

УДК 621.039.534

АВАРИЙНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ СБОРКИ ТВЭЛОВ БЫСТРОГО РЕАКТОРА ПРИ КИПЕНИИ В УСЛОВИЯХ ЕСТЕСТВЕННОЙ КОНВЕКЦИИ

*Багдасаров Ю.Е., Богословская Г.П., Жуков А.В., Иванов Е.Ф.,
Сорокин А.П., Колесник В.П., Ушаков П.А. (ФЭИ)*

В связи с повышенными требованиями к безопасности действующих и проектируемых ЯЭУ первостепенное значение приобрели исследования процессов, связанных с нарушением охлаждения активной зоны реактора, возможным последующим разрушением и плавлением активной зоны. Необходимо уметь корректно описывать сценарии развития аварийных ситуаций, количественно характеризовать аварийные процессы, предсказывать их вероятные последствия, разрабатывать методы и технические средства уменьшения нежелательных последствий.

Вскипание жидкометаллического теплоносителя в ТВС быстрого реактора является одним из нерасчетных режимов работы реактора и может возникнуть вследствие падения расхода теплоносителя, увеличения энерговыделения и других причин. Перегрев теплоносителя в ТВС (и как следствие его вскипание) возможен также после аварийной остановки реактора, когда охлаждается активная зона. При этом выделяемая мощность соответствует остаточному энерговыделению, а движения теплоносителя или нет, или оно осуществляется за счет естественной конвекции.

Вскипание теплоносителя как аварийная ситуация, характеризующаяся большой разницей удельного объема пара и жидкости, является сильным возмущающим фактором, вызывающим резкую перестройку гидродинамики всего потока, вследствие чего течение становится нестабильным. Характер кипения жидкого металла (натрия) в активной зоне быстрого реактора и в первую очередь скорость распространения паровой фазы определяют скорость ввода положительной реактивности в активной зоне реактора. Дальнейшее развитие аварийного процесса зависит от количества выделенной энергии в результате ввода реактивности из-за кипения жидкого металла.

В некоторых странах (Японии, ФРГ, США, Франции, Великобритании) с 70-х годов реализуются долгосрочные программы экспериментальных и расчетных теплогидравлических исследований развития и последствий аварийных ситуаций в активной зоне реактора с жидкометаллическим охлаждением. Основное внимание уделяется исследованию динамики развития паровой фазы в ТВС, характера охлаждения при кипении теплоносителя в области за блокадой в ТВС и т.д. Так, в Японии проведены поэтапные исследования аварийных процессов с кипением жидкометаллического теплоносителя в кольцевых каналах и многостержневых сборках длительностью не более 10 с (повышение мощности, падение расхода, блокировки) [1—5]. В ФРГ исследованы нестационарные процессы, связанные с изучением аварии при потере теплоносителя и блокировке части проходного сечения ТВС [6, 7]. Во Франции выполнены исследования кипения теплоносителя в ТВС в стационарных условиях, при медленных переходных процессах с падением расхода, естественной конвекции, быстропотекающих процессах с повышением мощности или падением расхода [8]. В США исследован перегрев теплоносителя на начальной стадии кипения при разном тепловом потоке и скорости теплоносителя [9].

Систематические экспериментальные исследования теплогидравлики аварийных режимов работы активной зоны быстрого реактора (при кипении жидкометаллического теплоносителя) начались в 1989 г. в ФЭИ.

В статье излагаются результаты экспериментов по исследованию кипения эвтектического сплава натрия с калием (22% Na + 78% K) как при неподвижном теплоносителе в кольцевом канале, так и при его движении в модельной ТВС в режиме естественной конвекции.

Вскипание в неподвижном теплоносителе

Конструкция рабочего участка (рис. 1). Вскипание неподвижного теплоносителя происходило в вертикальной трубе размером 30×2 мм длиной 3000 мм, в нижней части которой соосно установлен имитатор твэла диаметром 7,5 мм. На поверхности имитатора создавалось «горячее пятно» (место вскипания теплоносителя — кольцо высотой 6 мм). Поверхность имитатора твэла в зоне горячего пятна нагревалась за счет тепла, выделяющегося при конденсации паров натрия на внутренней поверхности имитатора. Соответственно имитатор твэла представлял собой термосифон, в котором рабочим телом являлись пары натрия. Конструкционно это была система из двух коаксиальных трубок размером $7,5 \times 0,3$ и $6,2 \times 0,3$ с капиллярной сеткой. Зазор между трубками находился под разрежением, в результате чего уменьшались потери тепла паров натрия,двигающихся вверх по внутренней трубке имитатора.

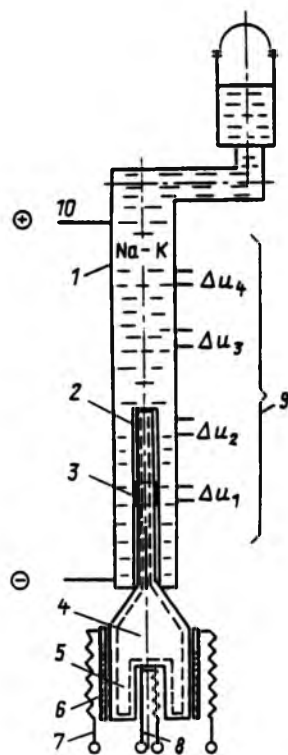
В зоне горячего пятна между трубками, как уже отмечалось, было установлено кольцо из чистого серебра, которое обеспечивало тепловой контакт между внутренней и внешней трубками. В районе кольца (между трубками) конденсировались пары натрия, на внешней поверхности кольца вскипал сплав натрий—калий.

Натрий испарялся в камере, представляющей собой цилиндр диаметром 40, высотой 200 мм. Испарительная камера соединялась с внутренней трубкой имитатора твэла. На наружной поверхности испарительной камеры установлен тепломер, на который надет цилиндр из листового никеля для выравнивания температурного поля. Для компенсации тепловых потерь испарительной камеры предусматривался охранный нагреватель. Основной нагреватель, с помощью которого испарялся натрий, располагался внутри камеры.

Плотность теплового потока на поверхности горячего пятна определялась по мощности основного нагревателя с учетом оценок потерь тепла через зазор между трубками имитатора твэла.

Методика проведения экспериментов. Для измерения температуры стенок в зоне кипения в серебряное кольцо заделали три хромель—алюмелевые термопары. Температуру теплоносителя в зоне горячего пятна измеряли с помощью хромель—алюмелевой термопары, проложенной в капилляре диаметром 1,2 мм, который имитировал дистанционирующую проволоочную навивку на твэле. Давление в зоне кипения измеряли образцовым манометром. Там же установили акустический датчик для регистрации начала кипения.

Движение паровой фазы по рабочему участку регистрировали с помощью потенциометрических датчиков, каждый из которых представлял собой два провода диаметром 0,5 мм из нержавеющей стали, приваренных к корпусу рабочего участка. С помощью этих проводов регистрировали разность потенциалов (Δu), возникающую при пропускании по рабочему участку постоянного тока $I \sim 100\text{—}200$ А. Разность потенциалов изменялась в зависимости от наличия или отсутствия пара в зоне потенциометрических проводов.



Р и с. 1. Конструкция рабочего участка: 1 — труба; 2 — имитатор твэла; 3 — горячее пятно; 4 — испарительная камера; 5 — капиллярная система (сетка); 6 — тепломер; 7 — охранный нагреватель; 8 — основной нагреватель; 9 — потенциометрические датчики с их показаниями в виде разности потенциалов Δu_{1-4} ; 10 — токоподводы постоянного тока

Методика проведения экспериментов состояла в том, что с помощью внешних нагревателей рабочий участок доводили до температуры, близкой к температуре насыщения, а затем включали термосифон для нагрева горячего пятна.

Паровые пузыри зарождались на стенке имитатора твэла в зоне горячего пятна. Скорость роста пузыря и его размеры определяли по показаниям потенциометрических датчиков, сигналы которых регистрировались на магнитной ленте. На рабочем участке были установлены четыре потенциометрических датчика: первый — в зоне горячего пятна, следующие три — на расстоянии 118, 407 и 817 мм от горячего пятна.

Результаты экспериментов. В экспериментах плотность теплового потока в зоне горячего пятна составляла $\sim 2 \text{ МВт/м}^2$, давление 0,085 МПа, температура насыщения $t_s = 1033 \text{ К}$.

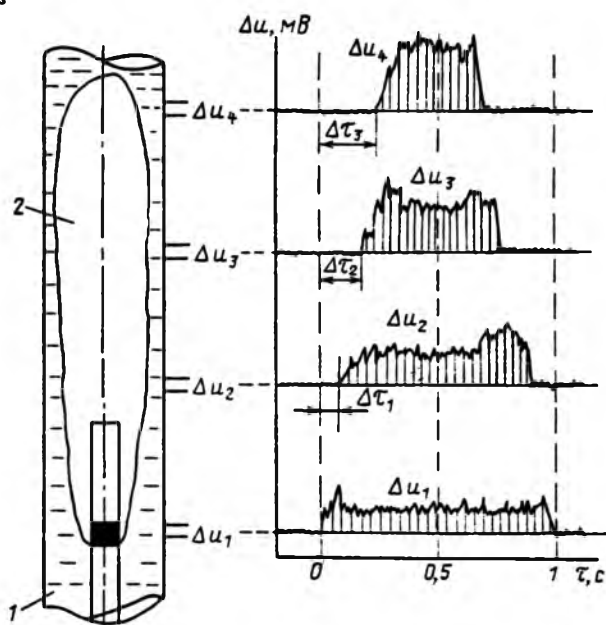


Рис. 2. Схема образования и роста парового пузыря согласно показаниям потенциометрических датчиков Δu_{1-4} ; $\Delta \tau_{1-3}$ — сдвиги по времени в показаниях последних трех потенциометрических датчиков соответственно, 1, 2 — теплоноситель и паровой пузырь соответственно

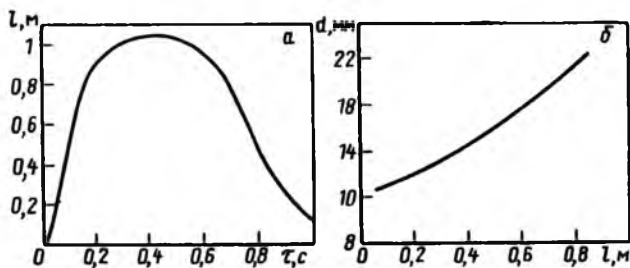


Рис. 3. Зависимость высоты парового пузыря от времени (а) и соотношение между диаметром и высотой пузыря (б)

На рис. 2, 3 приведены показания потенциометрических датчиков, а также изменение высоты и диаметра парового пузыря в процессе опытов.

Эксперименты показали, что образовавшийся в зоне горячего пятна паровой пузырь быстро увеличивается в объеме, принимая форму вытянутого вверх цилиндра (см. рис. 2). Средняя скорость распространения верхней границы раздела пар—жидкость $\sim 2,5 \text{ м/с}$. Пузырь возрастает до максимальных размеров за $\sim 0,5 \text{ с}$. При этом его объем достигает $\sim 80 \text{ см}^3$, высота $\sim 1 \text{ м}$, после чего начинается процесс конденсации (схлопывания) пузыря. Этот процесс сопровождается движением вниз верхней границы раздела пар—жидкость до момента полного исчезновения пузыря в том же месте, где он и возник, т.е. в зоне горячего пятна.

Рост пузыря приводит к перемещению вверх значительного объема теплоносителя, уменьшение его размеров — к перемещению теплоносителя вниз, в результате чего схлопывание сопровождается гидравлическим ударом.

Вскипание в условиях естественной конвекции

Экспериментальная установка. На рис. 4 приведены схема и элементы конструкции экспериментальной установки, предназначенной для проведения исследований вскипания теплоносителя в условиях естественной конвекции. Установка представляет

собой два вертикально расположенных канала высотой 3 м: опускной (левый) канал — труба размером 30×2 мм и подъемный (правый) канал — 7-стержневая модельная сборка имитаторов твэлов быстрого реактора, расположенная в трубе размером $50 \times 1,5$ мм. Опускной и подъемный каналы соединены в верхней части с расширительным баком (высотой 900 мм), который наполовину заполнен теплоносителем.

Имитаторы твэлов модельной сборки расположены в треугольной решетке с относительным шагом s/d 1,19 и окружены 12 стержнями-вытеснителями, предназначенными для более строгого обеспечения в центральной зоне сборки условий бесконечной решетки твэлов.

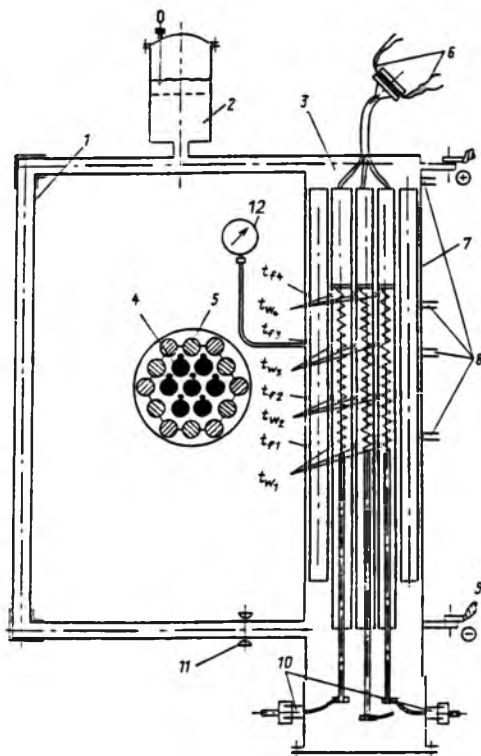
Имитаторы твэлов представляли собой калиброванные трубки из нержавеющей стали размером $8 \times 0,75$ мм, внутри которых установлены проволоочные спиральные нагреватели. Длина обогреваемой части сборки 405 мм. Перед зоной обогрева предусмотрен начальный участок длиной 165 мм, после зоны обогрева — участок длиной 445 мм. В стенках трубок имитаторов выполнены продольные пазы, в которые заделывали хромель-алюмелевые термопары в чехлах диаметром 0,3 мм для измерения температуры стенок ($t_{w_1} - t_{w_4}$). Термопары устанавливались в четырех сечениях по высоте обогреваемого участка сборки. В эти же сечения монтировали термопары диаметром 1 мм для измерения температуры теплоносителя ($t_f - t_f$). Давление теплоносителя в зоне

обогрева измеряли с помощью образцового манометра. Расход теплоносителя определяли на входе в рабочий участок с помощью магнитного расходомера. Наличие паровой фазы в различных сечениях сборки регистрировали потенциометрическими датчиками, для чего через корпус рабочего участка пропускали постоянный ток.

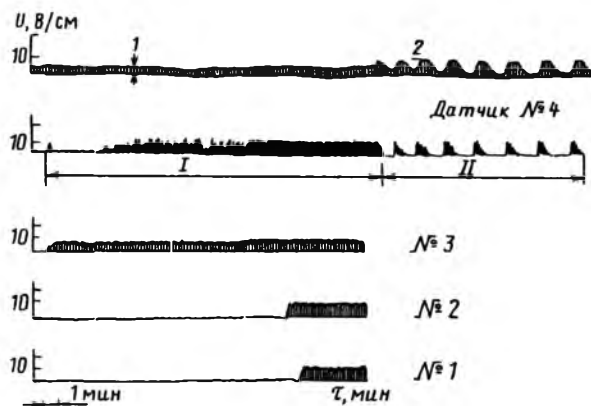
Методика проведения экспериментов и обсуждение результатов. Методика проведения экспериментов состояла в следующем: включением обогрева имитаторов устанавливали стационарный температурный режим, увеличивали мощность и достигали следующего стационарного режима. Так происходило до момента возникновения кипения теплоносителя.

На рис. 5 приведены запись расхода теплоносителя на входе в рабочий участок, а также показания четырех потенциометрических датчиков, пропорциональные паросодержанию в различных сечениях рабочего участка. Первые три датчика установлены на расстоянии 68, 194 и 389 мм от начала обогрева соответственно. Четвертый датчик смонтировали на расстоянии 970 мм от начала участка обогрева, т.е. на выходе теплоносителя из сборки стержней. Сигналы записывались на ленте быстродействующего многоканального потенциометра.

При давлении 0,06 МПа кипение теплоносителя начиналось при плотности теплового потока $q = 117 \cdot 10^3$ Вт/м².



Р и с. 4. Схема и элементы конструкции экспериментальной установки: 1 — опускной канал (труба); 2 — расширительный бак; 3 — 7-стержневая модельная сборка; 4 — имитаторы твэлов; 5 — вытеснители; 6 — уплотнение термопар; 7 — корпус; 8 — потенциометрические датчики; 9 — токоподводы постоянного тока; 10 — токоподводы нагревателей имитаторов твэлов; 11 — магнитный расходомер; 12 — образцовый манометр; t_{f1-4} — температура жидкости в сечениях 1—4; t_{w1-4} — температура стенки имитаторов в сечениях 1—4

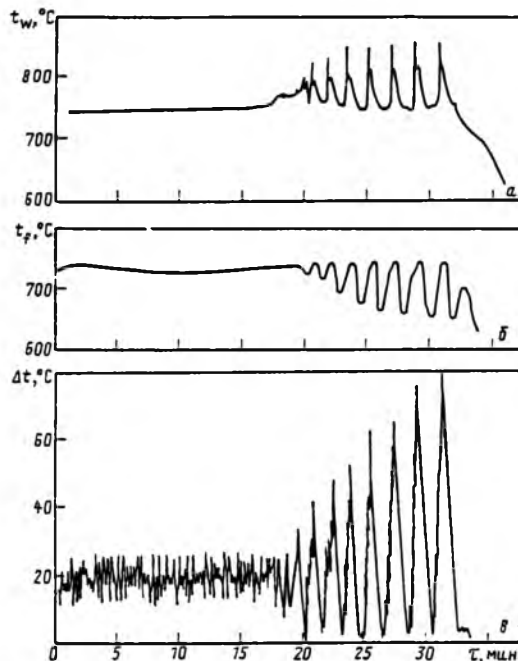


Р и с. 5. Характеристики первого (21 мин) (I) и второго (13 мин) (II) режимов кипения в модельной ТВС; 1, 2 — расход теплоносителя на входе в модельную сборку 0,75 и 1,9 м³/ч соответственно

Во втором режиме кипения, наблюдавшемся при дальнейшем увеличении подводимой мощности, отмечали резкие пульсации расхода теплоносителя на входе. Аналогичным образом изменялось и паросодержание на выходе из рабочего участка (четвертый датчик). Плотность теплового потока в этом режиме $151 \cdot 10^3$ Вт/м².

Пульсирующий характер кипения вызван тем, что при указанной плотности теплового потока происходило периодическое запаривание участка обогрева, после чего паровая пробка всплывала и участок обогрева снова заполнялся жидкостью.

Эксперименты показали, что при плотности теплового потока $\sim 10^5$ Вт/м² и расходе теплоносителя $G = 0,75$ м³/ч наблюдался устойчивый процесс теплосъема от сборки имитаторов твэлов за счет кипения теплоносителя. При увеличении плотности теплового потока до $\sim 1,5 \cdot 10^5$ Вт/м² кипение становилось пульсирующим, расход периодически падал почти до нулевого значения, а затем резко возрастал.



Р и с. 6. Изменение температуры стенки имитаторов твэлов (а), теплоносителя (б) на выходе из зоны обогрева (сечение IV) и разности температуры стенки—жидкость в сечении III (в)

Основываясь на показаниях четвертого датчика, процесс кипения можно разделить на два режима. В первом расход теплоносителя на входе в рабочий участок оставался неизменным, тогда как количество паровой фазы увеличивалось по мере повышения подводимой мощности. В начале этого режима кипение теплоносителя происходило лишь в самом конце участка обогрева (третий датчик). По мере увеличения подводимой мощности кипение распространялось почти на весь участок нагрева (первый и второй датчики). В конце первого режима кипения плотность теплового потока составляла $133 \cdot 10^3$ Вт/м².

В условиях первого режима кипения температура стенок имитаторов на выходе из зоны обогрева (рис. 6, а) не менялась и составляла 740 °С. При втором (пульсирующем) режиме кипения наблюдались резкие всплески температуры стенок, составлявшие ~ 90 °С. В устойчивом режиме кипения температура теплоносителя на выходе из зоны обогрева (рис. 6, б) постоянна и равна температуре насыщения (727 °С). В пульсирующем режиме кипения температура теплоносителя колеблется вследствие пульсаций расхода, так как при резком увеличении расхода на выход попадают «холодные» порции теплоносителя. На рис. 6, в показано изменение в процессе кипения разности температуры стенка—жидкость в сечении, отстоящем от начала зоны обогрева на расстояние 265 мм. В устойчивом режиме кипения эта разность составляла в среднем 20 °С, в пульсирующем наблюдались резкие колебания перегрева стенок имитаторов.

Заключение

В результате экспериментальных исследований процессов кипения жидкого металла в кольцевом канале и модельной ТВС быстрого реактора получены физические представления о возникновении и динамике развития паровой фазы, а также изменении температуры теплоносителя и теплоотдающей поверхности в процессе кипения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kikuchi Y., Takahashi T., Haga K. Incipient boiling of sodium flowing in a single — pin annular channel. — J. Nucl. Sci. Tech., 1974, v. 11, № 5, p. 172—186.
2. Kikuchi Y. Transient boiling of sodium in seven—pin bundle under transient overpower conditions. — Ibid., 1979, v. 16, № 4, p. 287—294.
3. Kikuchi Y. Local sodium boiling behind local flow blockage in simulated LMFBR fuel subassembly. — Ibid., 1977, v. 14, № 11, p. 774—790.
4. Kikuchi Y. Sodium boiling experiments in a 19—pin bundle under loss—of—flow conditions. — Nucl. Engng Design, 1981, v. 66, № 3, p. 357—366.
5. Haga K. Temperature rise due to fission gas release in locally blocked LMFBR fuel subassembly simulators. — In: LMFBR Safety Topical Meeting, July 19—23, 1982, Lion—Ecully, France, p. 291—300.
6. Hubert F. Loss of flow experiments in sodium in an electrically heated 37—pin bundle with sinusoidal axial heat flux distribution. — Ibid., p. 341—349.
7. Hubert F., Peppler W. Boiling and dry out behind local blockages in sodium cooled rod bundles. — Nucl. Engng Design, 1984, v. 82, № 3, p. 341—363.
8. Sealer J., Cognet G., Leborque E. a. French LMFBR core thermal hydraulic studies for nominal and accident conditions. — Ibid., 1990, v. 124, № 3, p. 403—416.
9. Dwyer O. Incipient boiling superheat for sodium in turbulent channel flow effects of heat flux and flow rate. — J. Heat and Mass Transfer, 1973, v. 16, № 5, p. 971—984.

Поступила в Редакцию 18.04.94

УДК 621.039.536.24

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПАРОГЕНЕРИРУЮЩЕМ ПАКЕТЕ ТРУБ МЕТОДОМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Герлига В.А., Козлов А.В., Денисенко В.Ю. (Одесский политехнический ун-т)

В последние годы на АЭС с ВВЭР-1000 происходит растрескивание холодного коллектора в парогенераторах ПГВ-1000. Причины этого явления до конца не выяснены. В основном исследуются недостатки проектирования холодного коллектора, технологии его изготовления и эксплуатации. Однако негативное влияние на трещиностойкость могут оказывать теплогидравлические процессы в самом коллекторе или вблизи него. Теплогидравлическая устойчивость движения парожидкостного потока в межтрубном пространстве парогенерирующих пакетов труб, по-видимому, не изучалась вообще в связи с трудностями описания движения потока воды и пара в объеме парогенератора.

Исходя из конструктивных особенностей ПГВ-1000 можно выделить участки пакетов горизонтальных труб с двумерным движением воды в межтрубном пространстве. Свободу движения жидкости в третьем направлении преграждает поддерживающая металлическая оплетка. Поэтому будем рассматривать пакет горизонтальных труб с движением воды в двух направлениях z и x : вертикальном и поперек трубного пучка. Движения воды в межтрубном пространстве в направлении вдоль трубного пучка нет. Для составления математической модели такого пучка труб сделаем еще несколько допущений: скорость греющего теплоносителя внутри труб одинакова; температура греющего теплоносителя во всех трубах одинакова и не меняется по длине на участке выделенного пакета труб; парожидкостный поток в межтрубном простран-