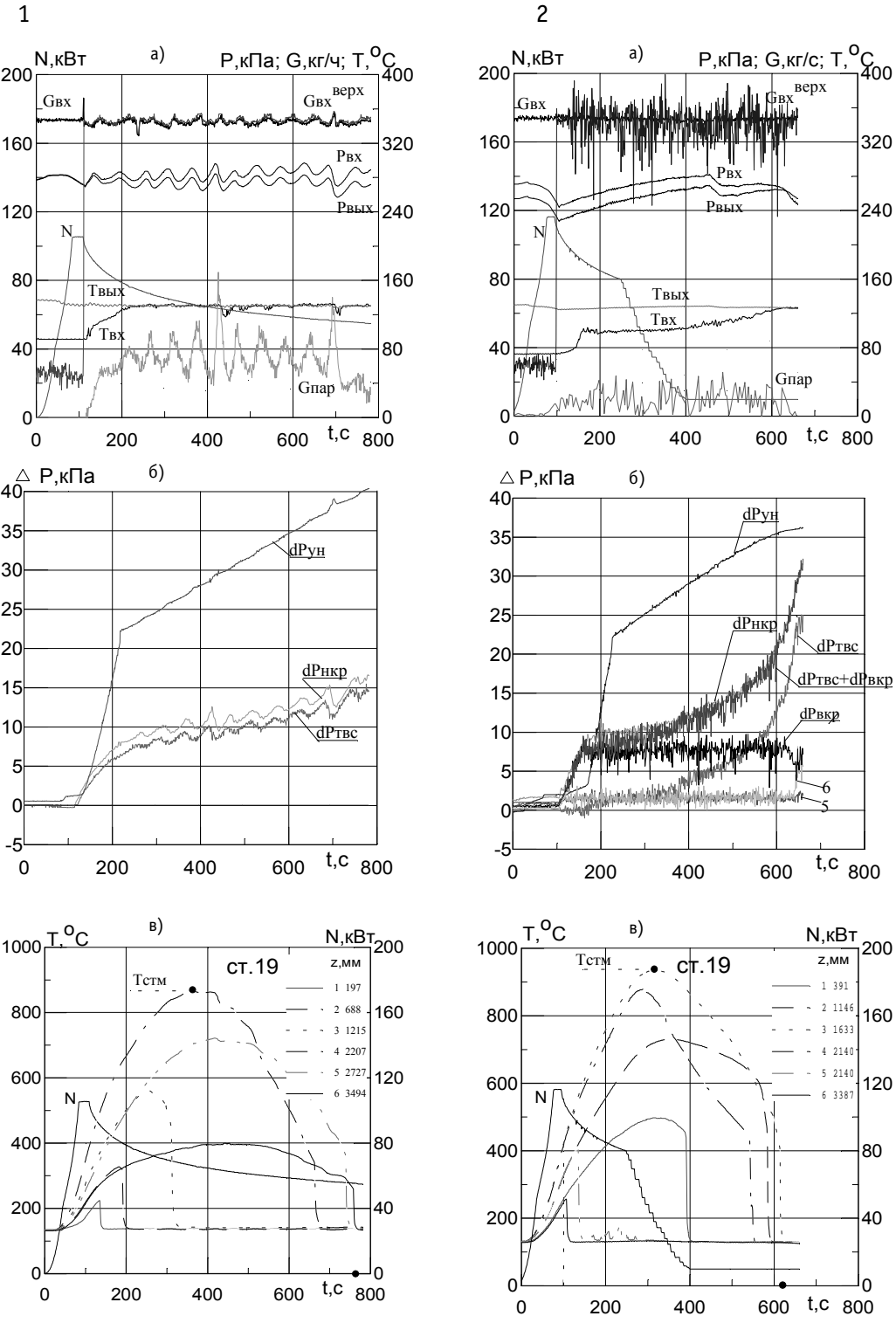


Рис. 14 Влияние установки полномасштабной верхней камеры на интегральные характеристики: 1 - залив сверху без ВКР (опыт132); 2 - залив сверху с ВКР (опыт214); а) режимные параметры: $N=105-113 кВт$ ($1,3 кВт/м$); $G_{вх}=345-349 кг/ч$ ($2,9 см/с$); $P=274-268 кПа$; $T_{вх}=50-52 °C$; $T_{стс}=400 °C$;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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

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

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

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

Список литературы

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

Поступила в редакцию 23.11.99.

УДК 621.039.554.34

Experimental and Numerical Investigations of Mass- and Heat-Exchange Processes under the Loss Coolant Accident \A.D. Efanov, V.V. Lozhkin, B.I. Kulikov, O.A. Sudnitsin, Yu.A. Bezrukov, S.N. Zaitzev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 15 pages, 14 illustrations. – References, 6 titles.

Experimental investigations of thermo-hydraulic characteristics, temperature modes of fuel assemblies simulators and velocities of wetting front under the maximal design accident at the stage of repeated gulf of reactor core are carried out on full-scale models of fuel assemblies of VVER-1000 with 7 and 37 rods. The experiments were conducted on repeated gulf loop of the stand (SVD-1).

УДК 536.24

Turbulizing Influence of Smooth Cylindrical Elements on Intensification of Heat-Exchange of Symmetric Passage Pipe Bundles \A.A. Anisin, A.K. Anisin, V.T. Buglaev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 13 pages, 5 illustrations, 2 tables. – References, 5 titles.

The opportunity is analysed for intensification of heat transfer of transversally streamlined symmetric passage pipe bundles under usage of smooth turbulizing rods sequentially disposed at centers of pipe cells in its arrangement scheme. Realization of the introduced arrangement scheme of pipe elements as a combined surface of the bundle of pipes of different diameters and its heat-air-dynamic characteristics obtained by experimental way, testify to opportunity of practical application of the offered approach to increase the efficiency of pipe heat-exchange devices.

УДК 532.526.4:621.039.534

Diagnostics of Distance up to the Point of Rupture of the Pipe Line using the Change of Hydraulic Characteristics \E.F. Avdeev, V.V. Bolshunova; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 4 pages, 1 illustration, 2 tables. – References, 4 titles.

New approach is developed for finding out the distance up to the point of partial rupture in loop contours or main pipe lines using the change of the hydraulic characteristics under initiation of leak.

УДК 621.039.564.5

Ultrasound Waveguide Multipoint System of Visualisation of Two-phase Coolant \V.I. Melnikov, V.V. Kontelev, V.V. Ivanov, X.-M. Prasser, V. Zippe; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 8 pages, 4 illustrations. – References, 17 titles.

New ultrasonic diagnostic system for high-speed visualization of coolant in pipelines is represented in the paper. The principle of activity, design features and technique of visualization of two-phase streams is described. The results of experimental testing of this system on the thermal-physical stand are given.

УДК 621.039.534.63

Effect of «Hanging» of Liquid Sodium and Its Influence on Operation of Heat Exchangers of an Evaporative - Condensation Type \M.N. Arnoldov, V.N. Bogomolov, O.G. Grigoriev, V.N. Zamusskiy; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2000. – 8 pages, 4 illustrations. – References, 9 titles.

Phenomenon of relocation of considerable volumes of liquid sodium stipulated by effect of its «hanging» on interior devices of complex construction high-temperature thermal pipes (HTTP) over contour of the sodium HTTP is described. Influence of this effect on operation of evaporative - condensation systems (ECS) is shown. Necessity of checking of the sodium level for identification of abnormal modes of the ECS connected with drainages of capillary - porous structure of evaporation zone is proved.