

УДК 621.039.588

МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЗИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПЛАВА ТОПЛИВА С ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

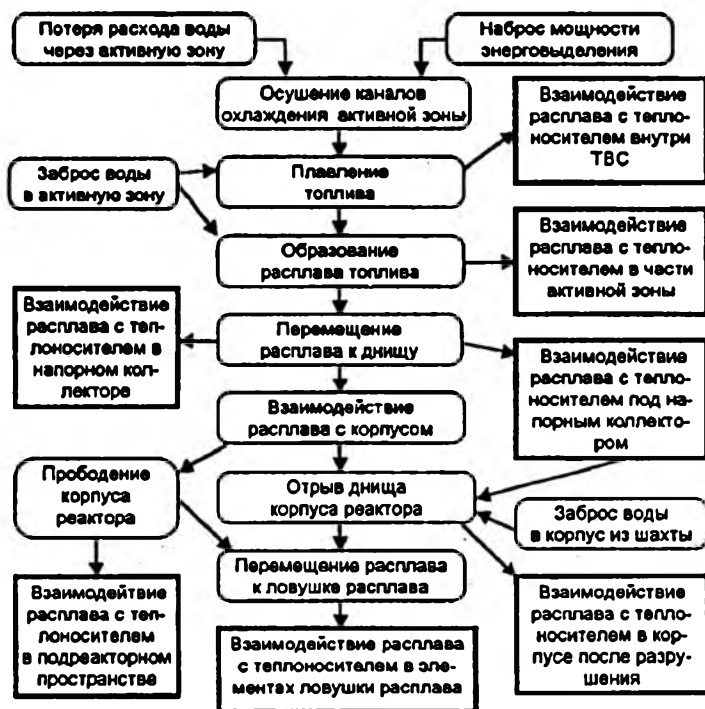
Масагутов Р.Ф., Сорокин А.П., Богатырев И.Л. (ГНЦ РФ — ФЭИ)

Паровой взрыв возникает при повышении давления в сосуде выше предельного уровня, определяемого его прочностью, при относительно медленном и плавном увеличении давления во всем сосуде за счет испарения жидкости или в результате взаимодействия расплавленных материалов с теплоносителем, при которых наблюдается ударный рост давления в определенной зоне, когда это давление не успевает сравниться в свободный объем. Под паровым взрывом чаще всего понимают процесс, при котором расплав (горячая жидкость) будет дробиться на мелкие части и передавать свою внутреннюю энергию перегрева более холодной легко испаряемой жидкости (теплоносителю). При этом происходит взрывное парообразование, обусловленное большой энергией перегрева расплава и резким ростом площади поверхности теплообмена при дроблении расплава. Процесс сопровождается ударным ростом давления в зоне взаимодействия. Расширяющийся пар совершает работу над окружающей средой — жидкостью, прилегающей к зоне взаимодействия, и элементами конструкции.

Расчетно-теоретические модели расчета характеристик парового взрыва основаны на модели термической детонации. Они отличаются степенью детализации структуры потока (например, гомогенный поток или с разделением фаз), описанием процессов теплообмена фрагментов расплава с потоком теплоносителя. Реализация модели термической детонации возможна в различных приближениях: сосредоточенных параметров, одно-, двух- и трехмерном. Реализация модели термической детонации в определенной степени связана с выбором возможного сценария развития тяжелой аварии, геометрическими условиями системы и условиями входа расплава в теплоноситель.

Сценарии развития тяжелой аварии ВВЭР, связанные с взаимодействием расплавленного топлива с теплоносителем. Взаимодействие расплавленного топлива с теплоносителем может быть на различных стадиях развития аварии как внутри корпуса реактора, так и за его пределами в бетонной шахте. Возможный вариант развития событий в условиях реакторной установки типа ВВЭР представлен на рис. 1. Взаимодействие расплава с теплоносителем в крупных масштабах (т.е. представляющих угрозу целостности корпуса реактора) внутри корпуса реактора может произойти при 1) забросе воды на расплав (материалов активной зоны), образовавшийся в результате развития предшествующих событий и находящийся в области активной зоны или ниже ее уровня, и 2) при перемещении (падении) расплава в пространство между напорным коллектором и днищем корпуса при наличии воды в этом пространстве.

Взаимодействие расплава с теплоносителем в меньших масштабах возможно 3) внутри одной или группы ТВС в активной зоне до образования большого бассейна расплава, преимущественно при забросе воды сверху после первоначального осушения этой части активной зоны, а также 4) в процессе перемещения (опускания) расплава к днищу корпуса в трубах напорного коллектора. Последние два события, по всей вероятности, не несут непосредственной угрозы целостности корпуса реактора. Однако в случае разрушения внутрикорпусных устройств они могут способствовать развитию процессов, приводящих к разрушению корпуса реактора в дальнейшем.



Р и с. 1. Взаимодействие расплавленного топлива с теплоносителем на различных стадиях развития тяжелой аварии легководного реактора

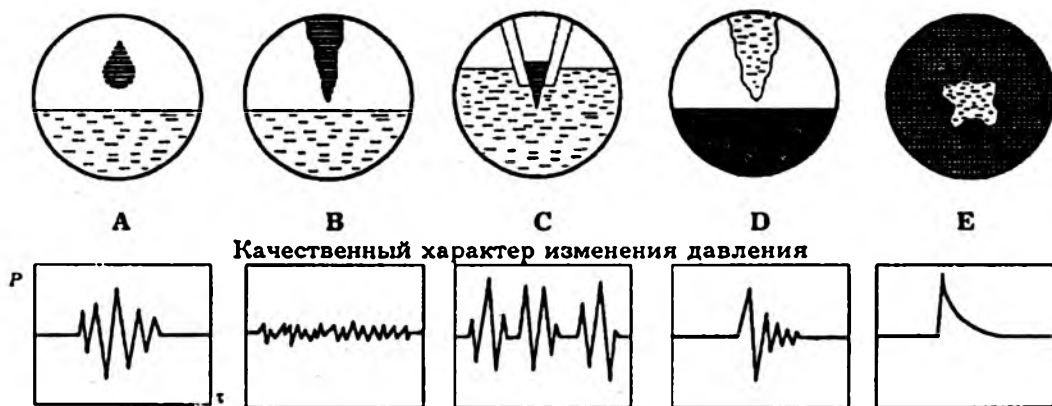
Если меры по локализации аварии внутри корпуса реактора окажутся недостаточными, то вероятны два варианта дальнейшего развития событий, сопровождающихся взаимодействием расплава с теплоносителем в крупных масштабах: 5) прободение корпуса реактора и истечение расплава в подреакторное пространство, заполненное водой (согласно концепции удержания расплава в корпусе реактора, принятой для конкретной установки) и 6) отрыв днища корпуса с последующим забросом воды из шахты реактора на расплав у днища под действием гидростатического давления.

При наличии в бетонной шахте ловушки расплава, охлаждаемой водой (что предусматривается в новых проектах реакторов), взаимодействие расплава с теплоносителем может происходить в элементах конструкции этой ловушки (ситуация 7). Задача конструкторов состоит в том, чтобы такое взаимодействие носило наименьший масштаб, не представляло угрозы целостности защитной оболочки.

Ситуации 1—7 существенно отличаются масштабом и геометрическими условиями взаимодействия, температурными условиями, начальным давлением в системе, составом и фазовым состоянием расплава, соотношением массы, направлением и скоростью движения взаимодействующих сред, компактностью массы движущихся сред, а также уровнем гидростатического давления (при взаимодействии расплава с теплоносителем после разрушения корпуса) и перепадом давления между полостью реактора и бетонной шахтой (после прободения корпуса) и т.д.

Все эти ситуации могут быть представлены следующими моделями (типами или модами контакта, рис. 2): А — падение компактной массы расплава на поверхность теплоносителя; В — истечение струи (множества струй) на поверхность теплоносителя; С — истечение струи расплава под уровень теплоносителя на некоторой глубине; D — падение столба (струи) теплоносителя на поверхность расплава; Е — захват теплоносителя в замкнутый объем, ограниченный расплавом или расплавом и твердыми стенками (ловушка теплоносителя).

Контакты А и Е могут реализоваться, например, при обрушивании массы расплава в воду, находящуюся в пространстве между напорным коллектором и днищем корпуса



Р и с. 2. Типы контактов расплав—вода

реактора при внезапном разрушении корки затвердевшего расплава, блокирующей его перемещение. В зависимости от уровня заполнения бетонной шахты водой могут иметь место контакты В и С с истечением расплава из корпуса реактора при его пробождении. Контакт D характеризует ситуации 1, 3, 6 с забросом воды на поверхность расплава. Контакт E может реализоваться в трубах напорного коллектора (ситуация 4) и элементах конструкции ловушки расплава в бетонной шахте (ситуация 7). Вероятность этого типа контакта возрастает по мере увеличения массы расплава, участвующего во взаимодействии. Контакт E может стать инициатором крупномасштабного парового взрыва.

Представления о составе расплава, вступающего во взаимодействие с водой на различных стадиях развития тяжелой аварии, во многом остаются неопределенными. Расплав — сложная композиция оксидов, металлов и эвтектических образований. Его состав непрерывно меняется в результате активно протекающих физико-химических процессов. К таковым, например, относятся пароциркониевая реакция и другие окислительно-восстановительные процессы, расслоение компонентов топлива и испарение отдельных компонентов расплава при высокой температуре (например, испарение нержавеющей стали из расплава диоксида урана).

В зависимости от состава температура затвердевания расплава может составлять от 1400 до 2800 °С. Эта характеристика является одной из главных, которая определяет интенсивность взаимодействия и возможность парового взрыва.

Другой важной характеристикой, определяющей потенциал разрушения, является удельная энергия перегрева расплава. В зависимости от состава и температуры расплава она составляет от 1 до 4 МДж/кг.

Особо важную роль в иницировании и развитии парового взрыва, а также на стадии предварительного (грубого) перемешивания играет склонность расплава к фрагментации. Во многом она определяется степенью перегрева расплава относительно температуры затвердевания и характеризуется такими свойствами, как плотность, вязкость и коэффициент поверхностного натяжения.

РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРОВОГО ВЗРЫВА НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ РАЗВИТИЯ ТЯЖЕЛОЙ АВАРИИ

Описание физической модели. Разработана нестационарная четырехкомпонентная модель сосредоточенных параметров, описывающая развитие парового взрыва при взаимодействии расплава с теплоносителем. Модель предполагает, что к моменту начала парового взрыва в системе образовалась грубая смесь расплава с теплоносителем ячеистой структуры, удовлетворяющая следующим условиям осуществления крупномасштабного парового взрыва:

смешение расплава с водой достаточно компактно, так что ударная волна, зародившаяся под действием какой-либо причины, вызывает лавинообразное разрушение паровых пленок, окружающих капли расплава, во фронте распространения ударной волны;

капли расплава к моменту прохождения волны давления сохраняют способность к мелкодисперсной фрагментации в миллисекундном диапазоне времени;

смесь представляет собой достаточно распределенную систему, так что воды в окружающем капли расплава пространстве достаточно для интенсивного парообразования;

энергия перегрева расплава достаточна для испарения воды, окружающей капли расплава.

Дополнительно предполагается, что капли расплава, окруженные «своими» пленками пара, равномерно распределены в объеме воды.

Рассматривается четырехкомпонентная смесь: жидкий расплав, его твердые частицы (фрагменты), вода и пар. Пар может находиться не только в пленках, окружающих капли расплава, но и в объеме воды.

В силу неопределенности соотношение объемных долей пара и воды в смеси, характерный размер частиц расплава перед фронтом распространения ударной волны давления и за ним задается параметрически. Инициирование парового взрыва постулируется.

Таким образом, разработанный код позволяет рассчитывать распространение парового взрыва и расширение пара. В модели предполагается, что весь теплоноситель в зоне взрыва участвует во взаимодействии с расплавом; между зоной взаимодействия и окружающей средой отсутствует тепло- и массообмен; частицы расплава топлива имеют одинаковые размеры в стадии грубого перемешивания; фрагментация капель расплава от начального до конечного диаметра происходит во времени по экспоненциальному закону. Постулируется также, что пар, генерируемый при паровом взрыве, остается вокруг частиц расплава, радиационная энергия пара и энергия химических реакций отсутствуют, вода и пар имеют разную температуру, топливо имеет постоянные теплофизические свойства, а истечение смеси из зоны взаимодействия необратимо.

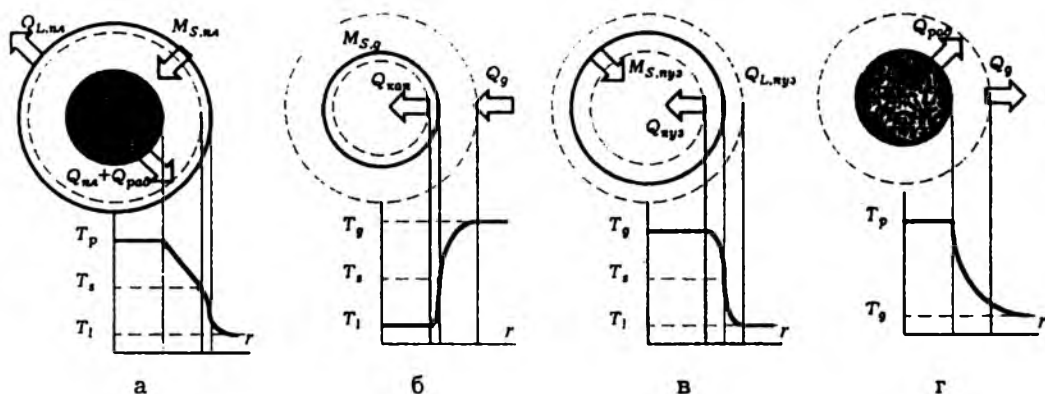
Модель массообмена учитывает изменение массы расплава в результате фрагментации, процесс парообразования на границе раздела пар—жидкость, взаимодействие между расплавом и паром и между твердыми частицами и паром, теплоотдачу от пара к воде. Учитывается теплообмен излучением.

Рассматривается баланс массы и энергии для всех четырех компонентов смеси. Используются дополнительные условия — баланс объемных долей компонентов и для теплообмена на границе раздела пар—жидкость.

Тепломассообмен в среде осуществляется за счет взаимодействия частиц расплава с жидкостью (рис. 3,а) и паром (рис. 3,з), пузырьков пара с жидкостью (рис. 3,в) и капель жидкости в паре (рис. 3,б). На рисунке показаны тепловые потоки Q и массообмен M взаимодействующих сред, а также профили температуры, где T_p , T_g , T_l , T_s — температура частиц расплава, пара, жидкости и границы раздела фаз соответственно.

Количество генерируемого (конденсируемого) пара, определяющего темп роста (спада) давления в системе, находится по формуле $M_s = M_{s,пл} + M_{s,пуз} + M_{s,g}$, где $M_{s,пл}$, $M_{s,пуз}$, $M_{s,g}$ — частица с жидкостью и паром, пузырек в контакте с жидкостью, капля в паре соответственно.

При этом основной вклад в парообразование вносит первый член, который определяется как $M_{s,пл} = (Q_{пл} + \alpha Q_{рад} - Q_{L,пл})/r$, где $Q_{пл}$ — поток тепла от частицы в пленку пара; $Q_{рад}$ — радиационный поток; $Q_{L,пл}$ — поток от границы раздела фаз в жидкость; α — доля излучения, падающая на поверхность раздела фаз; r — теплота парообразования.



Р и с. 3. Схематическое изображение процессов тепломассообмена при различных типах взаимодействия в многокомпонентной среде

Исходные данные для расчета. Согласно принятой модели для расчета характеристик взрыва на различных стадиях развития аварии должны быть определены следующие параметры: геометрические размеры зоны взаимодействия (например, диаметр и высота канала, заполненного водой, в котором происходит взаимодействие расплава с теплоносителем); масса расплава, участвующего во взаимодействии; начальная температура расплава; начальное давление и начальное объемное паросодержание в зоне взаимодействия, а также размеры капель расплава в смеси перед фронтом распространения ударной волны; размеры частиц расплава за фронтом распространения ударной волны и скорость распространения последней.

Для любой ситуации при взаимодействии расплава с теплоносителем наибольшая неопределенность касается истинного объемного паросодержания. В расчетах она задается параметрически, а при консервативном подходе определяется по результирующему максимуму интенсивности взаимодействия.

Размеры капель расплава в грубой смеси и конечные размеры частиц расплава за фронтом распространения ударной волны так же, как и скорость ее распространения, в расчетах задаются на основе обобщения результатов экспериментов. Из-за значительного разброса экспериментальных данных значения этих параметров также задаются параметрически.

В разработанной к настоящему времени версии расчетного кода принимается, что размеры капель в смеси одинаковы, как и одинаковы конечные размеры частиц (фрагментов) за фронтом ударной волны. На самом деле имеет место распределение частиц по размеру. Вместе с тем это упрощение не должно влиять на результат расчета, поскольку полная поверхность теплообмена, задаваемая в расчетах, принимается равной полной поверхности теплообмена капель (фрагментов), участвующей в процессе.

При взаимодействии расплава с теплоносителем внутри корпуса реактора до его разрушения начальное давление в зоне взаимодействия определяется действиями по управлению работой реакторной установки (например, сброс давления) и может меняться в широких пределах. После разрушения корпуса реактора начальное давление можно считать равным 0,1 МПа.

Поскольку максимуму интенсивности взаимодействия соответствует максимальная степень перегрева расплава, при консервативном подходе в расчетах задается максимально возможная температура расплава в рассматриваемых ситуациях. По-видимому, предельное значение этой температуры 3400—3500 °С, выше этой температуры топливо должно испариться.

Масса расплава, участвующая в паровом взрыве, очевидно, существенно отличается для каждой ситуации и должна задаваться на основе анализа сценария развития аварии. Так, при оценке характеристик парового взрыва внутри отдельной ТВС массу

расплава, участвующего во взаимодействии, можно принять равной массе топлива в этой ТВС. Если в той или иной ситуации имеет место избыток воды, то при расчетах задается масса расплава, а масса воды, участвующая во взаимодействии, определяется в соответствии с соотношением массы расплав/вода, характерным для максимума интенсивности взаимодействия. При недостатке воды ее масса в расчетах задается, а масса расплава, участвующего во взаимодействии, определяется из указанного соотношения массы.

При взаимодействии расплава с теплоносителем в случае прободения корпуса и истечения расплава в шахту реактора, заполненную водой, его масса, участвующая в паровом взрыве, определяется по расходу в струе, характерному времени истечения до начала парового взрыва, времени охлаждения до затвердевания и уровню заполнения водой шахты реактора. Последнее определяет тип контакта расплава с водой и условия стравливания давления из зоны взаимодействия.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ПАРОВОГО ВЗРЫВА ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ РАСПЛАВА С ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Разработанная версия расчетного кода была использована для определения характеристик парового взрыва при крупномасштабном взаимодействии расплава с теплоносителем внутри корпуса реактора, в подреакторном пространстве и внутри трубных элементов конструкции водоохлаждаемой ловушки.

Взаимодействие в ловушке расплава. Поскольку последним барьером на пути распространения радиации в окружающую среду является защитная оболочка, в первую очередь рассматривалось взаимодействие расплава с теплоносителем за пределами корпуса реактора.

Приведем результаты применения разработанной версии расчетного кода для определения характеристик взаимодействия расплава с теплоносителем внутри трубных элементов конструкции ловушки.

Параметры, использованные при моделировании парового взрыва в ловушке бетонной шахты реактора (одиночная труба), следующие:

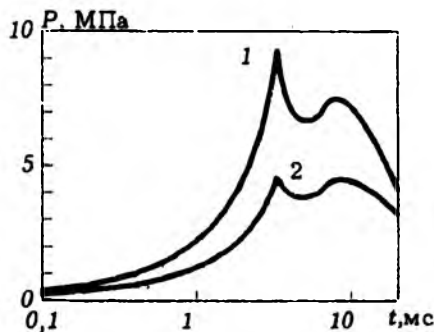
Канал:	
диаметр, мм	10
длина, мм	1000
Топливо:	
диаметр частиц нефрагментированного топлива, мм	10
диаметр фрагмента в конце процесса, мм	1
первоначальная масса топлива, кг	20
масса фрагментированного топлива, кг	20
температура, °C	
вариант 1	2500
вариант 2	1700
плотность, кг/м ³	7960
теплоемкость, Дж/(кг·K)	545
теплопроводность, Вт/(м·K)	20,5
Скорость распространения волны возмущения, м/с	300
Время фрагментации, мс	3,3
Начальное давление в системе, МПа	0,1
Начальное объемное паросодержание	0,1
Расчетный шаг по времени, мкс	0,5

Рис. 4 иллюстрирует динамику давления смеси в трубке ловушки для двух возможных уровней температуры. Наблюдается рост давления по мере того, как волна возмущения,двигающаяся со скоростью звука в данной смеси (в нашем случае 300 м/с), вовлекает в процесс фрагментации капли расплава, находящиеся в стадии «грубого» перемешивания. Пиковое давление системы при начальной температуре расплава 2500 °C составляет 9,3 МПа (при 1700 °C 4,6 МПа). После того как волна до-

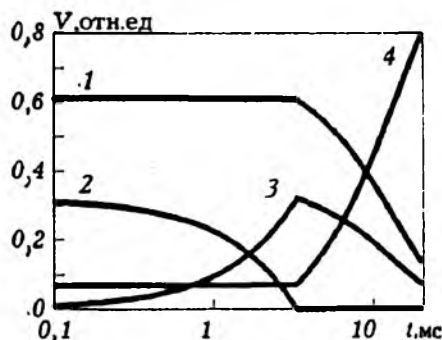
стигает свободной поверхности (3,3 мс), начинается фаза истечения смеси из трубки в свободное подреакторное пространство. Изменение объемных долей компонентов смеси показано на рис. 5. Доля частиц расплава (как фрагментов, так и нефрагментированных частиц), составляющая 0,32 объема канала, снижается за 20 мс до 0,07. Такая же картина и с жидкой фазой: истечение смеси и взрывное парообразование приводят к снижению объемной доли воды с 0,61 до 0,14. Иной процесс происходит с паровой фазой. Пар начинает расширяться и занимать освободившееся пространство (рост объемной доли с 0,07 до 0,79).

Помимо первого пика давления есть и второй, более продолжительный импульс давления. Это связано с тем, что процесс фрагментации не заканчивается сразу после прохождения ударной волны. На момент времени, когда ударная волна достигает свободной поверхности, полная фрагментация расплава происходит только в самом начале канала, где расплав получил первоначальный импульс возмущения. При этом по всей длине канала расплав находится в разной стадии фрагментации и продолжает фрагментироваться и после начала истечения. В конечном счете пиковое значение и темп роста давления зависит от площади поверхности частиц расплава, которая, несмотря на унос фрагментов, продолжает повышаться. Так, через 3,3 мс площадь поверхности составляет $6,1 \text{ м}^2$, через 6,7 мс (когда происходит полная фрагментация) — 12 и $12,8 \text{ м}^2$ для температуры расплава 2500 и 1700 °C соответственно. После 6,7 мс площадь поверхности начинает убывать, по мере того как частицы расплава уносятся из зоны взаимодействия. Подобное изменение характерно и для теплового потока от частиц расплава к пару, который напрямую зависит от площади поверхности контакта расплав—пар. Так, максимальная мощность теплового потока достигается через 6,7 мс и составляет 66,7 и 44,1 МВт для температуры расплава 2500 и 1700 °C соответственно. Общее количество тепла, отдаваемое расплавом за 20 мс взаимодействия, составляет 0,737 и 0,528 МДж соответственно или 2,82 и 3,03% общей запасенной энергии в расплаве (26,16 и 17,44 МДж соответственно).

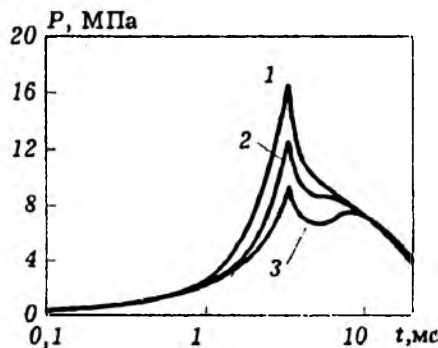
Из анализа рис. 6 следует, что с уменьшением времени фрагментации с 3,3 до 1 мс второй пик давления вырождается и расплав успевает передать его запасенную энергию в формирование первого пика давления. Чем выше паросодержание, тем меньше пиковое давление в ударной волне. Расчетные исследования показали, что предпочтительным является меньший диаметр ($\sim 0,1 \text{ м}$) труб, так как при этом в единовременном акте парового взрыва участвует меньшая масса расплава и выше паросодержание. Быстрому затвердеванию расплава способствуют стенки труб, охлаждаемых снаружи водой.



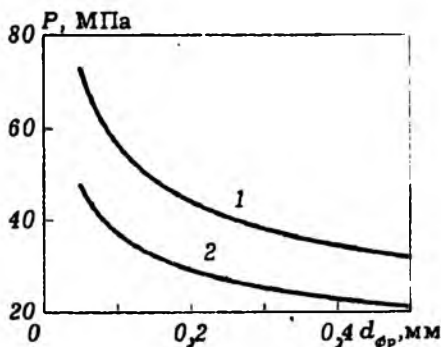
Р и с. 4. Изменение давления в трубке ловушки расплава при температуре топлива 2500 (1), 1700 °C (2)



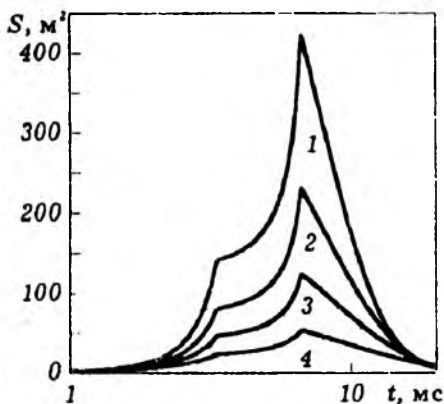
Р и с. 5. Изменение объемных долей компонентов смеси: 1 — вода; 2 — капли расплава; 3 — фрагменты; 4 — пар



Р и с. 6. Зависимость изменения давления в системе от времени фрагментации 1 (1), 2 (2), 3,3 мс (3)



Р и с. 7. Зависимость максимального давления от размера фрагментов и начальной температуры расплава 3500 (1), 2500 °С (2)



Р и с. 8. Изменение площади поверхности теплообмена фрагментов: 1—4 — $d_{\text{фр}} = 0,5; 0,1; 0,2; 0,5$ мм соответственно

Данная концепция ловушки в бетонной шахте реактора и тракта стравливания избыточного давления позволит обеспечить эффективное охлаждение расплава до полного его затвердевания. Несмотря на то, что в отдельных трубах паровые взрывы возможны и, по всей вероятности, будут происходить, они не представят серьезной опасности для бетонной шахты реактора, самого корпуса и других конструкций.

Взаимодействие внутри корпуса реактора рассматривалось для цилиндрической области диаметром 0,15 м, которая заполнена однородной смесью (сферические капли расплава общей массой 50 кг, окруженные паровыми пленками, равномерно распределены в объеме воды). Температура расплава предполагалась равной 3500 и 2500 °С. Конечный диаметр фрагментов варьировался в диапазоне от 0,05 до 0,5 мм.

На рис. 7 показана зависимость пикового давления от температуры и конечных размеров фрагментов. Изменение площади поверхности теплообмена расплава с водой, напрямую зависящей от размера фрагментов, показано на рис. 8. Опережение в темпе роста поверхности теплообмена за счет фрагментации над ее уменьшением в результате истечения смеси из зоны взаимодействия обуславливает наличие второго более продолжительного пика давления (через 7,5 мс после начала парового взрыва), как и в случае подобного процесса в ловушке расплава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенная методика позволяет проводить расчетные оценки интенсивности парового взрыва внутри корпуса реактора и в подреакторном пространстве внутри ловушки расплава. Расчетные исследования интенсивности парового взрыва внутри корпуса ВВЭР при наиболее вероятном сценарии развития тяжелой аварии с истечением расплава в нижнюю напорную камеру указывают на возможность реализации при определенных условиях высокого давления, способного привести к разрушению отдельных элементов конструкции.

Наибольшее влияние на интенсивность парового взрыва оказывают масса взаимодействующего расплава, начальная температура, время фрагментации и конечный размер фрагментов, а также реализуемый тип контакта. Локальные паровые взрывы в трубах ловушки расплава имеют относительно невысокую интенсивность и не могут существенно влиять на конструкции в подреакторном пространстве и защитной оболочке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Масагутов Р.Ф., Козлов Ф.А., Загорюлько Ю.И. и др. Анализ результатов исследований взаимодействия расплавленных материалов — имитаторов топлива с водой на экспериментальных стендах. Отчет ФЭИ, инв. № 8391, 1992.
2. Kozlov F.A., Zagorulko Yu.I., Masagutov R.F. Investigation of molten fuel/coolant interaction dynamic on the simulation systems melt/coolant. -- In: 7-th Intern. Conf. Nucl. React. Therm.-Hydr. Saratoga Springs, USA, 1995.