

УДК 532.54

Анализ экспериментальных данных по плавлению и движению расплава металла по цилиндрической поверхности*

П.Д. Лобанов^{1,2}, Э.В. Усов¹, А.И. Светоносков^{1,2}, С.И. Лежнин^{1,2}

¹*Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва*

²*Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Новосибирск*

E-mail: usovev@gmail.com

Представлены результаты экспериментальных исследований плавления имитатора оболочки модельного тепловыделяющего элемента, изготовленной из Рb (44,5 %)–Вi (55,5 %), и движения расплава по поверхности обогреваемого стержня. Эксперименты проведены с близкими по значению параметрами: тепловыделением, начальной температурой, линейным размером и толщиной модельной оболочки. Для каждого из экспериментов были выполнены видеосъемка процесса формирования и движения расплава, измерены температура оболочки и скорость потери массы. Представлен анализ формирования и стекания расплава по поверхности стержня.

Ключевые слова: ядерная энергетика, твэл, тяжелая авария, расплав, пленка, ручейки.

Актуальность исследования

Развитие тяжелой аварии в ядерных энергетических установках сопровождается нарушением баланса тепла в активной зоне, повышением температуры теплоносителя, его кипением, возникновением кризиса кипения и, как следствие, плавлением оболочек тепловыделяющих элементов (твэлов) и топлива, стеканием образующегося расплава. Конструкция твэлов быстрых реакторов предполагает наличие как активной части, в которой происходит основное энерговыделение, так и холодной части твэла из обедненного урана (бланкета), в котором энерговыделение фактически отсутствует. Наличие холодной бланкетной части может серьезным образом влиять на движение расплава из-за его затвердевания. Поэтому изучение закономерностей плавления и движения расплава по поверхности твэлов является актуальной задачей.

Цели работы

Исследования аварийных процессов в твэлах быстрых реакторов проводились в 70–80-х годах XX века в крупных сериях реакторных экспериментов с использованием одиночных тепловыделяющих элементов и модельных тепловыделяющих сборок (ТВС),

* Работа выполнена за счет гранта РФ (грант № 18-79-10013).

включающих от 7 до 19 стержней [1–9]. В подобных экспериментах изучалось разрушение оболочки твэла и топлива, а также поведение чехла ТВС во время аварий со снижением расхода теплоносителя и полной мгновенной блокировки канала теплоносителя в аварийной ТВС. Цель проведенных экспериментов состояла в исследовании основных закономерностей поведения твэлов и ТВС в аварийных ситуациях. При экспериментальной имитации аварии одновременно происходит множество процессов: разогрев теплоносителя, оболочки твэлов, топлива и чехла ТВС, теплообмен теплоносителя с поверхностью твэлов, вскипание теплоносителя, кризис теплообмена, плавление и движение образовавшегося расплава, его теплообмен с теплоносителем. Недостатком указанных экспериментов является их сложность и отсутствие детальной информации о закономерностях протекания отдельных процессов, сопровождающих разрушение твэлов, например, плавления и движения расплава в твэле. Вследствие этого настоящая работа посвящена проведению экспериментов на имитаторах твэлов с модельными оболочками из легкоплавкого металла, что позволяет изучить основные закономерности, сопровождающие плавление и стекание расплава по нагреваемой поверхности.

Представленное исследование является продолжением экспериментальных и теоретических работ, проводимых совместно в ИБРАЭ РАН и ИТ СО РАН, по изучению особенностей движения расплава по цилиндрической поверхности, имитирующей поверхность твэла, также авторами анализируются факторы, определяющие термическое разрушение твэлов. Так, в работах [10, 11] проводились исследования движения жидких металлов по поверхности кварцевой трубки, в результате которых были изучены особенности движения расплава по несмачиваемой поверхности. В работах [12, 13] получили развитие теоретические и численные методы для анализа плавления твэлов и движения расплава. Результаты, представленные в настоящей работе, преследуют, в том числе, цели развития собственных методик расчета аварийных процессов при обосновании безопасности.

Еще одной целью рассматриваемых ниже экспериментов является получение надежных, воспроизводимых и обоснованных экспериментальных данных для верификации расчетных тяжелоаварийных кодов. На сегодняшний день ощущается серьезный недостаток экспериментальных исследований применительно к процессам плавления оболочек твэлов и движения расплава. Решению поставленных задач и посвящена настоящая работа.

Описание экспериментального участка и методика проведения эксперимента

В рассматриваемых экспериментах в качестве модельной оболочки был выбран легкоплавкий сплав Pb (4,5 %)–Bi (55,5 %) с температурой плавления 123 °С [14]–125 °С [15]. Имитатор твэла имел длину 0,3 м (рис. 1). Внутри имитатора находился трубчатый цилиндрический нагреватель 1, на который была нанесена модельная оболочка длиной 0,18 м и толщиной 0,001 м. Нижняя часть оболочки 2 длиной 0,02 м была необогреваемой и имитировала холодную часть твэла. Длина верхней обогреваемой части модельной оболочки 3 равнялась 0,16 м. Внешняя поверхность нагревателя была выполнена из нержавеющей стали, ее диаметр составлял 8 мм. Опытный образец разогревался с помощью электрического тока. Для подведения электрического тока использовались тоководы 4. Для контроля массы образца в течение эксперимента использовался тензометрический датчик 5. Имитатор твэла был подвешен на струнах. Потеря массы происходила в тот момент, когда расплав покидал имитатор при достижении пленкой расплава нижнего конца стержня и в результате отрыва каплей жидкости. Температура модельной оболочки измерялась с помощью хромель-алюмелевой термопары (тип К) в верхней части модельной оболочки имитатора твэла. Контроль измерений проводился с помощью видеокамеры 6, старт которой был синхронизирован со временем начала подачи электрического тока, разогревающего экспериментальную модель.

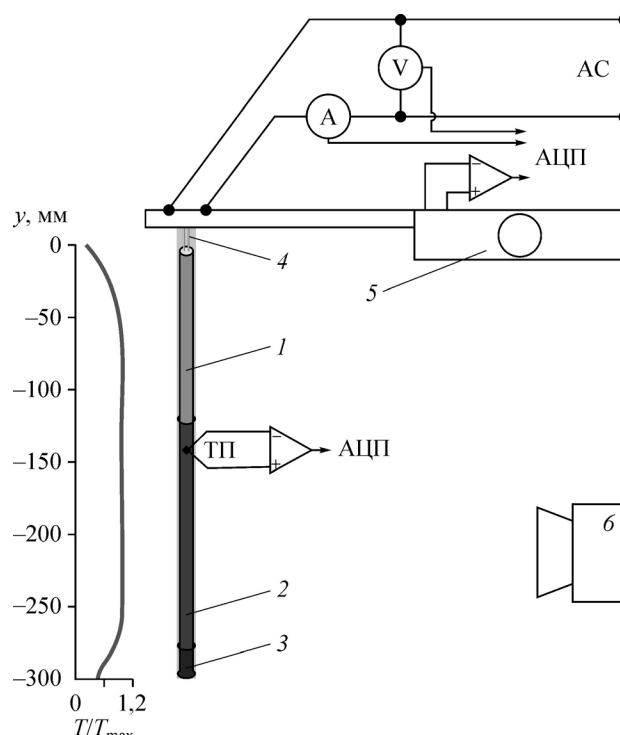


Рис. 1. Схема проведения измерений.

В ходе экспериментов также была проведена оценка линейности энергосвечения на имитаторе твэла. Измерения выполнялись с помощью тепловизора. Центральный стержень без оболочки был выкрашен в черный цвет. На него подавалось напряжение и производился его разогрев. С помощью тепловизора определялось температурное поле на поверхности. Осредненные по высоте температуры приведены слева на рис. 1. В центральной области энергосвечение распределено равномерно, о чем свидетельствует равная относительная температура. По краям наблюдается плавное снижение энергосвечения.

Проведение экспериментов сопровождалось непрерывным контролем температуры и массы имитатора твэла, а также мощности энергосвечения. Данные с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) записывались на жесткий диск компьютера. Во всех случаях велась видеорегистрация процесса перемещения расплава. Исследования выполнялись при трех различных мощностях энергосвечения: ~ 93 , ~ 171 и ~ 260 Вт. Для определения степени повторяемости результатов эксперимента и оценки неопределенности измерений для самой низкой мощности были проведены три измерения. Перечисленные мощности соответствуют следующим объемным энергосвечениям: $q_w = 20 \cdot 10^6, 37 \cdot 10^6, 56 \cdot 10^6$ Вт/м³, что составляет примерно 4–12 % от средней энергонапряженности активной зоны реакторной установки (450 Вт/м³ для реакторной установки типа БН-600 [16]). Подобные мощности соответствуют мощности остаточного энергосвечения и наблюдаются во время аварий с полной остановкой расхода при срабатывании систем защиты.

Начальная температура имитатора твэла соответствовала комнатной температуре. На нагревательный элемент скачком подавалось напряжение, устанавливаемое с помощью лабораторного автотрансформатора. Это инициировало нагрев оболочки до температуры плавления, затем имело место ее плавление и стекание вниз под действием силы тяжести. В определенный момент, когда большая часть массы стекала вниз, происходило

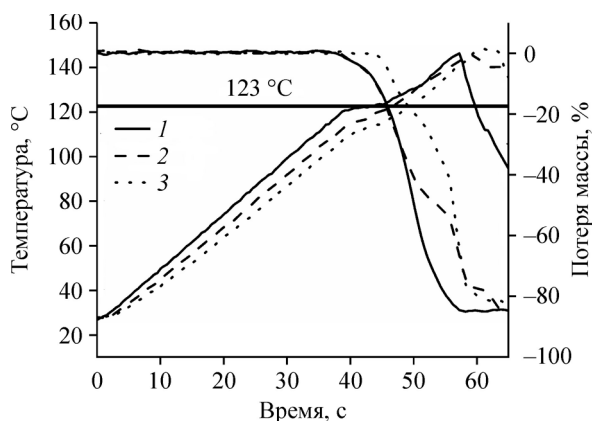


Рис. 2. Результаты экспериментов по плавлению имитатора оболочки из Pb (44,5 %)-Bi (55,5 %).
Значения мощностей: 93,6 (1), 92,1 (2), 93,2 (3) Вт.

отключение энерговыделения. Мощность энерговыделения определялась по показаниям амперметра и вольтметра, подключенных к нагревательному элементу. Было определено, что при установленном с помощью лабораторного автотрансформатора одинаковом напряжении показания амперметра и вольтметра, а значит и мощности, отличались для разных экспериментов. Так, для экспериментов при самом низком энерговыделении были получены следующие значения мощностей: 93,6, 92,1, 93,2 Вт. Исходя из представленных данных, была оценена неопределенность измерения мощности в 0,8 Вт. Результаты экспериментальных данных по эволюции температуры и скорости потери массы (в %/с) представлены на рис. 2. Из отображенных на рисунке данных также была оценена полная неопределенность измерения в эксперименте температуры и массы, которые составили 4 °C и 4 % массы соответственно. Полные неопределенности включают в себя как систематические неопределенности, связанные с погрешностью измерительных приборов, так и статистические, связанные с отличием в показаниях для разных экспериментов и вызванные влиянием различных неучтенных факторов. В последующем полученные неопределенности были использованы при исследовании других энерговыделений. На рис. 3 приведены экспериментальные данные для мощностей 170,5 и 259,7 Вт.

Анализ результатов экспериментов

Как можно видеть из рис. 2 и 3, в районе 123 °C с учетом погрешности определения температуры происходит резкое уменьшение скорости роста температуры, связанное с плавлением оболочки имитатора. При проведении экспериментов ставилась задача измерения температуры верхней границы оболочки имитатора. При первичных запусках разогрев и плавление оболочки приводили к выпадению зачеканенной в имитатор оболочки термопары, что не позволяло в полной мере оценить динамику температуры. Вследствие этого в данной серии экспериментов термопара была прижата к поверхности имитатора твэла с помощью тонкостенной пружинящей пластины (толщиной 0,2 мм), что позволяло удерживать термопару на плавящейся поверхности при малых тепловых потерях за счет державки. Термопара была установлена в верхней части имитатора оболочки, чтобы не создавать препятствия истечению расплава оболочки. Как показали визуальные наблюдения, плавление происходило не равномерно по всей площади имитатора оболочки, а первоначально на некотором участке, распространяясь в дальнейшем на всю поверхность. Особенно это было заметно при увеличении мощности энерговыделения. При наименьшей мощности энерговыделения в области расположения термопары наблюдается характерная кривая плавления с постоянной температурой около 123 °C. При увеличении мощности энерговыделения процесс плавления происходит значительно

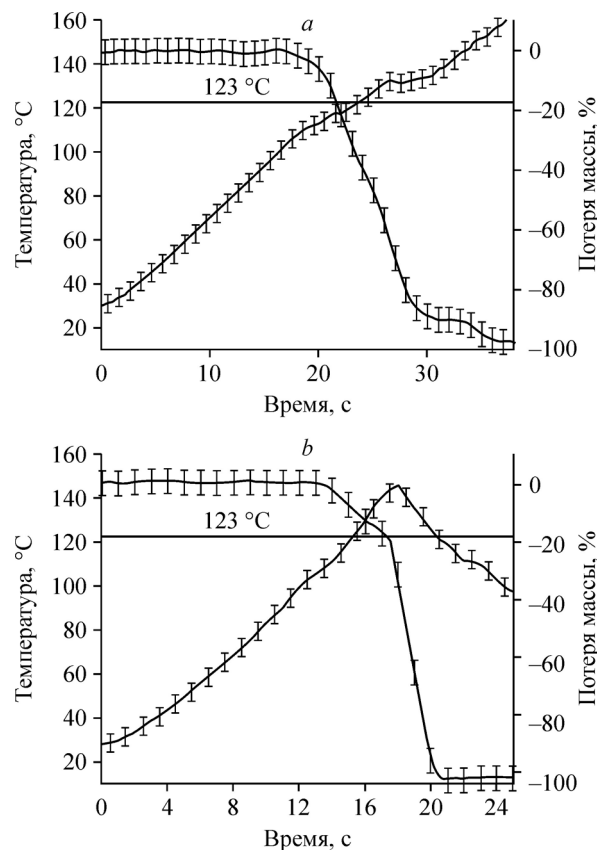


Рис. 3. Результаты экспериментов по плавлению имитатора оболочки из Pb(44,5 %)-Bi(55,5 %) при мощности 170,5 (a) и 259,7 (b) Вт.

интенсивнее, и расположенная вне зоны первоначального плавления термопара регистрирует «отголоски» плавления, которые выглядят как замедление роста температуры в диапазоне времени 18–22 с для среднего энерговыделения и 13–15 с для наибольшего энерговыделения (см. рис. 3). В этих экспериментах показания термопары могут служить ориентировочным временным диапазоном начала процесса плавления, но не температуры непосредственно в области плавления.

Во временном диапазоне, соответствующем замедлению роста температуры, начинается потеря массы имитатором, связанная с началом стекания расплава. На рис. 4 представлено сравнение рассчитанной эволюции температуры с результатами эксперимента. Расчет был выполнен в предположении постоянства теплофизических свойств Pb(44,5 %)-Bi(55,5 %) и нержавеющей стали до момента начала плавления, исходя из сохранения энтальпии:

$$T = N \cdot t / (\rho_{\text{eu}} C_{\text{peu}} V_{\text{eu}} + \rho_{\text{ss}} C_{\text{pss}} V_{\text{ss}}),$$

здесь N — полная мощность, C_p , ρ , V — изобарная теплоемкость, плотность и объем Pb(44,5 %)-Bi(55,5 %) (eu) и нержавеющей стали (ss). При расчетах, соответствующих первым трем экспериментам, использовалось среднее значение мощности — 93 Вт, а значение температуры выбиралось как усредненное по этим трем экспериментам. Как можно видеть, с учетом расхождения экспериментальных данных результаты хорошо согласуются между собой, в том числе по времени достижения температуры плавления (принято 123 °C). Дальнейшее увеличение температуры выше 123 °C связано с ростом температуры нержавеющей стали после полного расплавления оболочки.

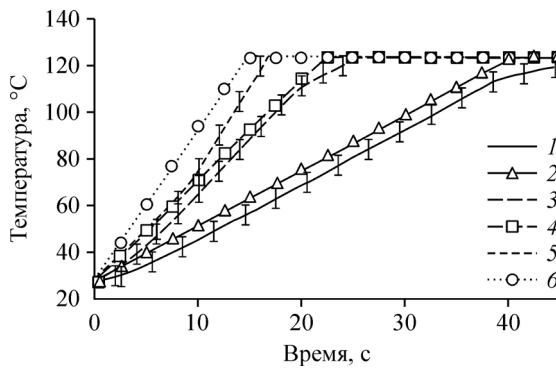


Рис. 4. Изменение температуры в процессе нагрева.

1, 3, 5 — эксперимент, 2, 4, 6 — расчет;
1, 2 — 93 Вт, 3, 4 — 170,5 Вт, 5, 6 — 259,7 Вт;
на рисунке изображена также
неопределенность результатов измерений.

Как уже было сказано выше, после достижения температуры плавления начинается стекание расплава и потеря массы имитатором. Поведение расплава в различные моменты времени представлено на рис. 5.

На фрагментах рисунка видна нижняя необогреваемая часть, которая остается частично нерасплавленной в течение эксперимента. При этом следует отметить, что поведение расплава отличается в обогреваемой и необогреваемой частях. Стеkanie расплава в верхней обогреваемой части имеет ярко выраженный пленочный характер (рис. 5a). В то же время стекание расплава по необогреваемой части происходит в виде одного (рис. 5b), двух (рис. 5c) или трех ручейков, которые наблюдались реже и в других экспериментах.

Стеkanie расплава с поверхности имитатора твэла приводит к потере массы. Экспериментально измеренная потеря массы представлена на рис. 6. При анализе первых трех экспериментов в качестве мощности использовалось $P = 93$ Вт, а в качестве массы — среднее значение по трем экспериментам. На экспериментально измеренную зависимость потери массы от времени наложена также аналитическая оценка скорости потери массы в соответствии с формулой, определяющей количество образующегося расплава:

$$\frac{1}{m_0} \Delta m = - \frac{N \cdot t}{\pi \rho_{\text{eu}} \Delta h_{\text{eu}} l} \cdot \frac{1}{R_2^2 - R_1^2} = \frac{q_w \cdot t}{\rho_{\text{eu}} \Delta h_{\text{eu}}}, \quad (1)$$

где m_0 — начальная масса имитатора оболочки, Δh_{eu} — удельная теплота плавления Pb (44,5 %)–Bi (55,5 %) [15], l — высота оболочки, R_1 и R_2 — соответственно внутренний и внешний радиусы оболочки. На рисунке видно, что результаты расчета по формуле хорошо согласуются с результатами эксперимента. Этот факт говорит о том, что скорость потери массы во всех указанных случаях ограничивается в основном скоростью образования новой массы в результате плавления.

На основании полученных данных можно сделать вывод о числе Рейнольдса для стекающей пленки расплава в верхней части имитатора. Оно может быть определено по формуле

$$\text{Re} = \frac{4Uh}{\nu_{\text{eu}}} = - \frac{dm}{dt} \cdot \frac{4}{\rho_{\text{eu}} \nu_{\text{eu}} \pi (R_1 + R_2)} = \frac{q_w (R_2 - R_1) l}{\mu_{\text{eu}} \Delta h_{\text{eu}}}, \quad (2)$$

здесь ν_{eu} , μ_{eu} — кинематическая и динамическая вязкости расплава соответственно.

Рис. 5. Поведение расплава в различные моменты времени при мощности 93,2 Вт.

a — $t = 39$ с, начало плавления; b — $t = 50$ с, развитое пленочное (верхняя часть) и ручейковое (нижняя часть) течения;
c — $t = 75$ с, конец эксперимента.

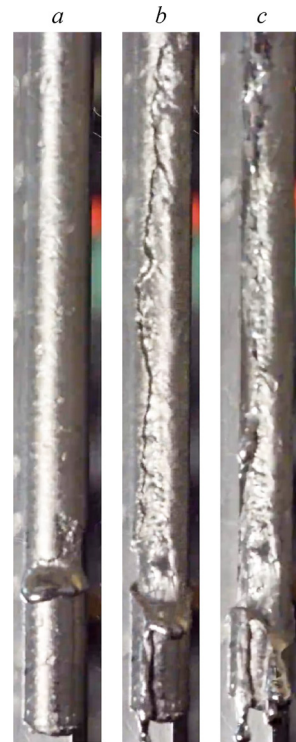
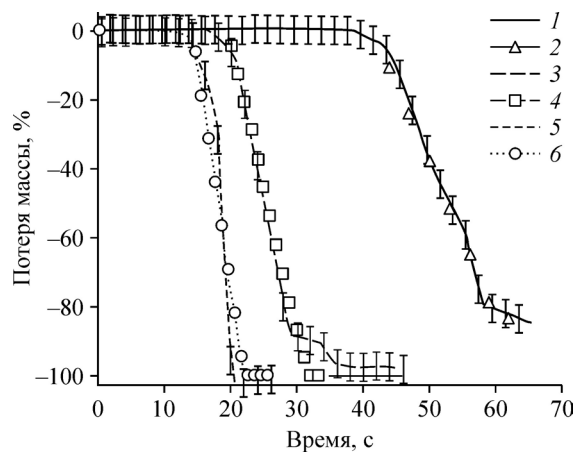


Рис. 6. Изменение массы вследствие плавления.
Обозначения см. на рис. 4.



В настоящей работе принято определение числа Рейнольдса по учетверенной толщине пленки жидкости. Такое определение принято для единообразия реализации численных методик в разрабатываемых расчетных кодах для анализа аварий в реакторных установках. В соответствии с договоренностью, число Рейнольдса определяется по гидравлическому диаметру, рассчитываемому как отношение учетверенной площади сечения к омываемому периметру, что для пленки дает учетверенную толщину. Также стоит отметить, что в работах по исследованию пленочного течения также иногда используется подобный подход [17–19]. На рис. 7 представлена зависимость числа Рейнольдса от времени в процессе эксперимента. Расчет экспериментального значения числа Рейнольдса выполнен по средней части формулы (2). Для скорости потери массы dm/dt в формуле (2) использованы экспериментальные данные. На график добавлено также число Рейнольдса, рассчитанное по всей формуле (2) с последней ее частью. Наблюдается удовлетворительное согласование аналитических оценок и экспериментальных результатов.

На рис. 7 также нанесены границы режимов для расплава в соответствии с работой [20]. При этом учтено, что в работе [20] число Рейнольдса определялось по толщине пленки. Также в этой работе было определено, что ламинарный режим имеет место при $Re < 29,5$, первый переходный — при $29,5 \leq Re \leq 138$, при $138 < Re \leq 300$ наблюдается устойчивое волновое течение, второму переходному режиму соответствует $300 < Re \leq 1600$ и развитому турбулентному течению — $1600 < Re$. Таким образом, в представленных экспериментах реализуется ламинарный режим стекания пленки расплава. В соответствии с рисунком турбулентный режим начнется в случае, если число Рейнольдса, а также, в соответствии с формулами (1) и (2), энерговыделение будут в 5 раз больше.

Таким образом, для оболочки из Pb (44,5 %)—Bi (55,5 %) до энерговыделения $\sim 280 \cdot 10^6$ Вт/м³ должен наблюдаться ламинарный режим течения пленки расплава. Воспользуемся теорией подобия и формулами (1) и (2) для переноса данных, полученных для сплава, на нержавеющую сталь, которая является конструкционным материалом реального твэла. Теплофизические свойства для стали типа 316 в жидком состоянии были взяты из справочника [21]. С использованием этих данных было получено, что даже при номинальном энерговыделении (450 Вт/м³) в предположении, что скорость потери

массы ограничивается скоростью ее образования, число Рейнольдса не превосходит 600, что говорит о том, что движение пленки расплава по обогреваемой части также будет происходить в ламинарном режиме.

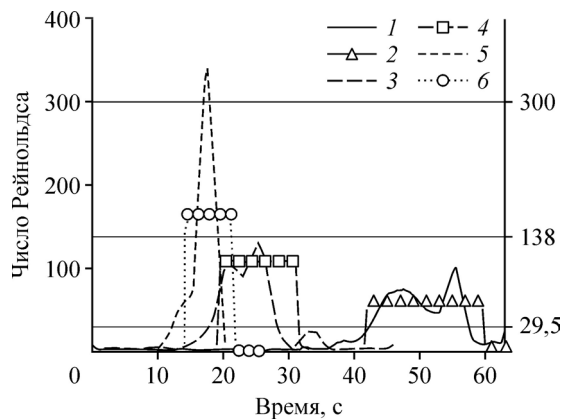


Рис. 7. Изменение числа Рейнольдса в процессе эксперимента.

1, 3, 5 — эксперимент, 2, 4, 6 — расчет;
1, 2 — 93 Вт, 3, 4 — 170,5 Вт; 5, 6 — 259,7 Вт;
горизонтальные линии соответствуют границам режимов из работы [20].

Выводы

Получены данные по изменению температуры и скорости потери массы в имитаторе твэла с оболочкой из легкоплавкого сплава при разных значениях энерговыделения. Эти данные хорошо согласуются с результатами оценочных расчетов. Показано, что в процессе плавления в верхней обогреваемой части имитатора твэла наблюдается пленочный режим стекания, а в холодной необогреваемой части — ручейковый. Выявлено, что скорость потери массы ограничена скоростью плавления. В полученном приближении оценено число Рейнольдса. В условиях проведенных экспериментов полученные числа Рейнольдса соответствуют ламинарному режиму стекания. Перенесение данных на конструкционную сталь твэла продемонстрировало, что даже при мощностях энерговыделения, соответствующих номинальным, режим течения остается ламинарным. Полученные результаты важны для понимания процессов, наблюдаемых при тяжелых авариях в реакторных установках, а также могут быть использованы для верификации разрабатываемых расчетных кодов.

Список литературы

1. Kayser G., Charpenel J., Jamond C. Summary of the SCARABEE-N subassembly melting and propagation tests with an application to a hypothetical total instantaneous blockage in a reactor // Nucl. Sci. and Engng. 1998. Vol. 128, Iss. 2. P. 144–185.
2. Ferguson D.R., Cahalan J.E., Deitrich L.W., Bowers C.H. A study of the LOCA-2 termination potential for the LOF accident in IMFBR's // Proc. Intern. Mtg. on Fast Reactor Safety Technology, Seattle. 1979. P. 110–119.
3. Deitrich L.W. An assessment of early fuel dispersal in the hypothetical loss-of-flow accident // Proc. of the Int. Meeting on Fast Reactor Safety, Seattle, WA, August, 1979. P. 615–623.
4. Sato I., Lemoine F., Struwe D. Transient fuel behavior and failure condition in the CABRI-2 experiments // Nuclear Technology. 2004. Vol. 145. P. 115–137.
5. Dickerman C.E., Rothman A.B., Klickman A.E., Spencer B.W., DeVolpi A. Summary of TREAT experiments on oxide core-disruptive accidents // ANL-79-13, Reactor Analysis and Safety Division. 1979. 59 p.
6. Barts E.W., Deitrich L.W., Eberhart J.G., Fischer A.K., Meek C.C. Summary and evaluation — fuel dynamics loss-of-flow experiments (tests L2, L3, and L4) // ANL-75-57, Reactor Analysis and Safety Division. 1975. 76 p.
7. Wright S.A., Worledge H., Cano G.L., Mast P.K., Briscoe F. Fuel-disruption experiments under high-ramp-rate heating conditions // NUREG/CR- 3862, SAN081-0413. 1983. 90 p.
8. Wright S.A., Schumacher G., Henkel P.R. In-pile observations of fuel and clad relocation during LMBFR core disruptive accidents in the STAR experiments // Nuclear Technology. 1985. Vol. 71. P. 187–216.
9. Вурич А.Д., Жданов В.С., Зверев В.В., Пивоваров О.С., Кулинич Ю.А. Результаты испытаний модельных твэлов реактора типа БРЕСТ-300 в реакторе ИГР // Вест. НЯЦ РК. 2000. Вып. 1. С. 25–30.
10. Lobanov P., Pribaturin N., Svetonosov A., Usov E., Evdokimenko I. Experimental investigation of liquid metal behavior in gas counter flow // Proceedings of ICONE-27 27th Intern. Conf. Nuclear Engng May 19–24. 2019. Ibaraki. Japan. ICONE27-2212. 4 p.
11. Pribaturin N., Lobanov P., Svetonosov A., Usov E., Zhdanov V., Evdokimenko I. Experimental modeling of fuel pins cladding melting while severe accident in lead cooled reactor // Proceedings of ICONE-27 27th International Conf. on Nuclear Engng May 19–24. 2019. Ibaraki. Japan. ICONE27-2220. 4 p.
12. Usov E.V., Butov A.A., Lezhnin S.I., Lobanov P.D. Solving the Stefan problem in the relation to melting of fuel elements of fast nuclear reactors. // J. Engng Thermophysics. 2018. Vol. 27, No. 4. P. 545–553.
13. Usov E.V., Butov A.A., Chukhno V.I., Klimonov I.A., Kudashov I.G., Zhdanov V.S., Pribaturin N.A., Mosunova N.A., Strizhov V.F. Fuel pin melting in a fast reactor and melt solidification: simulation using the SAFR/V1 module of the EVKLID/V2 integral code // Atomic Energy. 2018. Vol. 124, Iss. 3. P. 147–153.
14. Чиркин В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М.: Атомиздат, 1968. 484 с.
15. Handbook on lead-bismuth eutectic alloy and lead properties, materials compatibility, thermal-hydraulics and technologies. OECD/NEA Nuclear Science Committee Working Party on Scientific Issues of the Fuel Cycle Working Group on Lead-bismuth Eutectic. OECD 2007. NEA No. 6195. 693 p.
16. Кузнецов И.А., Поплавский В.М. Безопасность АЭС с реакторами на быстрых нейтронах. М.: ИздАТ, 2012. 632 с.
17. Asali J.C., Hanratty T. J., Andreussi P. Interfacial drag and film height for vertical annular flow // AIChE J. 1985. Vol. 31, No. 6. P. 895–902.
18. Kosky P.G. Thin-liquid films under simultaneous shear and gravity forces // Int. J. Heat and Mass Transfer. Vol. 14, No. 8. P. 1220–1224.
19. Yih S.M. Modeling heat and mass transfer in wavy and turbulent falling liquid films // Wärme- und Stoffübertragung. 1987. Vol. 21. P. 373–381.
20. Алексеев С.В., Накоряков В.Е., Покусаев Б.Г. Волновое течение пленок жидкости. Новосибирск: Наука, 1992. 254 с.
21. Кириллов П.Л., Терентьева М.И., Денискина Н.Б. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. М.: ИздАТ, 2007. 200 с.

Статья поступила в редакцию 25 ноября 2019 г.,
после доработки — 26 декабря 2019 г.,
принята к публикации 10 февраля 2020 г.