

но, в виде коллоидных частиц. Измеренные периоды полураспада (7,9 суток) дали основание предполагать, что происходит соосаждение изотопов иода. Был проведен опыт с целью получения изотопно чистых в отношении F^{18} осадков $PbClF$. Для этой цели в пробах воды первого контура реактора без предварительной обработки катионитом было проведено осаждение иодида серебра и из фильтра — осаждение $PbClF$. Методика осаждения AgI и $PbClF$ заимствована из-за работы [20]. Несмотря на эту очистку, γ -спектр осадка $PbClF$ показал, что кроме интенсивного аннигиляционного пика наблюдаются и другие пики (рис. 1, 2). Последние, однако, обладают низкими энергиями (порядка 0,30—0,40 Мэв) и не могут служить причиной возникновения во много раз более интенсивного пика с энергией 0,51 Мэв. Учитывая химическую обработку проб воды, эти пики можно объяснить соосаждением на осадок $PbClF$ некоторых изотопов мышьяка и частично иода, являющихся продуктами деления урана.

Выводы

1. Вычислена приблизительная величина насыщенной активности F^{18} в воде первого контура исследовательского реактора ИРТ-1000 в Софии.

2. Путем химической идентификации, снятия γ -спектра и измерения периода полураспада доказано присутствие F^{18} в воде, охлаждающей активную зону.

3. Показано, что практикуемое осаждение F^{18} в виде хлорфторида свинца ($PbClF$) сопровождается соосаждением других радиоактивных изотопов, присутствующих в охлаждающей воде.

Поступила в Редакцию 24/XI 1967 г.
В окончательной редакции 5/III 1968 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Коэн. «Вопросы ядерной энергетики», № 1, 88 (1958).
2. К. П. Стр а у б. Малоактивные отходы. М., Атомиздат, 1966.
3. Р. К у к. В кн. «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958)». Избр. докл. иностр. ученых. Т. 4. М., Атомиздат, 1959, стр. 207.
4. Т. Роквелл, П. Коэн. В кн. «Атомная энергетика». Материалы Международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1955). М., Госэнергоиздат, 1956, стр. 488.
5. Дж. Харрер и др. В кн. «Труды Второй международной конференции по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1957)». Избр. докл. иностр. ученых. Т. 4. М., Атомиздат, 1959, стр. 117.
6. D. Westphal. Proc. Intern. Symposium «Wasserprobleme an Kernreaktoren». Rossendorf, 1962, Zfk-17, 1963, S. 68.
7. К. Николов. «Изв. Бълг. АН. Отд. физ.-матем. и техн. наук. Сер. физ.», XII, кн. 1/2, 121 (1964).
8. В. И. Поликарпов и др. Контроль герметичности тепловыделяющих элементов. М., Госатомиздат, 1962.
9. А. Филип, З. Алексан, Е. Ионеску. О методах обнаружения радиоизотопов в контуре охлаждения гетерогенных реакторов, охлажденных водой. Бухарест, Институт атомной физики, 1964.
10. J. Russell, B. Rider. Trans. Amer. Nucl. Soc., 1, 36 (1958).
11. К. Николов, Р. Георгиев. «Изв. Бълг. АН. Отд. физ.-матем. и техн. н. Сер. физ.», XI, 193 (1963).
12. L. Balkarczyk, K. Kim, E. Lanzel. Nukleonik, 4, 105 (1962).
13. C. Carlson et al. Intern. J. Appl. Rad. and Isotopes, 4, 210 (1959).
14. L. Du Bridge et al. Phys. Rev., 53, 447 (1938).
15. K. Nikoloff. Kernenergie, H. 10, 309 (1967).
16. D. Aumann, H. Vorn. Proc. Symposium «Radiochem. Methods of Analysis». Salzburg, oktober, 1964. Vienna, IAEA. Vol. 1, 1965, p. 229.
17. J. Blaser et al. Helv. phys. acta, 24, 465 (1951).
18. Р. Эдер. В сб. «Нейтронные эффективные сечения элементов». Под ред. Е. И. Майкова. М., Изд-во иностр. лит., 1951, стр. 3.
19. В. Христов, А. Станолов. «Изв. Бълг. АН. Отд. физ.-матем. и техн. н. Сер. физ.», XII, кн. 1, 5 (1965).
20. Г. Шарло. Методы аналитической химии. М. — Л., «Химия», 1966.

Расчет температур в твэлах с дефектами методом электро моделирования

В. Е. МИНАШИН, Ю. И. ГРИБАНОВ, А. А. ШОЛОХОВ, И. П. ЗАСОРИН, В. Г. ГРОМОВ

УДК 621.039.517.5

В твэлах в процессе их изготовления или эксплуатации нередко возникают дефекты (например, трещины в топливе, пузыри в контактном слое, отслоения оболочки и т. п.).

Все это ухудшает условия охлаждения твэлов и приводит к их перегреву. Известно очень мало работ, посвященных работоспособности твэлов с дефектами. В работе [1] рассмотрен

метод расчета температур в цилиндрическом твэле, помещенном в среду с постоянной температурой, для случая, когда на наружной поверхности оболочки задан постоянный коэффициент теплоотдачи α , а в пределах некоторого угла 2ω по окружности отсутствует тепловой контакт между оболочкой и топливом.

Хотя метод расчета температур по коэффициенту теплоотдачи сравнительно прост, он имеет несколько существенных недостатков. При расчете используется коэффициент теплоотдачи, полученный экспериментально на лабораторных теплообменниках, поля температуры в которых не подобны полям температуры активной зоны реактора, потому что в лабораторных теплообменниках не учитываются такие существенные факторы, как, например, реальная конструкция твэла, тепловыделение в жидкости и др. Кроме того, расчет с использованием коэффициента теплоотдачи не позволяет учитывать взаимное влияние твэлов. В действительности тепло твэла с дефектом отводится не только протекающей около него жидкостью, но из-за повышенной температуры дефектного твэла также и жидкостью соседних ячеек, что при расчете не учитывается. Кроме того, в практике расчетов обычно ограничиваются так называемым бесконечно протяженным дефектом, т. е. рассматривают лишь двумерную задачу, так как учет конечной протяженности дефекта по высоте при использовании коэффициента теплоотдачи связан с большими трудностями даже при расчетах на ЭВМ.

В настоящей работе излагается метод расчета температур в твэлах с дефектами, свободный от указанных недостатков. Он основан на решении дифференциальных уравнений, описывающих пространственное температурное поле в твэле и теплоносителе. Дифференциальные уравнения решаются с помощью электрического моделирования.

Рассмотрим суть метода на простейшем примере. Пусть имеется стерженьковый твэл радиусом R (рис. 1, а), охлаждаемый жидкостью, протекающей в кольцевом зазоре с внешним радиусом a . На некотором расстоянии от входа имеется пространственный дефект протяженностью h от $z = z_1$ до $z = z_1 + h$. Ширина дефекта по окружности определяется углом 2ω . На границе жидкости $r = a$ теплообмен отсутствует. Примем, что поле скоростей стабилизировано и зависит только от поперечных координат x, y и теплофизические свойства

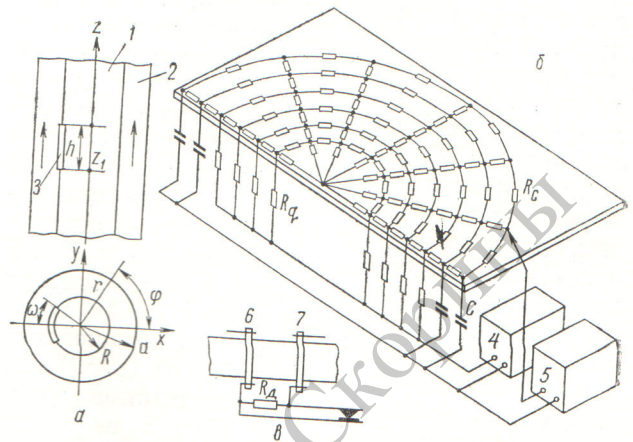


Рис. 1. Твэл с дефектом и его электрическая модель: 1 — топливный стержень; 2 — теплоноситель; 3 — дефект; 4 — генератор тока; 5 — осциллограф; 6, 7 — контакты.

среды не зависят от температуры, а продольные растечки тепла малы.

Методика электромоделирования поля температур в системе твэлов, омываемых продольным турбулентным потоком теплоносителя, изложена в работе [2], поэтому в настоящей статье рассмотрим только особенности, связанные с наличием дефекта. Предположим, что наличие дефекта проявляется в виде термического сопротивления R_d между поверхностью топлива и жидкостью, приводящего к скачку температур на границе раздела сред, т. е. при $z_1 \leq z \leq z_1 + h$ и $-\omega \leq \varphi \leq \omega$:

$$t_1(r, \varphi, z)|_{r=R} = \left[t_2(r, \varphi, z) + R_d \lambda_2 \frac{\partial t_2(r, \varphi, z)}{\partial r} \right]_{r=R} \quad (1)$$

Индексы 1 и 2 относятся к топливу и жидкости соответственно. В электрической модели аналогом продольной координаты z исследуемой системы является время протекания процесса τ . Следовательно, для имитации граничных условий в области дефекта, выраженных соотношением (1), необходимо, чтобы на некотором отрезке границы раздела двух электропроводных областей модели, соответствующих топливу и жидкости, возникало дополнительное локальное сопротивление. Это сопротивление должно возникать в определенный момент τ_1 после начала процесса в модели, а затем через некоторый отрезок времени $\Delta\tau$ оно должно исчезать. Такое изменение во времени контактного электрического сопротивления на границе раздела двух сред будет соответствовать

тому случаю, когда на поверхности твэла на расстоянии z_1 от входа имеется дефект протяженностью h . Следовательно, для электрической модели при $\tau_1 \leq \tau \leq \tau_1 + \Delta\tau$ и $-\omega \leq \varphi \leq \omega$ можно записать

$$v_1(r, \varphi, \tau) \Big|_{r=R_M} = \left[v_2(r, \varphi, \tau) + R_d \sigma_2 \frac{\partial v_2(r, \varphi, \tau)}{\partial r} \right]_{r=R_M} \quad (2)$$

Здесь v — потенциал; R_M — радиус области, соответствующей топливу; R_d — электрическое сопротивление, являющееся аналогом термического сопротивления дефекта R_d ; σ — электропроводность.

Приведем выражения (1) и (2) к безразмерному виду, получим:

1) при $Z_1 \leq Z \leq Z_1 + H$ и $-\omega \leq \varphi \leq \omega$

$$T_1(\rho = 1; \varphi, Z) = T_2(\rho = 1; \varphi; Z) + K \frac{\partial T_1(\rho, \varphi, Z)}{\partial \rho} \Big|_{\rho=1}; \quad (3)$$

2) при $\theta_1 \leq \theta \leq \theta_1 + \Delta\theta$ и $-\omega \leq \varphi \leq \omega$

$$V_1(\rho = 1, \varphi, \theta) = V_2(\rho = 1, \varphi, \theta) + K \frac{\partial V_1(\rho, \varphi, \theta)}{\partial \rho} \Big|_{\rho=1}. \quad (4)$$

Здесь $T_1 = t_1/t_0$; $T_2 = t_2/t_0$, где t_0 — подогрев жидкости в канале; $V_1 = v_1/v_0$; $V_2 = v_2/v_0$, где v_0 — среднее напряжение заряда модели; $K = \frac{R_d \lambda_1}{R} = \frac{R_d \sigma_1}{R_M}$; $\rho = \frac{r}{R}$; для модели $\rho = \frac{r}{R_M}$.

Безразмерная длина представляет собой комплекс

$$Z = \frac{z \lambda_1}{u C_p \gamma R^2},$$

безразмерное время $\theta = \frac{\tau \sigma_1}{C R_M^2}$, где $C_p \gamma$ — объемная

теплоемкость жидкости; \bar{u} и \bar{C} — средние значения скорости и емкости. Следовательно, протяженность дефекта характеризуется величинами

$$H = \frac{h \lambda_1}{u C_p \gamma R^2}; \quad \Delta\theta = \frac{\Delta \tau \sigma_1}{C R_M^2}. \quad (5)$$

Если в модели дефект на границе раздела двух сред возникает в момент времени θ_1 и имеет длительность $\Delta\theta$, то это равносильно образованию дефекта в твэле на расстоянии $Z_1 = \theta_1$ от входа в канал и соответствует величине дефекта, определяемой равенством

$$H = \Delta\theta. \quad (6)$$

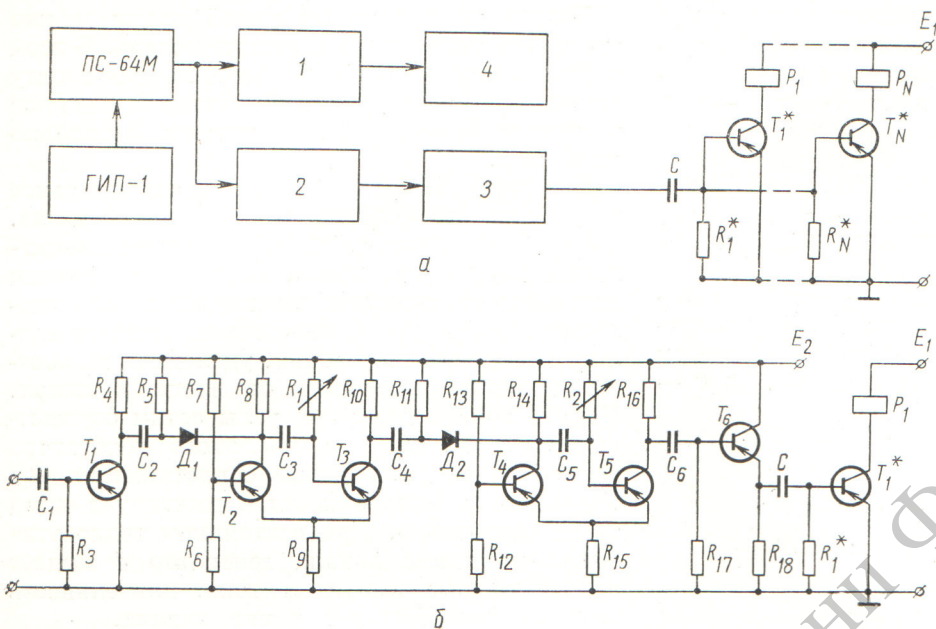
Вместо модели из сплошной среды можно построить дискретную сеточную модель. В этом случае приведенные выше соотношения между величинами исследуемой физической системы и электрической модели примут несколько иной вид.

На рис. 1, б показано принципиальное устройство сеточной модели кольцевого твэла. Распределением напряжений на сетке сопротивлений R_C в произвольный момент времени после начала процесса имитируется распределение температур в поперечном сечении топлива и жидкости в сечении, удаленном на соответствующее расстояние от входа в канал. Подвод тока питания в узлы сетки осуществляется с помощью специального генератора тока A через раздаточные сопротивления R_q . Утечка тока через емкости C имитирует отвод тепла жидкостью. При постоянном тепловыделении по длине канала генератор A выдает прямоугольные импульсы тока, длительность которых соответствует длине канала.

В той части сетки, где возникает дефект, сопротивления сетки R_C подсоединяются к узлу через промежуточные контакты 6, 7 (см. рис. 1, в), между которыми включено сопротивление R_d , имитирующее сопротивление дефекта. В нормальном состоянии сопротивление R_d замкнуто накоротко контактами реле. В определенный момент времени контакты реле размыкаются, и в течение некоторого времени между точками 6 и 7 оказывается включенным сопротивление R_d . Напряжение регистрируется с помощью осциллографа 5 (см. рис. 1, б).

На рис. 2 приведена блок-схема питания модели и принципиальная схема устройства, имитирующего дефект. Ток в виде прямоугольных импульсов задается источником питания 1 через резистор, сопротивление которого во много раз больше входного сопротивления сеточной модели 4.

Принципиальная схема устройства имитации дефектов в твэле приведена на рис. 2, б. Синхронизованные импульсы с выхода пересчетного прибора поступают на вход транзистора T_1 , отсекающего импульсы помех. Положительный импульс с выхода транзистора T_1 через диод D_1 поступает на вход одновибратора, собранного на транзисторах T_2, T_3 . Длительность импульса одновибратора 2, а следовательно, и местоположение дефекта регулируется резистором R_1 . Задним фронтом импульса с выхода одновибратора 2 через диод D_2 запускается одновибратор 3, собранный на транзисторах T_4, T_5 . Длительность импульса, сни-



Р и с. 2. Блок-схема питания модели (а) и принципиальная схема имитации дефекта (б): 1 — генератор прямоугольных импульсов тока; 2, 3 — одновибраторы, задающие местоположение и протяженность дефекта соответственно; 4 — сеточная модель.

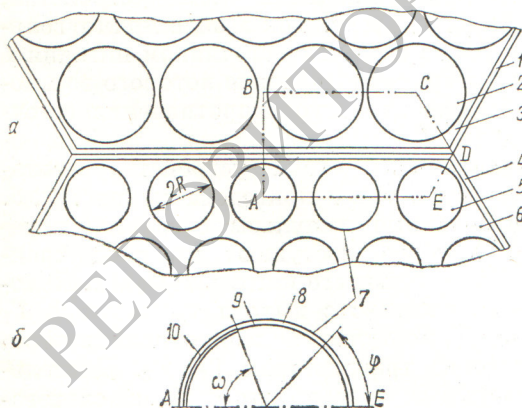
маемого с выхода одновибратора 3, задает протяженность дефекта и регулируется резистором R_2 . Отрицательный импульс с коллектора транзистора T_5 поступает на вход эмиттерного повторителя. К его выходу подсоединено параллельно N транзисторов $T_1^* - T_N^*$, нагрузкой которых являются обмотки реле $P_1 - P_N$. Эти реле своими контактами разрывают нужный участок цепи на сеточной модели. Величина N равна числу узлов сеточной

модели, в которых необходимо имитировать дефект.

Рассмотренная схема обеспечивает точность решения $\sim 5\%$. Разрешающая способность метода относительно малых дефектов определяется параметрами схемы. Как видно из выражений (5) и (6), некоторым ограничением при этом является инерционность реле. Однако изменением других параметров схемы удастся получить такую разрешающую способность, которая позволяет исследовать даже очень малые дефекты, встречающиеся на практике.

На рис. 3, а показана система, исследованная с помощью изложенного метода. Она состоит из кассет, расположенных на стыке двух зон воспроизводства ядерного реактора [2]. Первая кассета находится на внутренней границе внешней зоны воспроизводства и представляет собой шестиугольную трубу 1, в которой размещены 37 твэлов 2. Вторая кассета, примыкающая к первой, расположена на внешней границе внутренней зоны воспроизводства и состоит из такой же трубы 4, в которой находится 61 твэл меньшего диаметра 5. Твэлы охлаждаются турбулентным потоком жидкого металла 3 и 6.

Для исследования поля температур была построена специальная сеточная модель области ABCDEA (см. рис. 3, а). Предполагалось, что границы этой области являются адиабатами.



Р и с. 3. Исследуемая система:

1, 2, 3 — шестиугольная оболочка, твэл и теплоноситель внешней зоны воспроизводства; 4, 5, 6 — то же для внутренней зоны; 7 — твэл с дефектом; 8 — оболочка; 9 — контактная прослойка; 10 — дефект.

тическими. На рис. 3, б показан дефектный твэл 7 внутренней зоны воспроизводства; на дуге 2ω отсутствует контактный подслои 9 (между топливом и оболочкой 8 имеется зазор 10, плохо проводящий тепло).

Система исследовалась при следующих параметрах: $Re = \frac{wR}{\nu} \approx 10^5$, где w — средняя скорость теплоносителя; критерий Прандтля $Pr \approx 10^{-2}$. При построении сеточной модели шаг по осям x и y взят равным $\Delta x/R = \Delta y/R = 1/15$.

Расчет локальных значений скорости $u(x, y)$ и турбулентной теплопроводности $\lambda_T(x, y)$ проводился по методу Н. И. Булеева [3]. Дефект располагается по дуге $\omega = 70^\circ$ в пределах угла $\varphi = 110 \div 180^\circ$. Система исследовалась для случая, когда в районе дефекта тепловой контакт между топливом и оболочкой нарушен полностью ($R_d = \infty$). Длина активной зоны $l/d = 75$, где d — диаметр твэлов δ . Для дефекта конечной длины $z_1 = 0,56l$. Для $h/d = \infty$ дефект простирается, начиная от входа в активную зону, по всей длине твэла. Тепловыделение по длине твэла постоянно.

На рис. 4 показано распределение температур по углу на внутренней поверхности оболочки твэла и на поверхности топлива при $z_1 = 0,56l$. При отсутствии дефекта эти распределения совпадают (см. кривую 1 на рис. 4). При нарушении термического контакта температура поверхности остальной части твэла возрастает за счет увеличившегося потока тепла (см. кривую 2 на рис. 4 в пределах $\varphi = 0 \div 110^\circ$). Температура поверхности топлива в месте расположения дефекта также значительно возрастает, в то время как температура оболочки падает из-за прекращения подвода тепла в этом месте. Наиболее опасной для оболочки является точка, в которой начинается дефект. Здесь увеличение температуры имеет максимальную величину. При бесконечно протяженном дефекте увеличение температуры оболочки в этом месте составляет почти 70% среднего подогрева жидкости в исследуемой системе.

Наибольший подъем температуры поверхности топлива происходит в центре дефекта при $\varphi = 180^\circ$. В этом месте разность температур между поверхностью топлива и жидкостью возрастает в несколько раз. Однако такое резкое изменение температуры оболочки и поверхности топлива происходит только в том случае, если дефект располагается по всей длине твэла. Если же протяженность дефекта имеет конечную величину, то значение тем-

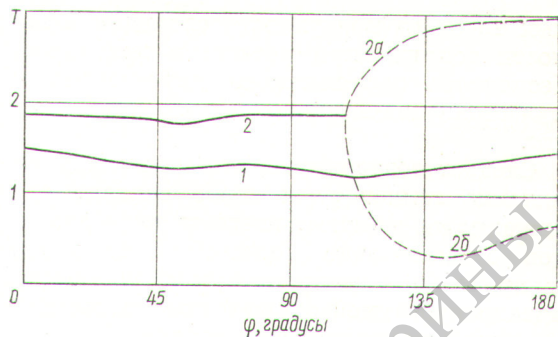


Рис. 4. Распределение температур по периметру твэла:

1 — дефект отсутствует; 2 — бесконечно протяженный дефект в пределах угла $\varphi = 110 \div 180^\circ$; 2а, 2б — температура внешней поверхности топлива и внутренней поверхности оболочки соответственно.

пературы изменяется меньше. На рис. 5 показана зависимость относительного увеличения температуры от протяженности дефекта. На этом рисунке

$$\vartheta(h) = \frac{t(z, h) - t(z, h=0)}{t(z, h=\infty) - t(z, h=0)}$$

Числитель дроби равен всплеску температур при возникновении дефекта протяженностью h , знаменатель — всплеску температур в этой же точке при бесконечно протяженном дефекте. Из графика видно, что при конечной длине дефекта увеличение температуры оболочки по дуге $\varphi = 0 \div 110^\circ$, т. е. по дуге, где контакт с топливом не нарушен, значительно ниже, чем увеличение температуры при бесконечно протяженном дефекте. Так, для точки $\varphi = 0$ (кривая 1) при длине дефекта, равной 0,5—2 диаметрам твэла, увеличение температуры почти в десять раз меньше по сравнению с тем, когда дефект расположен по всей длине. Для осталь-

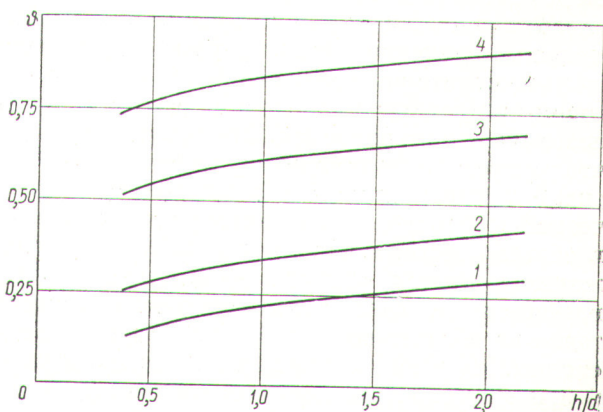


Рис. 5. Зависимость относительного увеличения температуры от протяженности дефекта, расположенного в пределах угла φ : 1 — 0° ; 2 — 70° ; 3 — 110° ; 4 — 180° (поверхность топлива).

ных точек на поверхности оболочки и поверхности топлива при расчете в предположении бесконечно протяженного дефекта также получается значительно завышенный результат.

Следует подчеркнуть, что относительное увеличение температуры слабо зависит от протяженности дефекта, поэтому даже для дефектов с достаточно большой протяженностью в продольном направлении твэла расчет по идеализированной схеме в предположении бесконечной протяженности дефекта будет давать завышенные значения температуры. В результате такого идеализированного подхода к расчету температур могут быть сделаны неверные выводы относительно работоспособности твэлов при наличии локальных нарушений термического контакта между топливом и оболочкой твэла.

На рис. 6 приведены осциллограммы, полученные описанным выше методом. На рис. 6, а показана осциллограмма изменения температуры поверхности твэла для $\varphi = 85^\circ$. Отклонение луча осциллографа по оси ординат пропорционально локальной температуре, отсчитанной от температуры входа, отклонение луча по оси абсцисс пропорционально расстоянию от входа. Пунктирной линией показано изменение температуры поверхности по этой же образующей при отсутствии дефекта. На рис. 6, б показано изменение температуры по той же образующей ($\varphi = 85^\circ$), когда длина дефекта составляет $1,8d$. Видно, что в точке $z = z_1$, т. е. там, где начинается дефект, температура поверхности оболочки резко повышается. Однако всплеск температуры намного меньше по сравнению с тем, когда дефект расположен по всей длине твэла. За дефектом ($z > z_1 + h$) температура оболочки вновь снижается, причем прежнее, невозмущенное значение температуры достигается лишь на некотором конечном интервале, на котором температура оболочки остается выше невозмущенного значения. Это объясняется тем, что распределение температур на осциллограмме рис. 6, б относится к той образующей цилиндрической оболочки твэла, которая не попадает в область дефекта. Поэтому в районе расположения дефекта $z_1 < z < z_1 + h$ жидкость перегревается за счет дополнительного притока тепла из области топлива с ухудшенным теплообменом. По этой же причине на осциллограмме рис. 6, в температура поверхности топлива после всплеска в районе расположения дефекта становится ниже температуры этой поверхности при отсутствии дефекта.

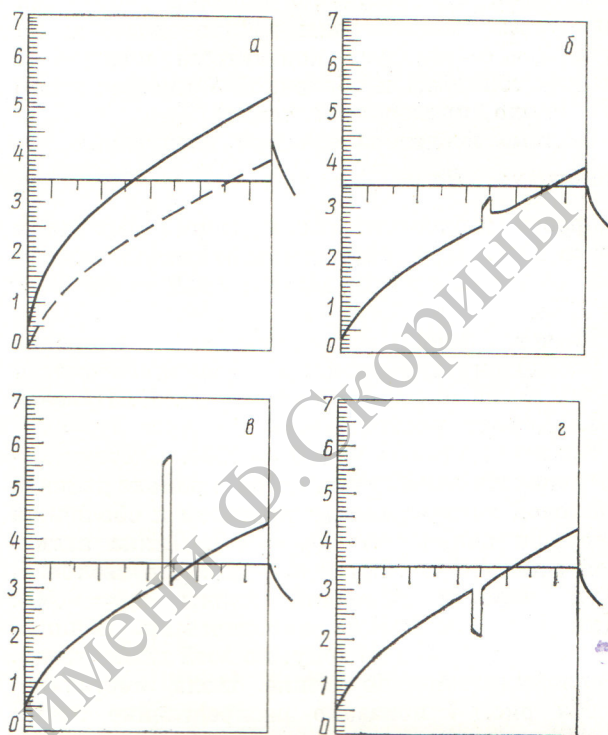


Рис. 6. Изменение температуры оболочки и поверхности топлива в продольном направлении (образцы осциллограмм): а — $\varphi = 85^\circ$, сплошная линия — бесконечно протяженный дефект, пунктир — дефект отсутствует; б — $\varphi = 85^\circ$, длина дефекта $h = 1,8d$; в — поверхность топлива; г — поверхность оболочки, $\varphi = 180^\circ$, $h = 1,8d$.

Приведенные результаты показывают, что описанная методика позволяет рассчитывать распределение температур поверхности оболочки и топлива при наличии локальных нарушений в структуре твэла, например при наличии местных отслоений оболочки от поверхности топлива. Электрическое моделирование поля температур для группы твэлов имеет и другие преимущества по сравнению с методом расчета по коэффициенту теплоотдачи. Так, при электро-моделировании учитывается взаимное влияние твэлов и локальные особенности теплообмена, связанные с распределением скоростей теплоносителя в системе.

Поступила в Редакцию 3/VII 1967 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. С. Турлидина, К. Д. Воскресенский, «Теплофизика высоких температур», 4, 660 (1966).
2. Ю. И. Грибанов и др. «Атомная энергия», 22, 276 (1968).
3. Н. И. Булеев В сб. «Теплопередача». М., Изд-во АН СССР, 1962, стр. 64.