***П.С. Климов, асп.; рук. О.И. Мелихов, д. ф.-м. н., проф.***

***(НИУ «МЭИ», г. Москва)***

**АНАЛИЗ ФРАГМЕНТАЦИИ КАПЕЛЬ КОРИУМА В НАТРИИ**

Одной из главных задач, стоящих перед атомной отраслью на ближайший период, является обеспечение высокого уровня безопасности и надежности АЭС. В соответствии с нормативными документами оценка безопасности действующей атомной станции должна содержать анализ запроектных аварий.

Одним из наиболее опасных видов запроектной аварии является тяжелая авария, приводящая к разрушению активной зоны реактора. Существенное место в анализах тяжелых аварий на АЭС занимает рассмотрение термического взаимодействия высокотемпературного расплава материалов активной зоны (кориум) с охладителем (натрием), которое может протекать как относительно медленно (характерные временные масштабы – секунды или минуты), когда происходит медленное остывание расплава вследствие теплоотдачи по механизму пленочного кипения, так и взрывным образом, так называемый паровой взрыв, (характерные времена – миллисекунды), приводя к росту давления до сотен и тысяч атмосфер.

В отличие от проектных аварий, сценарий развития запроектных тяжелых аварий заранее не определен. Проведение крупномасштабных экспериментов, соответствующих сценарию протекания тяжелой аварии с плавлением активной зоны промышленных ЯЭУ, представляется невозможным в силу ядерной и радиационной опасности, а также низкой экономической эффективности. Математическое моделирование является альтернативным инструментом изучения физических процессов, позволяющим, при достаточной адекватности математических моделей, проводить различные численные имитации возникновения и развития вероятностных тяжелых аварий на ЯЭУ.

В настоящей работе методом математического моделирования исследуется процесс фрагментации капель кориума в натрии, который является одним из ключевых при термическом взаимодействии этих сред. Используется бессеточный полунеявный численный метод MPS (Moving Particle Semi-implicit), эффективный при анализе течений со свободными поверхностями [1, 2].

Процесс фрагментации капли расплавленного кориума в натрии при ее импульсном ускорении рассматривался в области представляющей собой квадрат, сторона которого в пять раз превосходила начальный диаметр капли кориума. На всех четырех границах расчетной области задавались условия скольжения жидкости. Использовалось около 10 000 жидких частиц для моделирования исследуемого процесса. В начальный момент капле жидкого кориума сообщалась некоторая скорость U0, направленная в сторону левой границы, и моделировалась дальнейшая эволюция капли.

В расчетах были использованы следующие значения свойств натрия и кориума: начальный диаметр капли 0.009 м, плотность 9000 кг/м3, вязкость 2.82\*10-4 Па\*с, поверхностное натяжение 0.4 Н/м; плотность натрия 840 кг/м3.

Были выполнены три расчета, соответствующие числам Вебера (We) 12, 13, 15. В таблице 1 приведены параметры, с которыми выполнялись эти расчеты.

**Таблица 1 Параметры расчетов**

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| №  | d0 (мм) | U0  | ε=ρc/ρd | We |
| 1 | 9 | 0.730 | 1/9.2 | 12 |
| 2 | 9 | 0.760 | 1/9.2 | 13 |
| 3 | 9 | 0.816 | 1/9.2 | 15 |

На Рис. 1, 2 и 3 показаны формы деформирующейся капли в конечный момент времени рассмотрения деформации при различных числах Вебера, равных 12, 13 и 15..



Рис. 1 Форма деформирующейся капли в конечный момент времени (0.1586 с), We=13.



Рис. 2 Форма деформирующейся капли в конечный момент времени (0.110 с), We=13.



Рис. 3 Форма деформирующейся капли в конечный момент времени (0.100 с), We=15.

Проанализировав результаты исследования, был сделан вывод, что эволюция капли происходит в две стадии. Во время первой стадии капля подвергается растяжению в поперечном направлении. На второй стадии капля фрагментирует, когда число Вебера становится больше критического (в нашем случае это значение равно 13). Картина после распада материнской капли зависит от числа Вебера. Количество образующихся фрагментов растет с увеличением числа Вебера. Подробнее остановимся на каждой стадии эволюции капли.

Первая стадия эволюции капли – деформация капли. Когда капля импульсно ускоряется в окружающей ее жидкости, ее форма зависит от распределения давления по поверхности капли. В условиях равновесия внутреннее давление в любой точке на поверхности капли уравновешивает внешнее гидродинамическое давление и силу поверхностного натяжения. Однако распределение давления по поверхности капли не симметрично в передней и задней части капли относительно потока из-за образования кильватерного следа за тыловой частью капли, точно также как и в случае равномерного обтекания потоком. Скорость омывающей жидкости имеет максимальное значение на экваториальной линии капли и равна нулю в точке торможения жидкости на фронтовом полюсе капли. Поэтому, жидкость капли ближе к экватору двигается быстрее относительно потока, чем центральная часть, формируя вогнутый профиль по направлению потока.

В соответствии с законом Бернулли давление выше на полюсах капли и ниже на ее экваторе. Такое распределение давления по поверхности капли заставляет ее деформироваться, менять форму с правильной сферической, сплющиваться в форму эллипса, направленного по нормали к потоку омывающей жидкости. Деформация капли увеличивает сопротивление капли потоку. Это снижает гидродинамические колебания давления между передней и задней частью капли, и начинает усиливаться влияние силы поверхностного натяжения. Достигнет ли капля равновесной формы, зависит от отношения между гидродинамическим давлением и силами поверхностного напряжения. До того, как равновесие будет разрушено, капля будет продолжать деформироваться без дробления. До тех пор пока гидродинамическое давление не превысит силы поверхностного натяжения, капля будет сохранять свою изначальную круглую форму для числа Вебера We=12, для того, чтобы капля начала дробиться, число Вебера, как показали приведенные расчеты, должно быть не меньше 13.

Вторая стадия эволюции капли – ее дробление. На втором этапе поведение капли зависит от величины числа Вебера. Для We=13 капля продолжает сплющиваться и вытягиваться по нормали к потоку набегающей жидкости. В момент времени t=0.08 секунды точка дробления появляется возле центра капли и капля дробится на две части примерно одного размера в момент времени t=0.094 секунды. С теоретической точки зрения, появление этой точки дробления вызвано ростом волн на поверхности сплющенной капли (неустойчивость Кельвина-Гельмгольца и Рэлея-Тэйлора). Капля в итоге делится на две примерно равные части. Таким образом, можем сделать вывод, что критическое значение числа Вебера для капли диоксида урана, испытывающей импульсное ускорение в натрии равно 13. Для We=15 появляется несколько точек дробления, которые равномерно распределены по поверхности капли и происходит ее деление на примерно шесть равных по размеру частей. В соответствие с зависимостью критической длины волны от числа Вебера, определенного из теории неустойчивости, большее значение числа Вебера соответствует меньшему значению критической длины волны. По этой причине при числе Вебера равном 15 формируется больше точек дробления. В заключении можно сказать, что рост волн на поверхности капли вследствие развития неустойчивости является главным механизмом дробления капли на втором этапе и именно оно определяет количество капель после дробления.

**Библиографический список**

1. **Koshizuka S., Oka Y.**, Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible ﬂuid. Nucl.Sci. Eng. 123, 421–434., 1996.
2. **Koshizuka S., Oka Y.**, Development of a particle method for calculating fragmentation of incompressible viscous ﬂuid. Proc. US:Japan Joint Seminar: A Multidisci-plinary Int. Seminar on Intense Multiphase Interactions, Santa Barbara, CA, pp. 145–158., 1995.