

УДК 621.039.5

КРИТЕРИИ ЦЕЛОСТНОСТИ МАКЕТОВ ТРУБ ТОПЛИВНЫХ КАНАЛОВ РБМК В УСЛОВИЯХ АВАРИЙНОГО РАЗОГРЕВА

Локтионов В.Д. (Московский энергетический институт — технический университет)

Известно, что нарушение штатного режима теплосъема в РБМК (аварии типа LOCA, ATWS) может приводить к разогреву топливного канала. При избыточном давлении разогрев, как правило, сопровождается вязкопластическим деформированием канальной трубы и разрушением, которые зависят, в свою очередь, от параметров аварийного процесса (давления в технологическом канале, характера и темпа разогрева канальной трубы и др.). Экспериментальное изучение основных закономерностей термдеформационного поведения канальных труб РБМК в условиях, имитирующих их аварийный разогрев, проводят, как правило, на укороченных макетах, вырезанных из штатных канальных труб [1, 2], и уменьшенных по диаметру и длине моделях труб из сплава $Zr-2,5\% Nb$ [1]. Результаты подобных экспериментов являются основой для построения и обоснования критериев разрушения при их аварийном разогреве, а также нахождения определяющих параметров в модели ползучести сплава $Zr-2,5\% Nb$ [1, 3]. В частности, в работе [3] для этого сплава в качестве базовой принималась модель ползучести канадских исследователей для аналогичного сплава канальных труб реактора CANDU, полученная в результате проведения специальных материаловедческих экспериментов на высокотемпературную ползучесть в широком диапазоне температуры и напряжений [4]. Образцы для этих экспериментов вырезали из штатных канальных труб CANDU в продольном и поперечном направлениях, в целях верификации полученной модели ползучести проводили серию испытаний по аварийному разогреву и деформированию укороченных фрагментов.

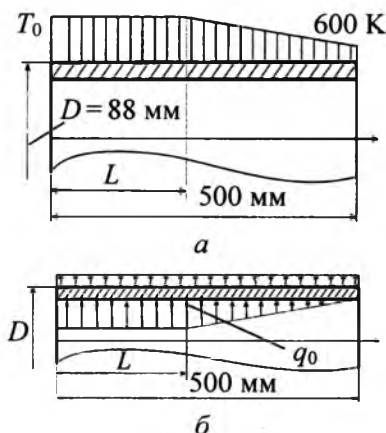
Отечественные расчетные программы для теплового и прочностного анализов пространственных конструкций при нештатных режимах работы ASHTER-TK, ATM-TK [5—7] и реализованные в них модели ползучести сплава $Zr-2,5\% Nb$ позволяют численно оценивать термдеформационное поведение моделей канальных труб в широком диапазоне изменения параметров, характеризующих различные режимы разогрева аварийного канала РБМК. Модели ползучести, реализованные в этих программах, были построены на основе испытаний на высокотемпературную ползучесть образцов, вырезанных из штатной необлученной канальной трубы технологического канала РБМК в продольном и поперечном направлениях [8], и путем соответствующей обработки экспериментальных данных.

В связи с изложенным представляет практический интерес использование расчетных программ для численного моделирования поведения макетов канальных труб технологических каналов РБМК при различных режимах их нагрева, что позволит получить в замкнутом виде функциональные соотношения, связывающие предельные параметры состояния трубы макета (температуру и радиальную деформацию в момент разрушения) с параметрами испытаний. Необходимость получения таких соотношений определяется возможностью их использования как для оперативного планирования и интерпретации результатов испытаний, так и обоснования критериев целостности конструкции аварийного канала РБМК. Построение подобных функциональных зависимостей и их сравнение с известными крите-

риальными соотношениями для условий разрушения канальной трубы РБМК при аварийном разогреве [3] и экспериментальными данными, полученными при испытаниях макетов канальных труб [2, 6], позволит объективно оценить степень точности и адекватность физических и математических моделей, в частности, модель ползучести циркониевого сплава $Zr-2,5\% Nb$.

Методика и объект исследования. В качестве объекта исследования в настоящей работе был выбран фрагмент штатной необлученной канальной трубы технологического канала РБМК длиной 1000 мм, нагруженный внутренним давлением. Длина фрагмента определялась возможностью сопоставления результатов численного моделирования с экспериментальными испытаниями макетов канальных труб [2, 6]. В целях воспроизведения условий нагрева макетов, а также моделирования косвенного нагрева рассматривали два случая: разогрев макета (фрагмента) канальной трубы с заданной постоянной скоростью и разогрев трубы за счет подвода тепловой нагрузки по ее внутренней поверхности. В первом случае предполагалось, что в начальный момент времени распределение температуры по длине трубы соответствует показанному на рис. 1, а. Профиль температуры имеет две характерные области: область, где температура в начальный момент времени имеет постоянное значение T_0 , и область, где она уменьшается линейно от начальной до 600 К на конце трубы. В рассматриваемом случае предполагалось, что разогрев трубы от начального состояния до момента ее разрыва происходит с заданной постоянной скоростью. Во втором случае принималось, что в начальный момент времени к трубе, имеющей температуру 600 К, подводится тепловой поток по ее внутренней поверхности. Профиль распределения плотности теплового потока по длине исследуемого фрагмента имеет два характерных участка: на первом плотность теплового потока постоянна и равна q_0 , на втором она уменьшается линейно до нуля на конце трубы (рис. 1, б). Кроме того, на внешней поверхности трубы осуществляется конвективный теплообмен и теплообмен излучением с внешней средой, имеющей температуру 320 К. Степень черноты внешней поверхности трубы принималась равной 0,65. Для обоих случаев предполагалось равномерное распределение температуры по толщине стенки в начальный момент времени. Исходя из условия симметрии, при численном моделировании рассматривалась половина исследуемой трубы на длине 500 мм.

Методика построения функциональных зависимостей, которые связывают параметры, характеризующие аварийный разогрев макета канальной трубы, с параметрами ее состояния в момент разрушения, состояла из следующих этапов. На начальной стадии для каждого случая определяли совокупность параметров (факторов), влияющих на выходные функции состояния (температуру и радиальную деформацию канальной трубы в момент разрушения, скорость радиальной деформации), а также диапазон варьирования каждого фактора. После этого в соответст-



Р и с. 1. Температурный профиль по длине модели трубы в начальный момент времени в первом расчетном случае (а) и эскиз тепловой схемы во втором расчетном случае (б)

нии с матрицами экспериментов проводили расчетное моделирование термостойкого поведения исследуемой конструкции посредством расчетного конечно-элементного кода АТМ-ТК. Затем выполняли статистическую обработку результатов численных экспериментов и находили аппроксимационные зависимости для выходных функций. В первом случае в качестве факторов были выбраны следующие параметры: давление в трубе P , скорость разогрева Vt , отношение длины первого участка к внешнему диаметру трубы L/D , начальная температура T_0 , во втором — давление в трубе, плотность теплового потока на внутренней стенке трубы q_0 и отношение длины первого участка L к внешнему диаметру трубы.

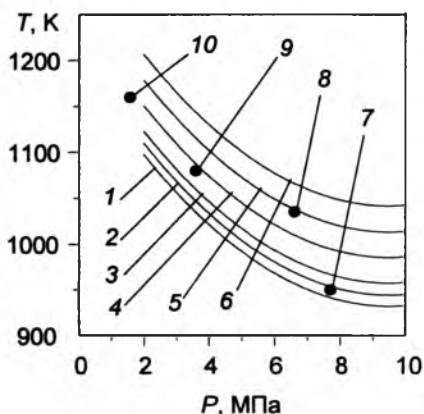
Учитывая геометрическую и физическую симметрию исследуемого объекта, задачи по определению температурного поля и напряженно-деформированного состояния в конструкции трубы решали в осесимметричной постановке.

Анализ результатов. На основании численных экспериментов и их статистической обработки были построены аппроксимационные зависимости, связывающие температуру и радиальную деформацию трубы при ее разрушении с рассматриваемыми факторами. В частности, для первого случая была определена температура канальной трубы в момент разрыва при давлении от 0,5 до 2 МПа и скорости ее нагрева от 2 до 18 К/с:

$$T = 1654 - 659P + 20Vt + 191P^2 - 0,46Vt^2. \quad (1)$$

При давлении в трубе от 2 до 10 МПа и скорости нагрева от 0,5 до 20 К/с для оценки температуры разрыва канальной трубы можно использовать соотношение

$$T = 1195 - 56P + 5,6Vt + 3P^2. \quad (2)$$



Р и с. 2. Расчетная зависимость температуры макета канальной трубы при разрыве от давления и скорости нагрева 0,5 (1), 2,5 (2), 5 (3), 10 (4), 15 (5), 20 К/с (6) и полученная в эксперименте температура разрыва макета 950 К при скорости нагрева 3 К/с, давлении 7,7 МПа (7), 1035 К, 11,5 К/с, 6,6 МПа (8), 1080 К, 3,9 К/с, 3,6 МПа (9), 1160 К, 3,9 К/с, 1,58 МПа (10)

На рис. 2 показана температура модели трубы в момент ее разрушения, рассчитанная по уравнению (2). Для оценки точности модели (2) в отношении предсказания ожидаемой температуры трубы при ее разрушении здесь же приведена температура макетов топливных труб, полученная при испытаниях на маломасштабной экспериментальной установке К-6 [2, 6]. Как можно видеть, наблюдается удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных результатов.

При статистической обработке результатов численного моделирования для первого случая оказалось, что определяющее влияние на температуру трубы при ее разрыве оказывают давление и скорость нагрева. Этот факт согласуется с известными результатами [1—3, 6]. Параметр L/D , как и начальная температура трубы, лишь незначительно влияет на температуру при разрушении.

Во втором случае канальная труба разогревается за счет подвода тепловой энергии к ее внутренней поверхности. Следует заметить, что при низкой плотности теплового потока деформирование трубы происходит в условиях ее квазистационарного температурного состояния. Для второго случая уравнение, связывающее температуру канальной трубы в момент разрыва с давлением, параметром L/D и плотностью теплового потока, выглядит следующим образом:

$$T = 835 - 36P + 5251q_0 - 3L/D + 2,5P^2 - 13\,816q_0^2 + 1,7(L/D)^2 - 104,4Pq_0 + 0,14PL/D - 79,3q_0L/D. \quad (3)$$

В уравнении (3) и последующих соотношениях предполагается следующий диапазон варьирования параметров: 0,5—10 МПа, 0,5—3,5 — параметр L/D , 0,05—0,2 МВт/м² — плотность теплового потока.

Анализ уравнения (3) показал слабое влияние параметра L/D на температуру трубы при ее разрыве, что позволяет использовать вместо формулы (3) следующее двухпараметрическое уравнение:

$$T = 912 - 47P + 4417q_0 + 2,5P^2 - 13\,815,7q_0^2. \quad (4)$$

Перепад температуры по толщине трубы при ее нагреве можно оценить по соотношению

$$\Delta T = 1 + 136q_0 - 211q_0^2. \quad (5)$$

Радиальная деформация канальной трубы при ее разрыве в условиях, имитирующих аварийный разогрев технологического канала, описывается трехпараметрическим уравнением вида

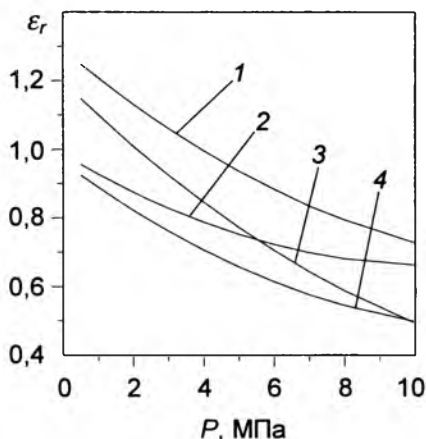
$$\begin{aligned} \varepsilon_r = & 1,05 - 0,09P + 7,69q_0 - 0,06L/D + \\ & + 0,003P^2 - 34q_0^2 - 0,02(L/D)^2 - 0,09Pq_0 + \\ & 0,01PL/D + 0,18q_0L/D. \end{aligned} \quad (6)$$

Расчеты по уравнению (6) показали существенную зависимость радиальной деформации трубы при ее разрыве от параметра L/D (рис. 3), особенно при относительно низком давлении в канальной трубе.

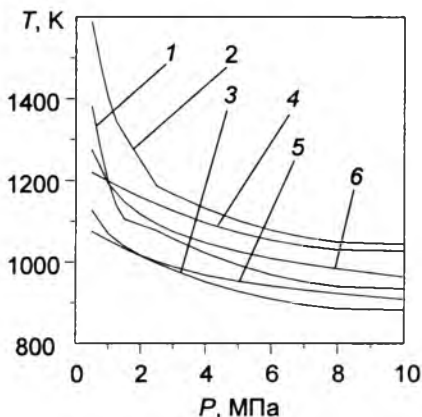
При сопоставлении наблюдается удовлетворительное совпадение температуры разрушения канальной трубы, рассчитанной по соотношениям (1)—(4), с результатами работы [1] (рис. 4).

Используя уравнение (6) и уравнение для средней скорости радиальной деформации

$$\begin{aligned} \lg(\dot{\xi}_r) = & -4,86 - 0,074P + 43,51q_0 - 0,508L/D + \\ & + 0,005P^2 - 122,46q_0^2 + 0,141(L/D)^2 - \\ & - 0,774Pq_0 - 0,001PL/D - 0,208q_0L/D, \end{aligned} \quad (7)$$



Р и с. 3. Зависимость радиальной деформации макета канальной трубы при разрыве от внутреннего давления, плотности теплового потока 0,05 (1, 2), 0,2 МВт/м² (3, 4) и характера его распределения по длине трубы (L/D) 1 (1, 3), 3,5 (2, 4)



Р и с. 4. Зависимость от давления температуры трубы макета при разрыве, рассчитанной по уравнениям (1), (2) при скорости нагрева 0,5 (1), 20 К/с (2) соответственно, < 1 [1] (5), > 1 К/с [1] (6) и плотности теплового потока 0,05 (3), 0,2 МВт/м² (4) по уравнениям (3), (4) соответственно

можно оценить общее время нагрева и деформации канальной трубы до ее разрыва.

Заключение. Полученные аппроксимационные зависимости (1)–(7) позволяют оценивать и прогнозировать состояние макетов канальных труб РБМК при их испытаниях в условиях свободного деформирования и имитации аварийного нагрева. Прогнозирование состояния аварийного технологического канала РБМК на основании полученных зависимостей требует дополнительной экспериментальной проверки и обоснования.

Результаты работы показали, что используемая в расчетном коде АТМ-ТК модель ползучести сплава Zr—2,5% Nb удовлетворительно описывает вязкопластическое поведение канальных труб РБМК в условиях аварийного разогрева.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новосельский О.Ю., Филинов В.Н., Крючков И.И. Исследование поведения технологических каналов РБМК в условиях аварийного разогрева. — Атомная энергия, 1995, т. 78, вып. 3, с. 155—160.
2. Локтионов В.Д., Гашенко В.А., Абакумова О.Н. и др. Экспериментальное изучение поведения топливных каналов труб РБМК при аварийных ситуациях. — В сб.: 15-я Межд. конф. по технологии реакторостроения, 15—20 августа 1999, Сеул, Корея, с. 316—319.
3. Новосельский О.Ю., Филинов В.Н. Критерии разрушения труб топливных каналов РБМК при аварийном нагреве. — Атомная энергия, 1997, т. 82, вып. 4, с. 277—282.
4. Shewfelt R., Lyall L., Godin D. A high-temperature creep model for Zr—2,5 wt % Nb pressure tubes. — Nucl. Mater., 1984, v. 125, p. 228—235.
5. Локтионов В.Д., Ярошенко Н.И. Компьютерный код ASHTER-ТК для моделирования термовязкопластического поведения труб ТК реактора РБМК в аварийных условиях. Годовой отчет НИИКИЭТа, 1997, с. 87—91.
6. Локтионов В.Д., Гашенко В.А., Абакумова О.Н., Ярошенко Н.И. Расчетно-экспериментальный анализ поведения и разрушения труб ТК РБМК в аварийных условиях. — Труды конф. «Проблемы циркония и гафния в ядерной энергетике», 14—19 июня 1999, ХФТИ, Алушта, 1999, с. 65—67.
7. Расчетно-экспериментальный анализ термомеханического поведения трубы ТК РБМК с графитовыми элементами в условиях аварии типа LOCA. Инв. № 02.20.02 04339. Электрогорск, ЭНИЦ — ВНИИАЭС, 2001. 70 с.
8. Любашевская И.В., Торшенин Н.Г., Соснин О.В., Локтионов В.Д. Деформационно-прочностные свойства циркониевого сплава при температурах 600—800 °С. — В сб.: Динамика сплошной среды. Институт гидродинамики СО РАН, 2000, вып. 116, с. 198—201.