

ОСОБЕННОСТИ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ В КОНТУРАХ СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

С.Г. Калякин, Ю.П. Джусов, Ю.Ю. Штейн, Ю.В. Климанова

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



Естественная конвекция привлекает к себе большое внимание исследователей с точки зрения использования ее в системах пассивного отвода тепла и снятия остаточного тепловыделения от активной зоны ядерных реакторов при аварийных и нештатных ситуациях. Поэтому исследование особенностей режимов естественной конвекции представляется весьма актуальным и целесообразным для обоснования безопасности АЭС. В данной работе представлено исследование динамики развития естественной конвекции в замкнутом контуре и характер изменения параметров течения в зависимости от различных факторов (величины тепловыделения, геометрии контура и др.).

К настоящему времени было выполнено большое количество экспериментальных работ [1–6], посвященных изучению естественной конвекции как в замкнутых объемах, так и в контурах. В большинстве своем подобные работы касаются вопросов моделирования циркуляции в баках реакторов применительно к системам аварийного расхолаживания активной зоны, например, [3, 4]. В этих работах на основе экспериментальных исследований на плоской модели получены данные о динамике развития естественной конвекции и обобщающие зависимости безразмерной температуры от безразмерного времени, отражающие динамику развития изменений температуры.

Что касается исследований естественной конвекции в контурах, в качестве характерного примера можно привести работу [7], в которой представлены результаты для контура простой прямоугольной формы высотой 4 м с вертикальным расположением холодильника. Кроме того, в этой же работе рассмотрено развитие циркуляции, инициированной впрыском газа в подъемный участок. Сопоставление результатов расчетного исследования, выполненное с использованием кода RELAP5, показало хорошее совпадение результатов расчета с результатами эксперимента. В работе обращалось внимание и на то, что пассивное охлаждение ядерных реакторов является одной из интересных тем, возникших при конструировании ядерных реакторов нового поколения. Отмечено, что при определенных соотношениях подъемных сил и сил трения могут возникать пульсации даже в контурах с циркуляцией однофазной жидкости, чему также уделяется большое внимание. Поэтому можно сказать, что естественная конвекция была и остается объектом пристального внимания многих исследователей.

Целью настоящей работы является изучение развития естественной конвекции в контуре, представляющем собой комбинацию различных поворотов и гидрозат-

воров, чтобы выяснить их влияние на характер развития циркуляции. Это представляет большой интерес, поскольку наличие, например, у гидрозатвора опускной и подъемной части может привести, согласно некоторым предположениям, к возникновению особенностей в характере развития циркуляции. В этом случае горячая вода, поступающая в опускную часть гидрозатвора должна вытеснять вверх холодную жидкость в подъемной его части. Поэтому трудно предсказать априори, как при этом будет развиваться циркуляция, особенно при большой длине опускной части, сравнимой с высотой контура. В работе приводятся результаты экспериментального исследования естественной циркуляции в контуре с переменной геометрией циркуляционного тракта, которые сопоставлены с расчетом по коду RELAP5/MOD3.2.

Конструкция экспериментальной установки показана на рис. 1. Она была спроектирована таким образом, чтобы обеспечить визуальное наблюдение за развитием естественной конвекции, а также возможность оперативного изменения геометрии циркуляционного тракта, а именно: внесение в схему контура усложняющих циркуляцию элементов (поворотов, гидрозатворов).

Установка состоит из следующих основных узлов: нагревателя, выполненного из 4-х труб $\varnothing 12 \times 1$ мм длиной 3 м, обогреваемых переменным электрическим током и смонтированных внутри прозрачного корпуса диаметром 62 мм, прозрачного адиабатного подъемного участка внутренним диаметром 15 мм, воздухоотделителя, расширительного бачка, съемного горизонтального участка, горизонтально расположенного холодильника и опускного участка. Вместо горизонтального прямого участка перед холодильником предусмотрена для усложнения геометрии установка горизонтального U-образного участка, либо превращение его в гидрозатвор при вертикальной ориентации.

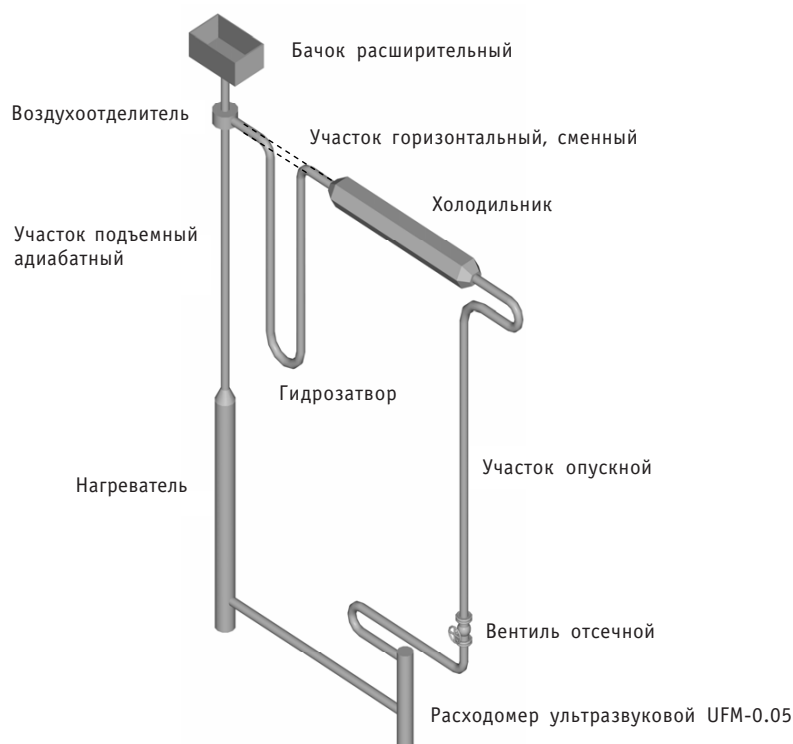


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Для измерения расхода в нижней части опускного (холодного) участка контура установлен ультразвуковой счетчик-расходомер типа UFM-005. Для обеспечения альтернативного измерения расхода на опускном участке циркуляционного тракта (на холодной линии) размещены отборники статического давления на расстоянии 5.6 м друг от друга по высоте, которые подсоединены к жидкостному дифференциальному манометру для измерения потерь давления на трение на этом участке. По измеренному значению перепада давления на трение можно вычислить скорость циркуляции (расход) теплоносителя с использованием широко известных соотношений Блазиуса или Филоненко для расчета коэффициента гидравлического сопротивления с последующим расчетом числа Re и соответственно расхода и/или скорости теплоносителя.

Температура теплоносителя измерялась на входе в нагреватель, на выходе из него и на выходе из адиабатного подъемного участка с помощью хромель-копелевых термопар, выполненных из термопарного кабеля типа КТМС.

Методика проведения экспериментов заключалась в следующем: после заполнения контура дистиллированной водой осуществлялась подача электрической мощности на нагреватель с одновременным запуском системы сбора и обработки информации. После достижения стационарного режима циркуляции теплоносителя, что определялось по кривым роста температур на выходе из нагревателя, из подъемного участка и изменения расхода, осуществлялось измерение разности уровней жидкости в дифференциальном манометре. Затем расход перекрывался с помощью вентиля 9, и вновь измерялась разность уровней, которая вычиталась из полученной при наличии расхода, что позволяло устранить погрешность измерений, обусловленную разностью плотностей жидкости в опускном участке и в импульсных линиях дифманометра.

Эксперименты проводились при трех значениях мощности нагревателя: 3, 6.6 и 10 кВт. Наибольшее значение мощности подбиралось экспериментально, чтобы предотвратить вскипание теплоносителя в нагревателе, что существенно исказило бы характер естественной циркуляции. После завершения экспериментов с прямым горизонтальным участком вместо него устанавливался U-образный участок, ориентированный в горизонтальной плоскости, который дополнительно вносил в контур четыре местных сопротивления в виде поворотов и два горизонтальных прямых участка. Полученные картины развития естественной конвекции сопоставлялись с предыдущими, что позволило выявить количественно характер влияния повышения гидравлического сопротивления на развитие естественной конвекции.

После этого U-образный участок устанавливался вертикально, превращаясь таким образом в гидрозатвор. При этом его гидравлическое сопротивление оставалось таким же, как и в предыдущем случае, но здесь должно было проявиться влияние наличия опускного и подъемного участков на механизм развития естественной конвекции.

Результаты характерных экспериментов, выполненных при трех уровнях мощности, представлены в табл. 1, где приняты следующие обозначения: $t_{вх}$ – температура воды на входе в нагреватель; $t_{вых}$ – температура воды на выходе из нагревателя; G_{UFM} – расход теплоносителя в опускном участке контура, измеренный ультразвуковым расходомером UFM-0.05; $G_{\Delta P}$ – расход теплоносителя, рассчитанный по перепаду давления на трение в опускном участке контура с использованием широко известных соотношений Блазиуса (при $Re < 2000$) и Филоненко для коэффициента гидравлического сопротивления, который сопоставлялся с расходом, измеренным ультразвуковым расходомером; $\Delta P_{дв}$ – величина движущего напора,

Таблица 1

Сводная таблица результатов экспериментов, выполненных в работе

№ опыта	N , кВт	$t_{\text{вх}}$, °C	$t_{\text{вых}}$, °C	$G_{\text{УФМ}}$, кг/с	$G_{\Delta P}$, кг/с	W , см/с	$\Delta P_{\text{дв}}$, Па	$\Sigma \Delta P$, Па
1	3.0	17.2	43.5	0.0268	0.0251	9.9	418.5	419.5
2	3.0	15.7	43.7	0.0278	0.0301	11.9	435.8	447.6
3	6.6	22.4	62.9	0.0385	0.0380	15.0	841.9	844.6
4	6.6	23.7	61.9	0.0400	0.0389	15.3	813.1	842.9
5	6.6	22.0	63.3	0.0405	0.0373	14.7	874.3	864.1
6	10.0	31.6	85.0	0.0514	0.0581	23.0	1435.9	1395.2
7	10.0	31.2	80.9	0.0503	0.0513	20.3	1300.0	1249.2
8	10.0	31.4	81.3	0.0487	–	–	1300.4	1275.1
9	10.0	29.6	79.3	0.0495	–	–	1271.8	1217.4
10	10.0	30.6	84.6	0.0503	0.0474	18.7	1438.3	1246.3
11	10.0	30.1	83.9	0.0556	0.0486	19.2	1421.8	1302.4
12	3.0	15.7	45.8	0.0260	0.0281	11.9	482.8	491.1
13	6.6	22.2	63.3	0.0367	0.0359	14.1	871.9	912.2
14	6.6	21.8	70.5	0.0354	0.0328	12.9	1093.5	1019.8
15	6.6	22.5	68.8	0.0414	0.0313	12.3	1032.5	1089.6
16	10.0	28.6	93.0	0.0419	0.0408	16.1	1773.7	1569.0
17	10.0	29.0	89.7	0.0448	0.0447	17.7	1646.0	1608.6
18	3.0	14.9	44.0	0.0251	0.0275	10.8	–	575.5
19	3.0	15.1	44.9	0.0248	0.0237	9.3	–	452.2
20	6.6	21.5	63.8	0.0328	–	–	–	818.1
21	6.6	19.9	71.7	0.0330	0.0355	14.0	–	919.7
22	6.6	21.2	69.3	0.0353	0.0327	12.9	–	815.0

рассчитанного по разности плотностей теплоносителя в опускном и подъемном тракте контура; $\Sigma \Delta P$ – суммарные потери движущего напора на трение и на местных сопротивлениях, оцененные по [8].

Опыты 1–11 были выполнены с прямым горизонтальным участком между воздухоотделителем и холодильником; опыты 12–17 с горизонтальным U-образным участком; опыты 18–22 с гидрозатвором. Параметры, перечисленные в таблице, относятся к моменту выхода (по возможности) на стационарный режим циркуляции. Само время выхода на этот режим не приводится, поскольку, как показал анализ, оно было практически одинаково во всех экспериментах и составляло в среднем 1000–1200 с, несколько увеличиваясь при наличии горизонтального U-образного участка и, особенно, гидрозатвора, вносящих дополнительное гидравлическое сопротивление.

Кроме того, точно определить момент выхода на стационарный режим циркуляции оказалось довольно затруднительно, т.к. эффективность холодильника оказалась недостаточной для полного съема тепла при мощностях нагревателя 6.6 и 10 кВт, возможно из-за недостаточного давления охлаждающей воды, не обеспечивающего требуемую по расчету скорость ее циркуляции в межтрубном пространстве холодильника. Вследствие этого температура теплоносителя на входе в нагреватель при этих мощностях не оставалась постоянной, а несколько возрастала, приводя к возрастанию выходной температуры и к изменению движущего напора, особенно при мощности 10 кВт.

Согласие между значением расхода, измеренного расходомером, и рассчитанного по перепаду давления на трение в опускном участке (альтернативная оценка расхода) в большинстве опытов удовлетворительно. Что касается сопоставле-

ния движущего напора $\Delta P_{\text{дв}}$ и полного гидравлического сопротивления SDP , то можно заметить, что в одних случаях отмечается хорошее согласие между ними, особенно при мощностях 3 и 6.6 кВт; в других случаях имеется заметное различие (при мощности 10 кВт).

При оценке полного движущего напора $\Delta P_{\text{дв}}$, который равен сумме движущего напора, создаваемого в нагревателе:

$$\Delta P_{\text{нагр}} = g H_{\text{нагр}} (\rho_{\text{оп}} - \bar{\rho}_{\text{нагр}}) \quad (1)$$

и в адиабатном подъемном участке:

$$\Delta P_{\text{под}} = g H_{\text{под}} (\rho_{\text{оп}} - \rho_{\text{под}}), \quad (2)$$

в коде для расчета плотностей по температурам на входе в нагреватель и выходе из него использовалось соотношение, приведенное в [9].

В формулах (1) и (2) $H_{\text{нагр}}$ – высота нагревателя, м; $H_{\text{под}}$ – высота адиабатного подъемного участка, м; $\rho_{\text{оп}}$ – плотность теплоносителя в опускном участке, кг/м³; $\bar{\rho}_{\text{нагр}}$ – средняя по высоте плотность теплоносителя в нагревателе, кг/м³; $\rho_{\text{под}}$ – плотность теплоносителя в адиабатном подъемном участке, кг/м³; g – ускорение силы тяжести, м/с².

Сравнение рассчитанных плотностей воды с данными [10] в диапазоне температур 10–90°C показало, что между ними имеется некоторое различие, меняющееся от -0.304 кг/м³ при 10°C до 0.033 кг/м³ при 90°C. Таким образом, в среднем абсолютную погрешность расчета плотности воды по используемой программе можно оценить в 0.27 кг/м³, что дает абсолютную погрешность оценки движущего напора около 33 Па.

Если в адиабатном подъемном участке температура и плотность воды практически постоянны, то из-за отсутствия данных о распределении температуры по высоте нагревателя расчет движущего напора в нагревателе осуществляется по средней между выходом и входом температуре и сопряжен со значительной погрешностью вследствие нелинейной зависимости плотности воды от температуры и большого влияния ее на движущий напор.

Характер развития конвекции в процессе выхода на стационарный режим течения для некоторых опытов представлен на рис. 2–4, где показаны графики изменения входной и выходной температур в нагревателе, температуры на выходе из адиабатного подъемного участка и расхода, измеренного ультразвуковым расходомером. Характерно поведение выходной температуры и расхода в зависимости от времени. Сразу после включения обогрева наблюдается быстрый рост температуры на выходе из нагревателя, причем имеет место запаздывание роста температуры на выходе из адиабатного подъемного участка. Затем по мере развития циркуляции температура и расход достигают максимума с последующим небольшим снижением. Это связано с улучшением охлаждения нагревательных трубок с ростом расхода. Некоторое снижение расхода при этом объясняется уменьшением движущего напора при снижении температуры в подъемном участке.

После этого имеет место постепенный выход на стационарный режим циркуляции, при котором температуры на выходе из нагревателя и на выходе из подъемного участка практически сравниваются.

На рис. 2 показаны кривые для режимов, полученных при мощностях нагревателя 3, 6.6 и 10 кВт (опыты 1, 4, 7 – их порядковая нумерация соответствует приведенной в табл. 1) и на рис. 3 (опыты 12, 13, 16) с горизонтальным U-образным участком. Как можно видеть, при мощности 10 кВт стационарный режим практически не достигался из-за постепенного подъема температуры на входе в нагреватель (кривая 1). В этом случае при более высокой температуре на выходе из

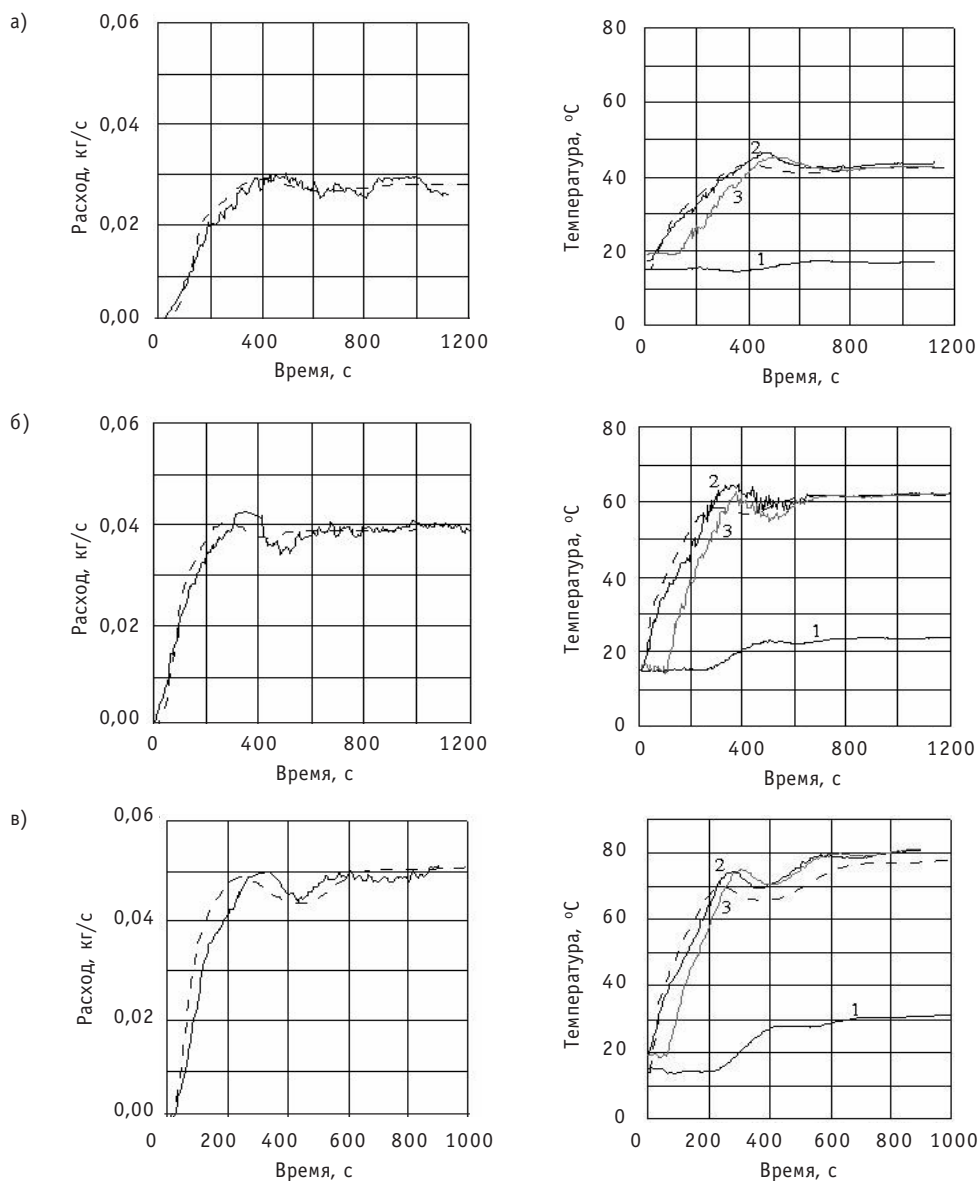


Рис. 2. Развитие температур и расхода во времени. Прямой горизонтальный участок перед холодильником: а) $N = 3$ кВт (опыт 1); б) $N = 6.6$ кВт (опыт 4); в) $N = 10$ кВт (опыт 7); 1 – температура на входе в нагреватель; 2 – Температура на выходе из нагревателя; 3 – Температура на выходе из подъемного участка; — — — — — расчет по коду RELAP5/MOD3.2

нагревателя ($\sim 80 \div 85^\circ\text{C}$) начинало сказываться выделение растворенного в воде воздуха, создавая дополнительный движущий напор. Однако визуально ни на выходе из нагревателя, ни по длине подъемного участка движущихся пузырей воздуха не замечалось. Отмечались лишь отдельные редкие пузыри диаметром около $1 \div 2$ мм, адгезированные на стенке подъемного участка. Возможно, газовыделение в объеме теплоносителя все же имело место, но диаметр пузырей был слишком мал для их визуального обнаружения. Указанные закономерности характерны почти для всех опытов, не зависимо от выделяемой на нагревателе электрической мощности и конфигурации циркуляционного тракта.

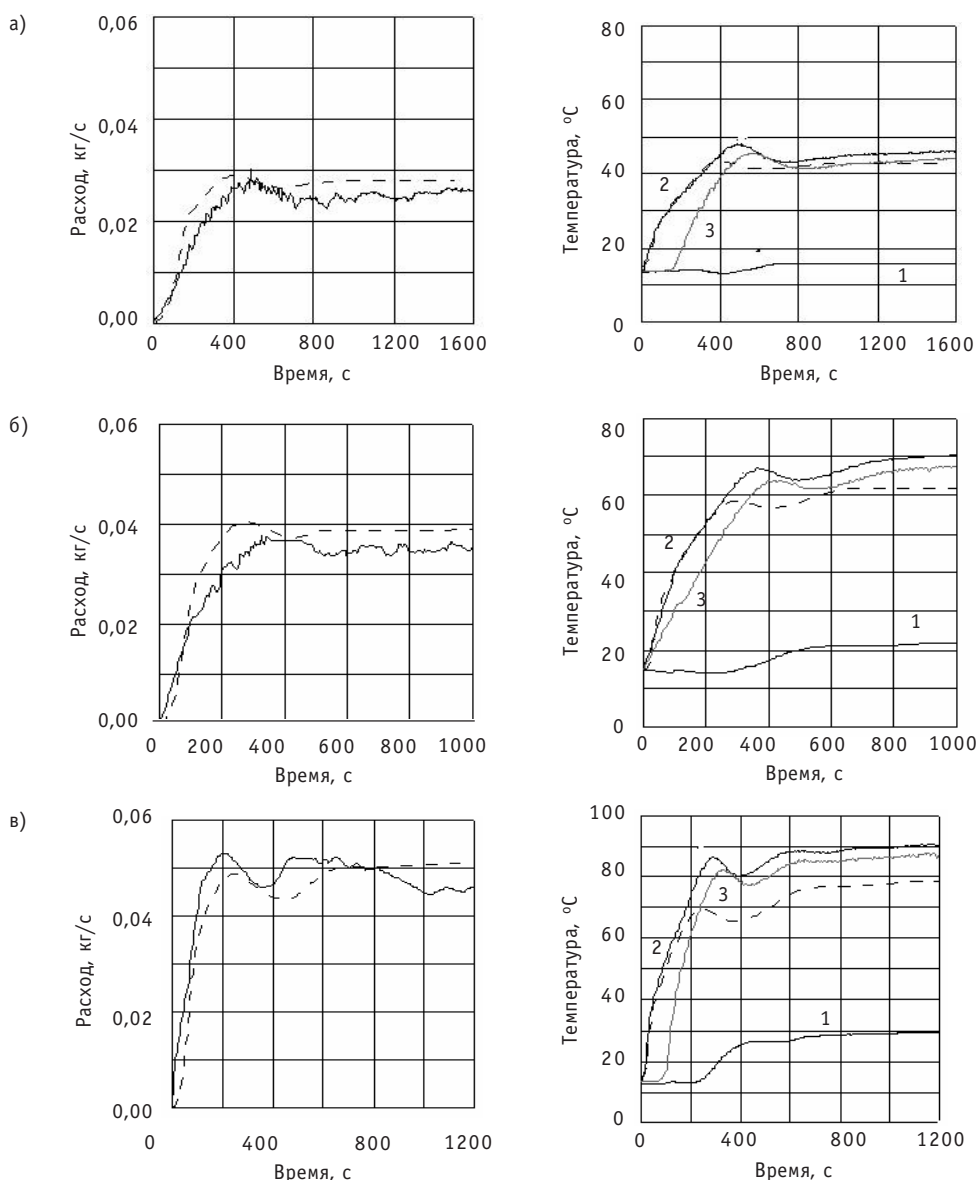


Рис. 3. Развитие температур и расхода во времени. Горизонтальный U-образный участок перед холодильником: а) $N = 3$ кВт (опыт 12); б) $N = 6.6$ кВт (опыт 13); в) $N = 10$ кВт (опыт 16); 1 – температура на входе в нагреватель; 2 – температура на выходе из нагревателя; 3 – температура на выходе из подъемного участка; - - - - - расчет по коду RELAP5/MOD3.2

Наличие горизонтального U-образного участка, вместо прямого, перед холодильником приводило к увеличению гидравлического сопротивления контура – добавлялись четыре дополнительных поворота и два горизонтальных прямых участка (опыты 12–17). Это приводило к некоторому снижению расхода и повышению выходных температур при стационарном режиме. На времени выхода на стационарный режим циркуляции наличие горизонтального U-образного участка практически не сказывалось, поскольку, несмотря на более медленное ее развитие, расход в стационарном режиме был меньше и достигался примерно за то же время, что и при наличии прямого участка.

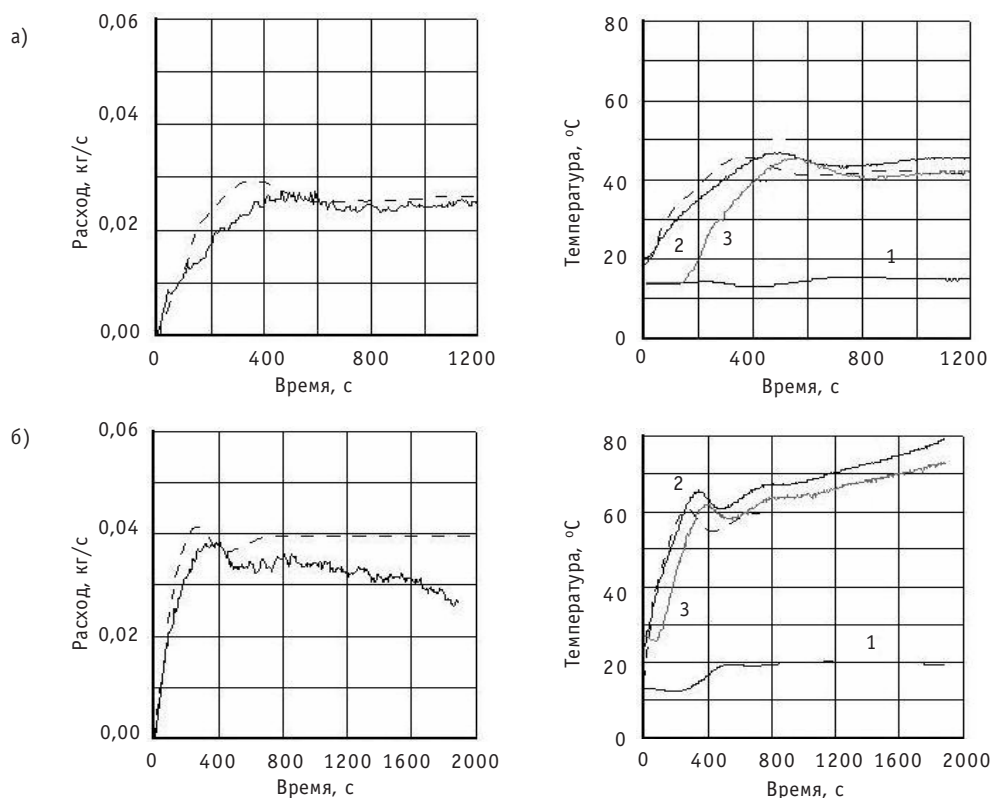


Рис. 4. Развитие температур и расхода во времени. Гидрозатвор: а) $N = 3$ кВт (опыт 18); б) $N = 6.6$ кВт (опыт 21); 1 – температура на входе в нагреватель; 2 – температура на выходе из нагревателя; 3 – температура на выходе из подъемного участка; — — — — — расчет по коду RELAP5/MOD3.2

Интересные результаты получены при наличии гидрозатвора – того же самого U-образного участка, но ориентированного вертикально (опыты 18–22). Типичный пример развития циркуляции в этом случае показан на рис. 4. Если при мощности 3 кВт влияние гидрозатвора проявлялось в незначительной степени (опыт 18), то при мощности 6.6 кВт (опыт 21) отмечено следующее явление – после небольшого (длительностью ~150 с) периода существования стационарного режима температура на выходе из нагревателя монотонно возрастала почти до температуры насыщения при одновременном постепенном снижении расхода. Визуально при этом наблюдалось скопление пузырей воздуха диаметром примерно 3÷4 мм по высоте опускного участка гидрозатвора, причем эти пузыри совершали осцилляционные движения в разных направлениях в горизонтальной плоскости, практически не перемещаясь вертикально.

По всей видимости, мелкие пузыри воздуха, выделяющиеся из прогретого объема жидкости в опускном участке гидрозатвора и которые ранее не обнаруживались визуально, стремясь подняться вверх, встречались с динамическим воздействием жидкости, движущейся вниз, которое не позволяло им подняться вверх. В результате этого они сливались в более крупные, и в опускной части гидрозатвора создавалась «эффективная» плотность среды, которая была меньше, чем в его подъемной части. Это приводило к возникновению дополнительного движущего напора в опускной части гидрозатвора, действие которого было противоположно действию основного движущего напора и соответственно к снижению расхода, и, как следствие, к росту температуры на выходе из нагревателя, что приводило, в свою очередь, к еще большему газовыделению. Поэтому эксперименты с гид-

розатвором были проведены при мощности не более 6.6 кВт во избежание вскипания теплоносителя, что могло значительно исказить картину развития циркуляции и привести к разрушению корпуса нагревателя.

На рис. 5 приведен фотоснимок пузырей, скопившихся в опускном участке гидрозатвора, полученный цифровой фотокамерой. Видно, что пузыри почти равномерно распределены по высоте участка. По приближенным визуальным оценкам, исходя из диаметра пузырей по отношению к диаметру канала и их числа на участке, равном диаметру канала, объемное газосодержание находилось в пределах 10÷15%.

Отмеченные особенности в развитии конвекции при наличии гидрозатвора в циркуляционном тракте поднимают ряд вопросов, касающихся работы систем отвода тепла от аварийной активной зоны ядерных реакторов. Известно, что для залива аварийной активной зоны используется вода из системы гидроемкостей, находящаяся под давлением азота ~60 атм. Учитывая высокую растворимость азота

в воде, можно полагать, что при ее разогреве произойдет выделение азота, который скапливаясь в элементах циркуляционного тракта, подобных гидрозатвору, может препятствовать развитию естественной конвекции и тем самым негативно повлиять на надежность работы пассивных систем расхолаживания аварийной активной зоны реактора.

Помимо экспериментально полученных кривых развития естественной циркуляции, на рис. 2-4 представлены также результаты расчета развития естественной конвекции по коду RELAP5/MOD3.2. Как можно видеть, наблюдается, в основном, хорошее согласие результатов эксперимента и расчета при мощностях 3 и 6.6 кВт. Некоторые количественные отличия имеют место лишь на начальной стадии развития конвекции, где конвекция из-за инерции еще не вполне развита, а также (более значительные) в экспериментах, проведенных при мощности нагревателя 6.6 и 10 кВт. При этих мощностях из-за более высокой температуры теплоносителя имеет место значительное газовыделение, которое влияет на развитие циркуляции, что не учитывается в использованном расчетном коде. Особенно это отличие заметно для случая гидрозатвора при мощности 6.6 кВт. Так, если при мощности 3 кВт отмечено хорошее совпадение экспериментальных результатов и результатов расчета, то при мощности уже 6.6 кВт наблюдалось значительное качественное отличие в поведении расчетных кривых, которые выходили на стационарные значения, в то время как по результатам эксперимента имело место снижение расхода при росте температуры на выходе из нагревателя и подъемного участка. Это опять-таки можно объяснить либо неопределенностью в задании исходной концентрации растворенного в воде воздуха, либо газовыделение не учитывается при расчетах по используемому коду.

ВЫВОДЫ

1. Результаты экспериментального исследования параметров естественной циркуляции (скорость циркуляции, температура теплоносителя) неплохо согла-

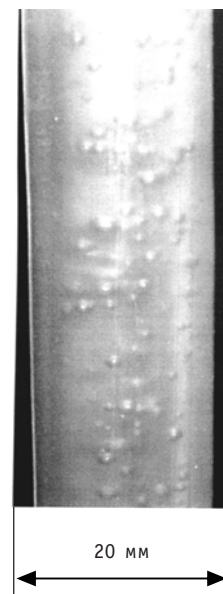


Рис. 5. Фотоснимок газовых пузырей, скопившихся в опускной части гидрозатвора

суются с результатами расчетных исследований, в том числе по коду RELAP5/MOD3.2, для сравнительно простой геометрии циркуляционного контура без опускных участков и при небольших мощностях энерговыделения (3 кВт).

2. При наличии осложняющих геометрию контура элементов (таких как гидрозатворы), довольно часто встречающихся в конфигурации реальных систем СПОТ, и в которых для залива аварийной активной зоны используется азот под давлением ~60 атм, обладающий высокой растворимостью в воде, нельзя исключить возможность скопления газовых пузырей в вертикальных опускных частях циркуляционного тракта. Это может привести к подавлению естественной конвекции, вплоть до полного ее прекращения по мере прогрева воды и выделения из нее растворенного газа, что негативно отразится на отводе тепла от аварийной активной зоны и на самих пассивных системах расхолаживания.

3. Вопрос этот нуждается в дополнительном исследовании как экспериментальном, так и теоретическом с привлечением или разработкой более совершенных расчетных кодов, описывающих естественную циркуляцию.

4. Результаты работы могут быть использованы при разработке новых и совершенствовании существующих расчетных кодов, описывающих естественную конвекцию, применительно к системам пассивного расхолаживания аварийной активной зоны реакторов.

Литература

1. *Eguchi Y., Yamamoto K., Koga T. et al.* Experimental and Computational Study on Prediction of Natural Circulation in Top-Entry Loop-Type FBR/International Atomic Agency, IWGFR/88. 'Specialists Meeting on Evaluation of Decay Heat Removal by Natural Convection, 22-23 February, 1993, Oarai Eng. Center, PNC, Japan. – P. 86-96.
2. *Takeda H., Koga T.* Study on Similarity Rule for Natural Circulation Water Test of LMFBR/International Atomic Agency, IWGFR/88. Specialists Meeting on Evaluation of Decay Heat Removal by Natural Convection, 22-23 February, 1993, Oarai Eng. Center, PNC, Japan. – P. 58-66.
3. *Ушаков П.А., Сорокин А.П.* Проблемы моделирования на воде аварийного отвода остаточного тепловыделения естественной конвекцией в камерах быстрых реакторов/Препринт ФЭИ-2585. – Обнинск, 1997.
4. *Ушаков П.А., Сорокин А.П., Матюхин Н.М.* Роль гидравлических сопротивлений при моделировании на воде естественной конвекции в баках быстрых реакторов//Теплоэнергетика. – 2000. – № 5. – С. 9-14.
5. *Жуков А.В., Кузина Ю.А.* Отвод остаточного тепловыделения при аварийном расхолаживании быстрых реакторов; концепции и результаты исследований: Аналитический обзор. Ч. 1. Зарубежные исследования: Учебное пособие. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1998. – 113 с.
6. *Жуков А.В., Кузина Ю.А.* Отвод остаточного тепловыделения при аварийном расхолаживании быстрых реакторов; концепции и результаты исследований: Аналитический обзор. Ч. 2. Российские исследования: Учебное пособие. – Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 1998. – 59 с.
7. *Ambrosini W., Forasassi G., Forgione N., Oriolo F., Tarantino M.* Natural and Gas-Injection Enhanced Circulation in a Loop with Variable Friction/Paper Pres. at GENES4/ANP2003 Conf., No. 1164 (Kyoto, Japan, Sep. 15-19).
8. *Идельчик И.Е.* Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975.
9. *Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П.* Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы). – М.: Энергоатомиздат, 1990. – С. 250.
10. *Вукалович М.П., Ривкин С.Л., Александров А.А.* Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. – М.: Изд-во стандартов, 1969.

Поступила в редакцию 20.09.2007

Contribution of (γ , n) reactions to entire neutron intensity of WWER-1000 spent fuel was estimated according with his burn-up degree.

УДК 621.039.542:536.24

Experimental Researches of Direct Contact Steam Generators Characteristics with Heavy Liquid Metal Heat-Carriers \A.V. Beznosov, T.A. Bokova, S.U. Savinov, P.A. Bokov, M.D. Zefirov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 10 pages, 8 illustrations. – References – 4 titles.

Experimental researches of direct contact lead and lead-bismuth heat-carriers steam generators elements characteristics are resulted.

The water-steam phase input and dispergation devices entered into liquid metal, formed bubbles sizes, the bubbles emersion speed, characteristics of heat exchange between liquid metal and bubbles were researched. Experiments were conducted under a range of lead and lead-bismuth eutectic temperatures 350-550°C; pressure of submitted water 0,2-8,0 MPa; forming bubble and the jet (torch) outflow charges of water up to 200 kg/h; durable liquid metal free surface steam loading up to 10,0 m³/m²h.

УДК 621.039.534

Numerical Modeling of Fragmentation in Liquid Media with Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) Method \A.P. Vorobev, V.I. Kriventsev, Qian Lin, Xuewu Cao; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 10 pages, 3 illustrations. – References – 10 titles.

An application of the Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method to liquid media fragmentation is demonstrated. Sample hydrodynamics problems are solved numerically. The detailed mathematical explanation of the method is given for non-viscous fluid approach while using artificial dissipative term applied in the Euler equation.

УДК 536.24.621.039.526

Natural Convection Specificity in Complex Loops \S.G. Kalyakin, Yu.P. Djusov, Yu.Yu. Shteyn, Yu.V. Klimanov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 10 pages, 1 table, 5 illustrations. – References – 10 titles.

Now the natural convection is of great interest for many researchers from the point of view its use in the systems of passive cooling and removal of residual heat from nuclear reactor core at accident situations. Due to it investigation of the natural convection specificity is rather actual and useful for the NPP safety validation.

In this paper the investigation of natural convection evolution dynamics in closed loop is presented and the character of flow parameters changing in dependence of different factors (heat generation intensity, loop geometry) is shown.

УДК 621.039.564

Choosing of Frequency Range for Thermocorrelation Flowmeter \B.V. Keadze, V.A. Shurupov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher School. Nuclear Power Engineering). – Obninsk, 2008. – 7 pages, 1 table, 1 illustration. – References – 8 titles.

Thermocorrelation method is widely used at test facilities and reactors in particular for flow measurement in fuel subassemblies. The experiments at flow calibration rig and reactor loop using hardware and digital filters suggested strong dependence of booth systematic and statistical error from frequency range chosen. Some practical recommendations are given for different conditions with the aim to minimize total error.

УДК 532.542:621.181.6

The Reduce of VVERs Steam Generator Power Output due to Deposits on the Tubes \A.A. Lukyanov, V.B. Smykov, Yu.S. Yuriev; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya