

УДК 519.876.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТРУИ РАСПЛАВА СО СТАЛЬНОЙ СТЕНКОЙ

Сураев А.С., Иркимбеков Р.А., Вурим А.Д.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Представлены результаты моделирования воздействия расплава стали и керамического ядерного топлива (двуокись урана) на стальную стенку. Оценена длительность процесса до момента образования сквозного отверстия в стальной стенке и количество расплава, которое для этого необходимо.

Ключевые слова: расплав, разрушение стальной стенки, моделирование нештатной ситуации, Ansys Fluent.

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении анализа условий безопасного проведения экспериментов, предполагающих получение расплава смеси ядерного топлива и конструкционных материалов как объекта исследований, необходимо учитывать возможность выхода расплава за пределы герметичных полостей, в которых происходит разогрев и плавление материалов. Поскольку, как правило, плавление материалов внутри таких полостей сопровождается повышением давления, нельзя исключить возможность струйного истечения расплава из этих полостей в направлении стенок, являющихся элементами барьеров безопасности устройств, предназначенных для плавления материалов. В целях создания защитных барьеров, обеспечивающих реализацию функций безопасности в условиях струйного воздействия расплава на их элементы, необходимо опираться на количественные оценки параметров процессов, происходящих во время такого взаимодействия.

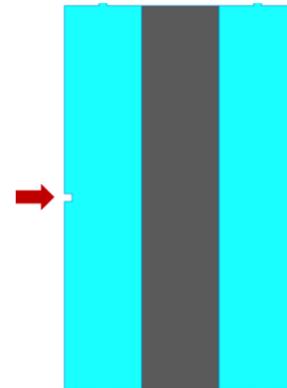
Для количественной оценки процесса взаимодействия струи расплава со стенкой был использован расчетный код Ansys Fluent [1], который, в общем случае, предоставляет возможности для решения теплогидравлических, газодинамических и аэродинамических задач. В нем заложен специальный набор функций и методов для решения задач, связанных с фазовыми переходами материалов такими, как плавление и кристаллизация [2]. Вместе с тем, без использования специальных приемов, в Ansys Fluent невозможно воспроизвести динамическую картину перемещения материалов и фазовых границ. С этой целью можно задействовать дополнительные возможности программы Ansys Fluent такие, как пользовательские функции и динамические сетки, но их применение существенно усложняет задачу и требует больших затрат машинного времени.

С учетом этих обстоятельств, для описания свойств стальной стенки было предложено использовать модель «квазижидкости», то есть материала с большими величинами вязкости и поверхностного натяжения, при которых жидкость будет иметь характеристики, эквивалентные характеристикам твердого тела, – в конкретном случае, характеристики стали. По мере разогрева такой стенки вязкость «квазижидкости» уменьшается, при этом она приобретает

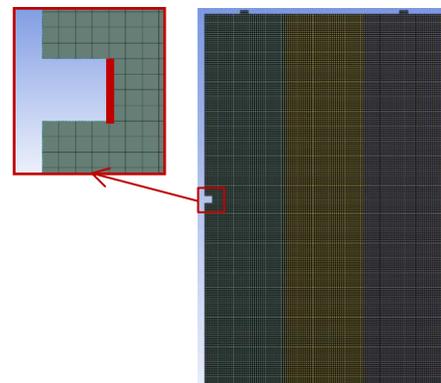
свойства текучести, вплоть до состояния расплава стали.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В задаче рассматривалось взаимодействие струи расплава двуокиси урана с плоской вертикальной стенкой (сталь 12X18Н10Т) толщиной 2 мм, боковые поверхности которой контактируют с газом (рисунки 1 и 2). Толщина каждого слоя газа равна 2 мм. Протяженность расчетной области в вертикальном направлении составляет 20 мм. Расчеты проведены для двух вариантов диаметра отверстия, через которое происходит истечение расплава из полости плавления – 0,2 мм и 2 мм. Входные зоны для этих вариантов имеют различный вид.



а) расчетная область



б) конечно-элементная модель

Рисунок 1. Расчетная модель с отверстием 0,2 мм

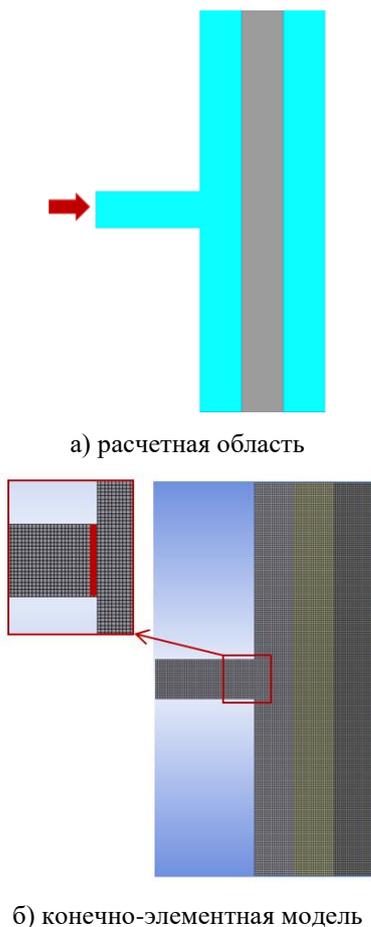


Рисунок 2. Расчетная модель с отверстием 2 мм

Расчетная область с отверстием диаметром 2,0 мм (рисунок 2) содержит входной участок длиной 10 мм, на горизонтальных границах которого, как и на горизонтальных границах входной зоны расчетной области с отверстием диаметром 0,2 мм (рисунок 1), запрещено перемещение массы и энергии. Расплав поступает во входную зону через вертикальную торцевую стенку входной зоны.

Размерная схема расчетной области и конечно-элементное представление этой области в расчетной модели выбраны исходя из соображений оптимального сочетания качества результатов расчета при допустимых затратах расчетного времени.

Модель области с отверстием диаметром 0,2 мм (рисунок 1) содержит 24416 элементов (минимальный размер элемента равен 0,05 мм).

Модель области с отверстием диаметром 2 мм (рисунок 2) содержит 6500 элементов (минимальный размер элемента равен 0,1 мм).

Для расчетных областей заданы следующие граничные условия:

- верхняя и нижняя границы расчетной области открыты и на них задано постоянное давление, равное начальному давлению в соответствующем слое газа, что подразумевает возможность свободного вы-

хода массы и энергии через границу при увеличении давления в слое газа;

- через правую вертикальную границу расчетной области перемещение массы и энергии невозможно;

- через левую вертикальную границу расчетной области перемещение массы и энергии невозможно по всей протяженности границы, за исключением входной зоны, моделирующей отверстие, через которое расплав поступает в расчетную область. Геометрические размеры входной зоны расчетной области подбирались итерационно, исходя из требования формирования стабильной струи расплава, направленной на стенку.

Начальные условия и допущения при проведении расчетов:

- начальная температура стальной стенки и окружающего газа равна 573 К;

- скорость течения расплава двуокиси урана в струе определяется избыточным давлением в гипотетической полости плавления, равным 1,5 МПа (давление расплава на входе в отверстие);

- температура расплава двуокиси урана в полости плавления равна 4000 К и остается постоянной на протяжении всего расчета;

- теплопроводность (17 Вт/м·К) и вязкость (0,003 Па·с) расплава двуокиси урана остаются постоянными на протяжении всего расчета;

- плотность и теплоемкость двуокиси урана (таблица 1) и теплоемкость и вязкость стали (таблица 2), используемые в расчете, изменяются с изменением температуры [3];

- течение струи расплава турбулентное.

Таблица 1. Свойства UO_2

Т, К	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, Дж/кг·К
273	10960	228
973	10773	310
1873	10380	350
2473	10046	500
3073	9594	620
3098	9000	11650
3123	8857	505
3473	8532	408
4773	7325	216

Таблица 2. Свойства стали

Т, К	Теплоемкость, Дж/кг·К	Вязкость, Па·с
273	450	100000
1073	600	100000
1273	900	98
1573	900	1
1773	500	0,008
2573	500	0,008

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Результаты расчетов приведены в таблице 3 и показаны на рисунке 3 (для случая истечения расплава через отверстие диаметром 0,2 мм) и на рисунке 4 (для случая истечения расплава через отверстие диаметром 2 мм).

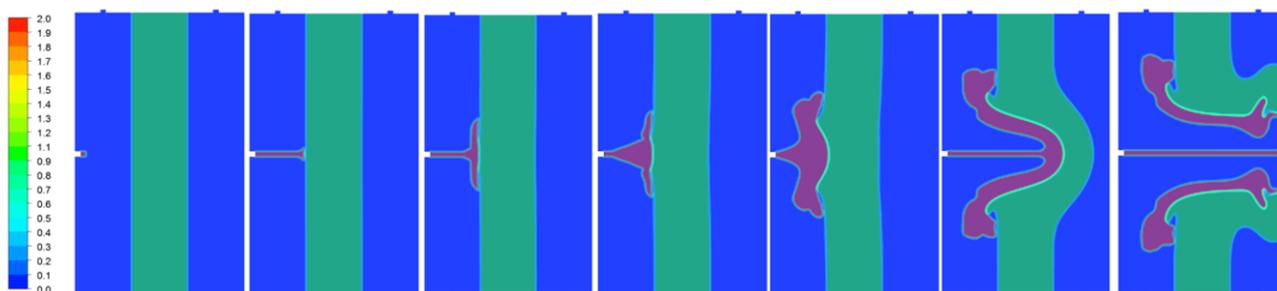
ВЫВОДЫ

Результаты расчетов показывают, что использование модели «квазижидкости» при описании свойств стальной стенки позволяет воспроизвести качественную картину разрушения стальной стенки струей расплава двуокиси урана.

Таблица 3. Результаты моделирования

Параметр	Значение	
	Вариант 1	Вариант 2
Начальный диаметр струи расплава, мм	0,2	2
Средний расход расплава, кг/с	7,82	15,6
Масса расплава, кг	0,0275	0,0873
Средняя скорость расплава, м/с	19,5	19,4
Время до сквозного проплавления стенки, с	0,0035	0,0056
Диаметр образованного в стенке отверстия, мм	2	10

КАРТИНА ТЕЧЕНИЯ СТРУИ РАСПЛАВА



ПОЛЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

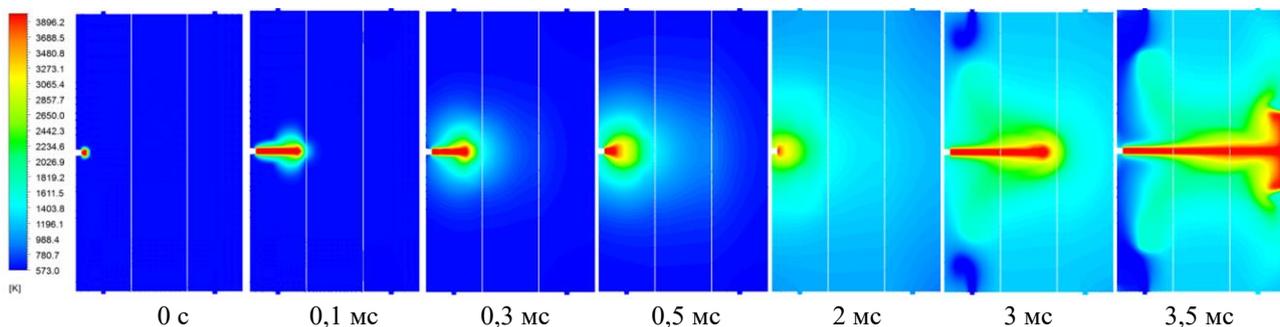


Рисунок 3. Покадровая анимация разрушения стенки при истечении расплава через отверстие диаметром 0,2 мм

КАРТИНА ТЕЧЕНИЯ СТРУИ РАСПЛАВА

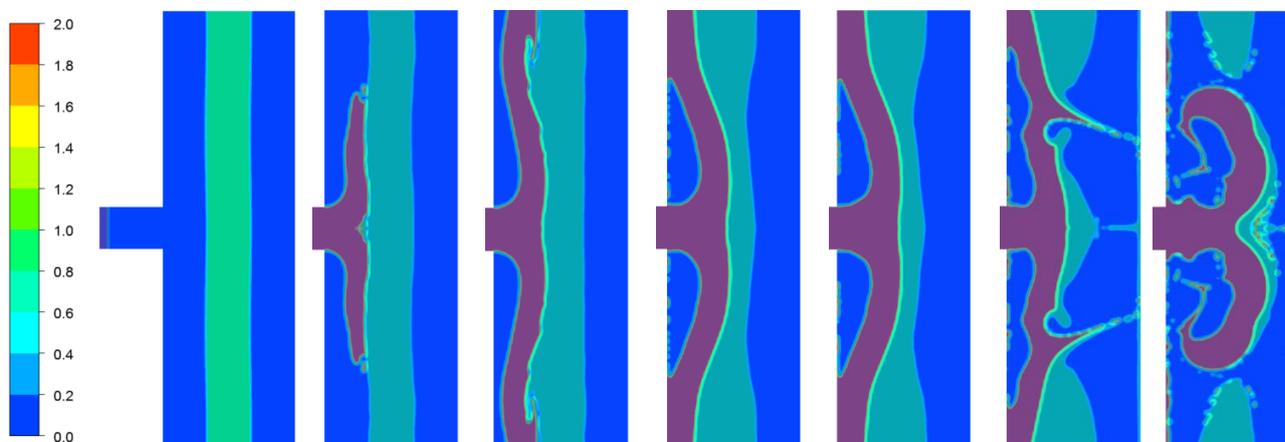


Рисунок 4. Покадровая анимация разрушения стенки при истечении расплава через отверстие диаметром 2 мм

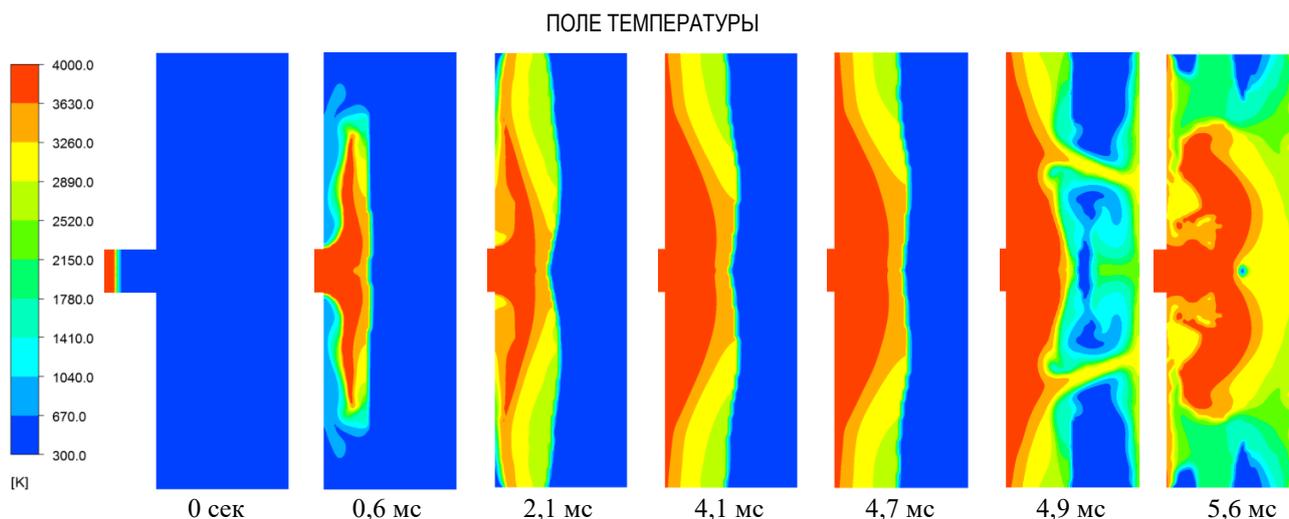


Рисунок 4 (продолжение). Покадровая анимация разрушения стенки при истечении расплава через отверстие диаметром 2 мм

Характерными особенностями моделируемого процесса являются практически мгновенное разрушение стальной стенки и относительно небольшое количество расплава урана, необходимое для того, чтобы в стенке образовалось сквозное отверстие.

Отсутствие экспериментальных данных, характеризующих такие процессы, не позволяет выполнить валидацию предложенной модели расчета, но на основании полученных результатов моделирования

можно сформулировать основные требования к проведению экспериментов, в которых соответствующие данные могут быть получены. В частности, очевидной представляется необходимость использования скоростной видеорегистрации как ключевого средства измерения при экспериментальном изучении процессов взаимодействия струи расплава с металлической стенкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ansys Fluent User's Guide, Release 13.0; Ansys, Inc.; November, 2010.
2. Ansys Fluent Theory Guide, Release 15.0; Ansys, Inc.; November, 2013.
3. Thermophysical properties of materials for nuclear engineering: a tutorial and collection of data / IAEA, Vienna, 2008.

БОЛАТ ҚАБЫРҒАСЫНЫҢ БАЛҚУ АҒЫНЫМЕН БАЙЛАНЫСУЫНЫҢ МОДЕЛІ

А.С. Сураев, Р.А. Иркимбеков, А.Д. Вурим

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Бұл мақалада балқу ағынының және керамикалық ядролық отынның (UO_2) болат қабырғаға тигізер әсерінің зерттеу нәтижелері сипатталады. Перфорациялық ойық (тесік) пен керекті мөлшердегі балқыманың пайда болуына кеткен қажетті уақыт есептелді.

Кілт сөздер: балқу, болат қабырғасының бұзылуы, төтенше жағдайды модельдеу, Ansys Fluent.

MODELING OF THE INTERACTION OF A MELT JET WITH A STEEL WALL

A.S. Surayev, R.A. Irkimbekov, A.D. Vurim

Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The results of modeling the effects of molten steel and ceramic nuclear fuel (uranium dioxide) on the steel wall are presented. The duration of the process until the formation of a through hole in the steel wall and the amount of melt that is necessary for this are estimated.

Keywords: melt, destruction of a steel wall, modeling of an emergency situation, Ansys Fluent.