

РАЗРАБОТКА МОДЕЛЕЙ ВНЕДРЕНИЯ СТРУЙ РАСПЛАВА В ОХЛАДИТЕЛЬ И МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ ИХ ТОЧНОСТИ

Актуальность проблемы

Проблема внедрения струй расплава в бассейн охладителя актуальна как с точки зрения развития теории струй, так и в прикладном аспекте. Например, в пассивных системах защиты от тяжелых аварий на АЭС может рассматриваться конструкция с бассейном воды в подреакторном пространстве [1-5]. Назначение бассейна – улавливание струи расплава кориума и его удержание в контролируемом состоянии. Для этого необходимо решить задачу внедрения струи, ее распада на капли, застывания капель в частицы и охлаждения частиц. Поэтому задача моделирования внедрения струй расплава в охладитель актуальна. Сложность ее в том, что физические свойства мало изучены и их диапазоны довольно широкие, к тому же необходимо учитывать взаимное влияние разных свойств и факторов.

Например, отношение плотностей струи и окружающей жидкости установлено как важный параметр, влияющий на закономерности распада струй. Так, формула Тейлора

$$L/d = C_b (\rho_l / \rho_g)^{1/2} \quad (1)$$

где C_b - эмпирический параметр;

ρ_l / ρ_g - отношение плотностей жидкой струи и окружающего газа, выражает длину

нераспавшейся части струи через корень квадратный из отношения плотностей. При малых числах Вебера ($We_a < 100$) аналогичные зависимости были получены на основе анализа неустойчивости Кельвина-Гельмгольца. Для малых отношений плотности участок нераспавшейся части короткий и его длину не удается однозначно идентифицировать по одной только зависимости от чисел Вебера. Существенными являются и другие параметры. В формуле (1) коэффициент $C_b = 5$ для диапазона чисел Вебера $We < 400$, а для $We = 100 \dots 10000$ наилучшее соответствие получается при $C_b = 2,1$ с коэффициентом стандартного отклонения C_b , равным 0,2 в диапазоне $We = 670 \dots 13700$.

При падении струй из сопла над поверхностью охладителя значительное количество воздуха вовлекается в слой струйного смешения, что затрудняет визуализацию. Однако и в этом случае существенной разницы в поведении струй в слое охладителя и длине нераспавшейся части струй не было обнаружено [6]. Схема процесса показана на рис. 1 [7].

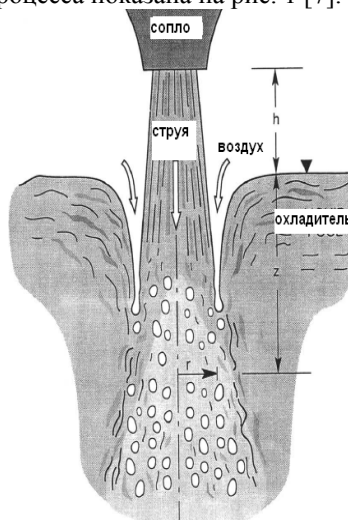


Рис. 1. Схема вовлечения пузырьков воздуха струей в бассейн

Во многих случаях вовлечение пузырьков воздуха из окружающей среды является важным для протекающих процессов: распространение струи в охладителе и ее распад на капли, смешение расплава с охладителем, тепломассообмен, распад образующихся капель расплава и их затвердевание при застывании. Поэтому эта проблема исследуется рядом ученых [8-10].

2 Распространение высокотемпературных струй расплава в охладителе

Высокотемпературный эксперимент со струями диаметром 6,3; 15 и 25 мм при начальной температуре расплава 550К и воде при температуре насыщения показал [6]: вначале область кипения вокруг струи тонкая, но вскоре кипение полностью меняет всю картину, выбрасывая часть воды и расплава за счет бурного парообразования в слое (размер бассейна был слишком мал для интенсивного кипения – всего 250x250 мм). В таблицах 1-3 приведены сведения об основных моделях струй, проникающих в бассейн.

Таблица 1

Анализ двухслойных симметричных моделей распада струй

Авторы, ссылки	ρ_a	μ_j	μ_a	$V_a(r)$	(r,z)
Левич В.Г. [11]		+			+
Чу, THIRMAL [12]	+				
Бюргер, IKE [13]	+		+	+	
Бергуд, CENG-1 [14, 15]	+		+	+	
Буй и Динх, RIT-1 [16, 17]	+	+	+		+

Учет соответствующего фактора отмечен знаком плюс.

Таблица 1 содержит результаты анализа двухслойных симметричных ($m=0$ – нулевая мода) моделей распада струй, где $V_a(r)$ - профиль скорости жидкости в бассейне, (r,z) - цилиндрическая система координат. Модель Королевского технологического института (RIT-1) – обобщение модели Левича, она сходится к модели Левича в предельном случае, когда $\rho_a \rightarrow 0$, $\mu_a \rightarrow 0$. Эта модель позволяет исследовать влияние вязкости струи и плотности охладителя, а также проверить справедливость сделанных Левичем упрощений.

Таблица 2

Анализ двухслойных асимметричных моделей распада струй

Авторы, ссылки	ρ_a	μ_j	μ_a	(r,z)
Левич В.Г., Levich-2 [11]		+		+
Янг [18]	+			+
Бергуд, CENG-2 [19, 20]	+			+
Буй и Динх, RIT-2 [16, 17]	+	+		+

Таблица 2 содержит результаты анализа двухслойных асимметричных ($m>0$ – высшие моды) моделей распада струй. Модель RIT-2 является обобщенной формулировкой решения Левича Levich-2, а RIT-3 расширяет решение EREC для высших мод неустойчивости.

Таблица 3

Анализ трехслойных моделей распада струй

Авторы, ссылки	ρ_a	μ_j	μ_a	(r,z)
Эпштейн и Фауске, FAI [21]		+		+
Бергуд, CENG-3 [19, 20]	+			+
Мелиховы, EREC [22]	+			+
Буй и Динх, RIT-3 [16, 17]	+	+		+

Установлено, что в случае большого отношения плотностей ρ_j/ρ_c и больших относительных скоростей движения струи в охладителе, устойчивость струи в основном определяется неустойчивыми коротковолновыми модами возмущений (на свободной капиллярной струе в воздухе преобладает длинноволновая неустойчивость). Чем выше скорости, тем короче наиболее неустойчивые волны (для струи воды в воздухе максимальная длина неустойчивых волн $\alpha_{\max} \approx 2$ мм при скорости 20 м/с, и $\alpha_{\max} \approx 0,3$ мм при скорости 40 м/с). В коротковолновой области поверхностные силы имеют наибольшее влияние как на скорость роста возмущений, так и на длину наиболее неустойчивых волн: чем выше коэффициент поверхностного натяжения σ , тем длиннее волны и ниже скорость роста волн.

Вязкость струи снижает скорость роста возмущений γ вследствие диссипации энергии возмущений и сдвигает наиболее быстро растущие волны в сторону больших длин. Так, для водяной струи в воздухе ($D_j=15$ мм, $U_j=40$ м/с) получается, что увеличение вязкости струи в 10 и 100 раз может снизить скорость роста возмущений в 1,3 и 4 раза, соответственно. Отсюда видно также, что изменение вязкости на порядки изменяет скорость роста возмущений в разы, т.е. вязкость играет не первостепенную роль в распаде струи.

Струи тяжелого расплава, характерные для корнума ($\rho_j > 8000$ кг/м³), обычно устойчивы примерно до значений относительных скоростей $U_{rel} = U_j - U_v > 20$ м/с. Для струй малого диаметра неустойчивость определяется симметричной модой, а для струй большого диаметра ($D_j > 20$ мм) одна из несимметричных мод может определять длину наиболее быстро растущих возмущений. Например, мода 4 для струи воды в воздухе и мода 2 для струи церробенда в паре (рис. 2) значительно выделяются [6]:

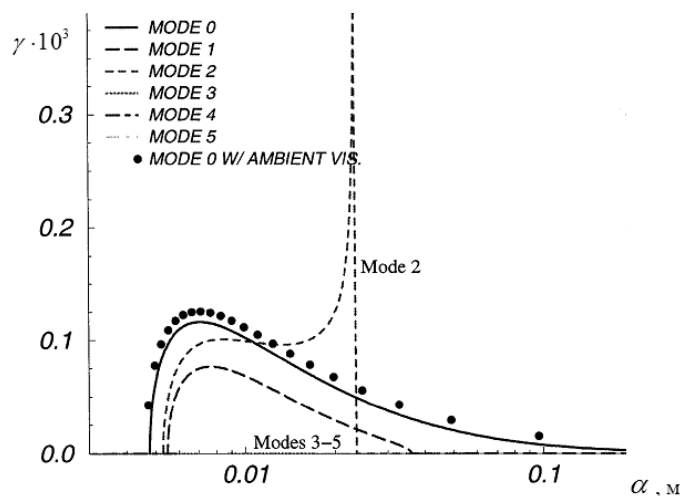


Рис. 2. Скорость роста возмущений струи в зависимости от длины волны

С увеличением относительных скоростей U_{rel} разница между симметричными и асимметричными модами исчезает. Увеличение диаметра струй также стирает эту разницу. Уже при $D_j > 25$ мм она незаметна. Максимальный инкремент нарастания волн γ_{max} чувствителен к скорости струи U_j . Например, струи церробенда ($D_j=25$ мм) при $U_j = 3$ м/с и 4 м/с имеют, соответственно, $\gamma_{max} = 6750$ с⁻¹ и 16500 с⁻¹. Более короткие волны опаснее для высокоскоростных струй: $\alpha_{max} = 0,6$ и 0,25 для первого и второго случаев, соответственно.

Потенциальное влияние затвердевания струи было исследовано путем резкого увеличения вязкости (в 50 раз, церробенд). В коротковолновом диапазоне такой рост вязкости снизил инкремент нарастания возмущений струи примерно на 30%. Неустойчивость коротких волн и их быстрый рост ведут к распылу струй, как отчетливо наблюдали в опытах при высоких числах Вебера (например, в КТН [6]).

3 Модели взаимодействия струй с охладителем

Прототипные условия тяжелых аварий в ядерных реакторах и методы подбора, позволяющие моделировать взаимодействие струй с охладителем, имеют важнейшее значение для оценки безопасности реакторов и построения систем пассивной защиты от аварий. Линейная теория неустойчивости применяется также для предсказания распада струй расплава в воде и в паре. Установлено, что струи корнума большого диаметра имеют свойства неустойчивости, подобные вышерассмотренным струям церробенда с максимально быстрым нарастанием коротковолновых возмущений (для струй в воде и паре).

Вычисленный инкремент нарастания возмущений струи корнума в паре значительно ниже (на два порядка), чем струи корнума в воде. Для относительной скорости между струей и выходящим навстречу паром $U_{rel} = 40$ м/с асимметричная мода нарастает максимально быстро. При $U_{rel} = 100$ м/с все неустойчивые возмущения струи (симметричные и асимметричные) равнозначны. Для

струи расплава в воде все волновые моды совпадают, и максимальный инкремент нарастания увеличивается в 9 раз при увеличении скорости струи вдвое. Область неустойчивых волн смещается в сторону более коротких (1...10 мм) при взаимодействии струй расплава с паром и до 0,01...0,1 мм при взаимодействии с водой.

В модельных экспериментах скорость струи и диаметр меньше, чем в расплаве кориума в прототипных условиях взаимодействия расплава ядерного топлива с охладителем. Поэтому важно сравнить параметры неустойчивости струй для этих двух случаев. Различие между расплавами кориума и церробенда минимально по плотности (20%), но велико по коэффициентам поверхностного натяжения ($\sigma_{ar}/\sigma_{br} \approx 3$) и кинематической вязкости ($\nu_{ar}/\nu_{br} \approx 3$). Влияние вязкости струи сравнительно невелико, но поверхностного натяжения существенно.

Меньший коэффициент поверхностного натяжения церробенда приводит к смещению наиболее неустойчивых волн (α_{max}) в область более коротких волн и к увеличению инкремента нарастания волн. Характеристики неустойчивости струй очень чувствительны к относительным скоростям U_{rel} (числам Вебера $We \sim U_{rel}^2$). Несмотря на количественное различие, неустойчивости струй церробенда и кориума (в воде и паре) похожи.

Анализ неустойчивости струи в двухфазной среде – сложная задача многофазной динамики, решение которой требует значительных усилий, начиная с разработки математической модели. Однако можно приближенно оценить явление, применяя эффективную (гомогенизированную) плотность охладителя ρ_{mix} [6]. Характеристики неустойчивости струи расплава кориума и расплава церробенда в двухфазной среде с объемным содержанием пара 0,5 и 0,9 показали, что легкая (паровая) фаза по-разному влияет на прототипную струю кориума и модельную струю расплава. Для кориума предсказывается доминирование симметричной моды и совпадение разных мод во всех рассчитанных случаях, а для струи церробенда (для малых скоростей и диаметров) мода 4 доминирует при паросодержании 0,9. Значит, когда прототипная струя должна расплыться, струя модельного расплава может распасться на капли под действием асимметричной моды 4.

Таким образом, линейная теория неустойчивости струй очень полезна для оценок рассматриваемых явлений, поскольку позволяет установить основные особенности распада струй. Однако детальное описание процесса каплеобразования после распада струй и дальнейшего поведения капель вплоть до их затвердевания после охлаждения в окружающей жидкой или двухфазной среде требует более основательных исследований на основе решения полных уравнений гидродинамики и теплообмена многофазных сред с применением вычислительных методов и компьютерного моделирования [3, 6, 23-36].

Буй с сотрудниками [34-36] для численного решения этих задач успешно применили комбинацию новейших численных методов: прогрессивный трехмерный алгоритм вычисления деформируемых поверхностей раздела многофазной системы [37, 38] и метод псевдочастиц с кубической интерполяцией [39]. Методы реализованы для трехмерных задач в декартовых координатах (компьютерный код SIPHRA-3D, Simulation of Interfacial Phenomena in Hypothetical Reactor Accidents). Проведены вычислительные эксперименты по взаимодействию расплава кориума с охладителем. Рассмотрено взаимодействие струи расплава с охладителем, распад струи, формирование капель и их распад на более мелкие капли. Кроме того, разработаны алгоритмы, основанные на Лагранжево-Эйлеровом представлении уравнений Навье-Стокса [40, 41], позволяющие отслеживать движущуюся границу фазового перехода и вычислять параметры взаимодействия струй с охладителем.

Уравнения решались в двух представлениях: в Эйлеровом представлении определялись поля скорости и давления, затем в Лагранжевом рассчитывалось новое положение деформируемой границы фазового перехода и т.д. А уравнения энергии решались в Эйлеровой системе координат. Трехмерный компьютерный код MELT-3D (Multiphase Eulerian-Lagrangian Transport-3D) построен на упрощенном методе, недорогом и не имеющем проблем с вычислительной неустойчивостью и диффузией (обычных спутников Эйлеровых уравнений Навье-Стокса). Так, применена модель транспорта взаимодействующих частиц (30000 частиц: 2500 презентабельных и 27500 сопровождающих) для описания непрерывной жидкой струи. Расчеты по внедрению струи церробенда ($D_j=25$ мм, $U_j=3$ м/с) в воду и сравнение с экспериментальными данными приведены на рис. 3, откуда видно их хорошее соответствие. На рис. 4-6 для такой же струи расплава даны

результаты расчетов по оценке влияния вязкости охладителя, скорости струи расплава и плотности охладителя.

Как видно из рис. 3, корреляция расчетных и экспериментальных данных хорошая, что свидетельствует об адекватности построенной грубой дискретной модели частиц для описания непрерывной струи. Проведенные вычислительные эксперименты подтвердили справедливость результатов линейной теории устойчивости и позволили оценить их точность и соответствие данным экспериментов. В целом они дают правильное представление об основных закономерностях взаимодействия расплава с охладителем во время тяжелой аварии реактора и позволяют изучать распад струй и капель при охлаждении струй расплава. Но ни линейная теория, ни указанные численные методы не могут описывать капиллярные явления в малых масштабах (тонкие струйки, мелкие капли), поскольку такие задачи чрезвычайно громоздки и требуют огромных вычислительных ресурсов.

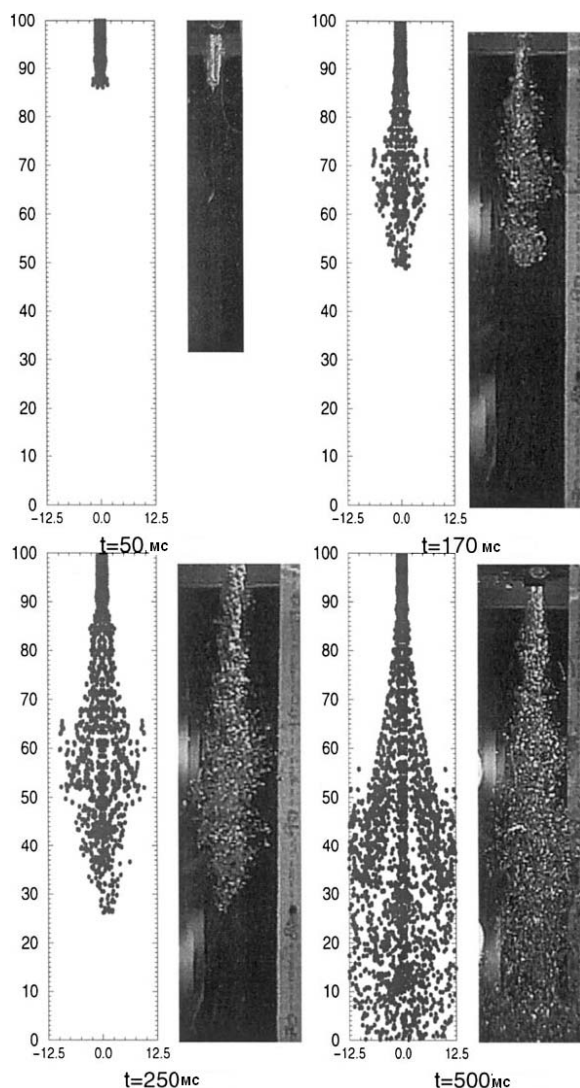


Рис. 3. Расчеты по MELT-3D в сравнении с экспериментальными данными

На рис. 4 видно влияние вязкости охладителя на особенности распространения струи расплава в бассейне охладителя. Струя расплава в парафиновом масле имеет меньшую область смешения, заполненную каплями расплава, образовавшимися в результате распада струи под действием неустойчивых возмущений свободной поверхности. А вода вследствие меньшей вязкости, чем у парафинового масла, способствует образованию более широкой области капельного течения расплава, что можно объяснить меньшим сопротивлением среды распространению в ней капель расплава после их отделения от распавшейся струи.

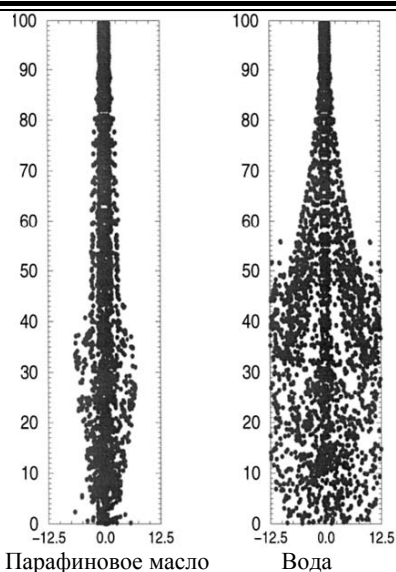


Рис. 4. Влияние вязкости охладителя на распространение струи

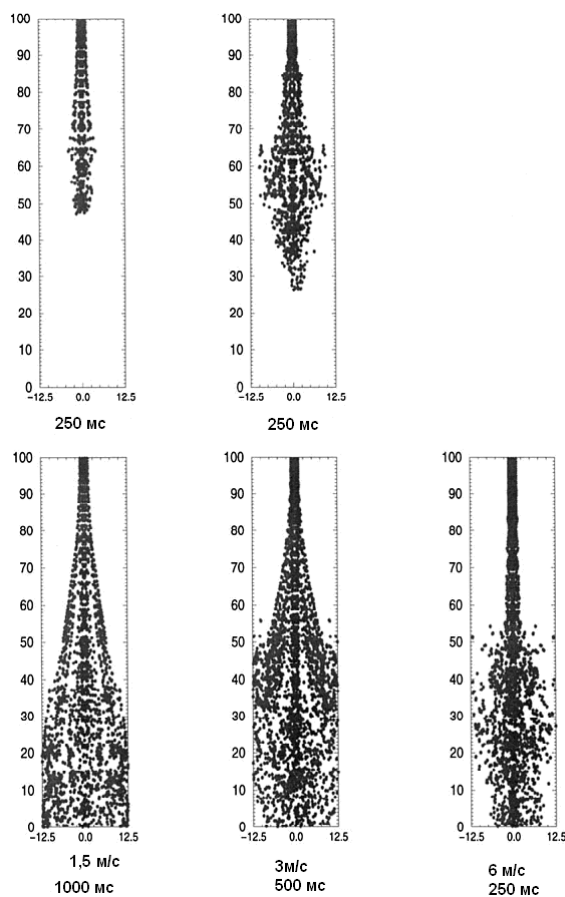


Рис. 5. Распространение струи с разными начальными скоростями

Следовательно, охладитель с меньшей вязкостью работает лучше, поскольку большая область распространения капель в бассейне охладителя способствует увеличению общей площади контакта охладителя с каплями расплава и тем самым интенсифицирует процесс охлаждения расплава и его последующего равномерного застывания в виде частиц. Скорость струи определяет участок, где происходит ее распад (разбрызгивание на капли). С увеличением скорости струи растет интенсивность ее взаимодействия с охладителем и участок сплошной части струи сокращается, а также уменьшается размер получаемых капель, т.к. интенсивное взаимодействие

расплава с охладителем способствует дроблению капель в результате роста неустойчивости поверхности.

На рис. 6 показано влияние плотности охладителя на интенсивность распада струи в бассейне охладителя. Расчеты проведены для 10, 25, 50 и 100% плотности воды. Эту ситуацию можно трактовать, например, как уменьшение плотности охладителя в результате появления и роста содержания паровой фазы в процессе охлаждения расплава.

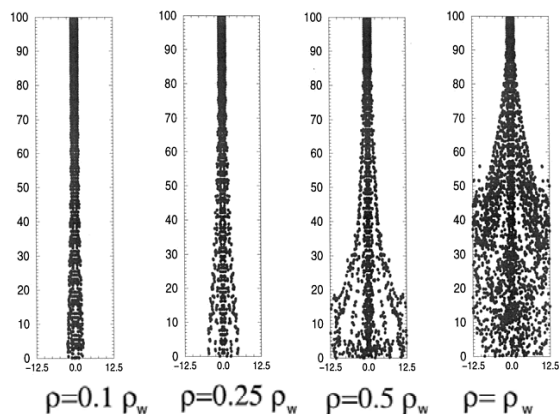


Рис. 6. Влияние плотности охладителя на распад струи расплава

Из представленных данных видно, что десятикратное уменьшение плотности приводит к практически полному прониканию струи в бассейн без заметного расширения в бассейне. Чем длиннее участок нераспавшейся струи, тем хуже охлаждение расплава. Поэтому снижение плотности охладителя (например, в результате парообразования) отрицательно сказывается на интенсивности процесса охлаждения струи. Из рис. 6 отчетливо видно, что уже при плотности, равной 0,25% плотности воды, струя почти не расширяется и мало дробится на капли, т.е. охлаждение плохое ($\rho_j / \rho_c > 30$).

4 Повышение точности и достоверности расчетов пассивных систем защиты

При расчете пассивных систем защиты от тяжелых аварий, основанных на принципе охлаждения струй расплава топлива (кориума) в подреакторном пространстве с водой (охладителем), крайне важно иметь методики достоверного и точного расчета теплогидравлических и других физических процессов взаимодействия расплава с испаряющимся охладителем. При этом имеется две основные проблемы, затрудняющие успешное решение данной задачи:

- неопределенность физических свойств кориума и
- отсутствие универсальных методик расчета указанных процессов.

Первая трудность может быть преодолена исследованием возможных исходов аварийных событий. Для этого необходимо знать пределы изменения физических свойств кориума. Вторая может быть преодолена только систематическими исследованиями и классификацией достоверных методик и полученных закономерностей изучаемых процессов в известных диапазонах изменения параметров. К сожалению, физических параметров много и вследствие этого сложно определить их взаимное влияние на исследуемые процессы.

В большинстве известных работ, в основном, исследовались квазистационарные процессы, и главное внимание уделялось неустойчивости Кельвина-Гельмгольца и распаду струй расплава высокой плотности в глубоком бассейне переохлажденной воды. Поэтому предлагалось считать распад струи функцией макроскопического взаимодействия (обмена импульсом) массы струи с окружающим бассейном охладителя, отвлекаясь от сложных процессов межфазного взаимодействия жидкостей. Эта макроконцепция фрагментации струи базируется на синтезе экспериментальных данных, а также на результатах анализа линейной теории устойчивости и вычислительных экспериментов на ЭВМ для классов задач в широком диапазоне варьируемых параметров в различных физических ситуациях.

Так, было установлено в задачах по теплогидравлическим процессам при пленочном кипении, что пленка чистого пара очень тонкая даже для прототипных аварийных высокотемпературных условий взаимодействия расплава с охладителем [42]. Если такая паровая пленка разделяет струю расплава и двухфазный (кипящий) бассейн охладителя [43], она проявляет себя как несжимаемый

слой, который несущественно влияет на макроскопический обмен импульсом между струей и окружающей средой.

Вторым важным обстоятельством, вытекающим из анализа распада струй, является то, что насыщение бассейна охладителя паром в начальной стадии взаимодействия струи расплава с охладителем – главный фактор, определяющий характеристики распада струй. Это объясняется тем, что больше неопределенностей связано с состоянием охладителя в бассейне, чем с характеристиками пленки пара или с микроскопическими особенностями явлений неустойчивости поверхности.

Третьим важным обстоятельством является сильная зависимость динамики распространения струи и образующихся после распада струи капель от макроскопических параметров задачи: начальной скорости струи, плотности струи и эффективной плотности бассейна охладителя. Это достоверно установлено и подтверждено как физическим и натурным моделированием, так и вычислительными экспериментами на ЭВМ.

Четвертая особенность - формирование грибовидной головки струй малого диаметра, проникающих при малых скоростях в бассейн с более плотной жидкостью. Явление объясняется высоким давлением возмущенной плотной жидкости, действующей на более легкую струю расплава. Но этот случай неустойчивости Рэлея-Тейлора не имеет отношения к пассивным системам защиты от тяжелых аварий и его можно исключить из рассмотрения.

Пятое, при высоких числах Вебера (инерционные силы доминируют над капиллярными) как симметричные, так и асимметричные моды (закрученные струи) могут быть одинаково важными с точки зрения неустойчивости струи. Причем быстрый рост возмущений и преобладание коротковолновых неустойчивых волн – причина распыления струи (распада на мелкие капли).

Выводы

Из проведенного анализа следует, что не до конца исследованными остаются задачи распада струй под действием изгибных возмущений. Необходимо продолжить эти работы, чтобы понять причины распада и особенности фрагментации струй в этих режимах. А также необходимо детально объяснить физику происходящих процессов. Остается неясным, как интенсивное парообразование в бассейне влияет на процесс распространения струй расплава. Выходящие навстречу струям расплава мощные струи пара, образующиеся от взаимодействия охладителя с высокотемпературной струей, могут оказывать столь сильное воздействие на динамику струи расплава, что как режим ее распространения в бассейне, так и режим распада струи на капли могут в значительной мере определяться именно этими процессами интенсивного испарения охладителя (до сих пор окончательно не выяснен вопрос возможности парового взрыва при внедрении высокотемпературной струи).

Проведенные исследования внедрения струй расплава в бассейн охладителя и распад струй на капли показал, что в числе малоизученных проблем, которые нуждаются в решении для улучшения систем пассивной защиты от тяжелых аварий на АЭС, имеются две, связанные с изгибными возмущениями струй и прониканием высокотемпературных струй в бассейн с испаряющимся охладителем. Эти проблемы относятся, соответственно, к начальной и основной фазам тяжелой аварии в контейнменте при растекании расплава кориума в подреакторном бассейне с водой.

Литература

1. Sehgal B.R. Accomplishments and challenges of the severe accident research// Nuclear Engineering and Design.- 2001.- Vol. 210.- P. 79-94.
2. Ali Hasan Moghaddam, Kazachkov I.V. Modelling of the corium melt interaction with water and vapour during severe accidents at NPP/ 3rd WSEAS Int. Conf., Univ. of Cambridge, February, 23-25.- 2008.- P. 71-76.
3. Казачков И.В., Али Хасан Могоддам. Моделирование теплогидравлических процессов при тяжелых авариях на АЭС.- Монография.- Киев: НТУУ «КПИ».- 2008.- 172 с.
4. Казачков И.В. Современное состояние и некоторые проблемы моделирования тяжелых аварий на зарубежных АЭС// Ядерная и радиационная безопасность.- 2003.- №1.- С. 25-34.
5. Али Хасан Могоддам, Казачков И.В. Удержание кориума в контейнменте в тяжелых авариях на АЭС// Энергетика: економіка, технології, екологія.- Киев.- 2007.- №2.- С. 13-21.
6. Dinh T.N., Bui V.A., Nourgaliev R.R., Green J.A. and Sehgal B.R.// Nucl. Eng. and Design.- 1999.- 189.- P. 299-327.

7. Bonetto F. and R.T. Lahey Jr. An experimental study on air carry under due to a plunging liquid jet// *Int. J. Multiphase flow.*- 1993.- vol. 19.- no. 2.- P. 281-294.
8. Bin A.K. Gas entrainment by plunging liquid jets. Review article number 43// *Chemical Engineering Science.*- 1993.- Vol. 48.- No. 21.- P. 3585-3630.
9. McKeogh E.J. and Ervine D.A. Air entrainment rate and diffusion pattern of plunging liquid jets// *Chemical Engineering Science.*- 1981.- Vol. 36.- No. 21.- P. 1161-1172.
10. Chanson H., Aoki S., Hoque A. Physical modelling and similitude of air bubble entrainment at vertical circular plunging jets// *Chemical Engineering Science.*- 2004.- 59.- P. 747-758.
11. Левич В.Г. Физико-химическая гидродинамика.- М.: Физматгиз.- 1959.- 700с.
12. Chu C.C., Sienicki J.J., Spencer B.W., Frid W., Lowenhielm G. Ex-vessel Melt-Coolant Interactions in Deep Water Pool: Studies and Accident Management for Swedish BWRs// *Nucl. Eng. Des.*- 1995.- 155.- P. 159-213.
13. Buerger M., Cho S.H., Berg E.V., Schatz A. Breakup of Melt Jets as Pre-condition for Premixing: Modeling and Experimental Verification// *Nucl. Eng. Des.*- 1995.- 155.- P. 215-251.
14. Berthoud G. Progress Made in the Area of Molten Fuel Coolant Interaction/ *Proc. FISA 95 Symposium on EU Research on Severe Accidents, 20-22 November 1995.- Luxembourg.*- P. 119-139.
15. Berthoud G. Molten Fuel-Coolant Interactions, EUR17126 EN, Luxembourg.
16. Bui V.A., Dinh T.N. Instabilities and Fragmentation of Jets: Experiments and Analyses. Research Report RIT: NPS.- 1996.- 25pp.
17. Bui V.A. and Dinh T.N. A Study of Instabilities of Liquid (Melt) Jet in a Lighter Coolant Pool. Book of summaries/ *EUROMECH Colloquium 355 on Interfacial Instabilities: Numerical Technique.- Ecole Polytechnique.- Paris, France, September 11-13.- 1996.*
18. Yang H.Q. Asymmetric Instability of a Liquid Jet// *J. Phys. Fluids.*- 1992.- A4 (4).- P. 681-688.
19. Berthoud G. Progress Made in the Area of Molten Fuel Coolant Interaction/ *Proc. FISA 95 Symposium on EU Research on Severe Accidents, 20-22 November 1995.- Luxembourg.*- P. 119-139.
20. Berthoud G. Molten Fuel-Coolant Interactions, EUR17126 EN, Luxembourg.
21. Epstein M., Fauske H.K. Steam Film Instability and the Mixing of Core-Melt Jets and Water// *ANS Proc. 1985 National Heat Transfer Conference.- Denver, Colorado, USA.- 1985.- P. 277-284.*
22. Мелихов О.И., Мелихов В.И. Исследование процесса взаимодействия расплава с водой во время тяжелых аварий на ядерных реакторах.- Препринт ЭРЭЦ (EREC).- Москва, Электрогорск.- 1993.
23. Kolev N.I. Verification of IVA5 computer code for melt-water interaction analysis/ *Proc. NURETH-9.- 1999.- P. 90-99.*
24. Park H.S., Kazachkov I.V., Sehgal B.R., Maruyama Y. and Sugimoto J. Analysis of Plunging Jet Penetration into Liquid Pool in Isothermal Conditions/ *ICMF 2001: Fourth International Conference on Multiphase Flow, New Orleans, Louisiana, U.S.A., May 27 - June 1, 2001.- P. 65-69.*
25. Kazachkov I.V., Paladino D. and Sehgal B.R. Ex-vessel coolability of a molten pool by coolant injection from submerged nozzles/ *9th Int. Conf. Nucl. Energy Devel. April 8-12, 2001. Nice, France.- P. 67-75.*
26. Haraldsson H.O., Kazachkov I.V., Dinh T.N. and Sehgal B.R. Analysis of thin jet breakup length in immiscible fluids/ *Abstr. 3rd Int. Conf. Adv. in Fluid Mechanics 2000, 24-26 May, Montreal, Canada.- P. 43-47.*
27. Park H.S., Kazachkov I.V., Sehgal B.R., Maruyama Y. and Sugimoto J. Analysis of plunging jet penetration into liquid pool with various densities/ *Abstr. 3rd Int. Conf. Adv. in Fluid Mechanics 2000, 24-26 May, Montreal, Canada.- P. 56-59.*
28. Kazachkov I.V., Haraldsson H.O., Yang Z.L. and Sehgal B.R. Instability analysis of the thin film flow dynamics in a micro channel/ *Abstr. 5th Int. Symp. Heat Transfer.- Beijing, 2000.- P. 112-123.*
29. «Математическое моделирование тепло-гидравлических процессов, тяжелых аварий на ядерных реакторах» Аналитический обзор РГПИ НЯЦ РК, Инв.№83 от 26.10.04г.
30. Kunugi T. et al. CASPER code for modeling/ *Proc. of 11th CFD Symposium.- 1997.- E2-4.*
31. Yabe T. & Aoki T.A universal solver for hyperbolic equations by cubic-polynomial interpolation. I. One-dimensional solver// *Computer Physics Communication.- 1991.- 66.- P. 219-232.*
32. Hirt C.W. & Nichols B.D.J. Volume of fluid numerical method// *Comput. Physics.- 1981.- 39.- P. 201.*
33. Lee Wen Ho. A Pressure Iteration Scheme for Two-Phase Modeling, LA-UR-79-975, Los Alamos Scientific Laboratory, Dept. of Energy, Contract W-7405-ENG-36, 1979.

34. Bui V.A., Dinh T.N., Sehgal B.R. Numerical Simulation of Surface Instability Phenomena Associated with Fuel-Coolant Interaction/ Proc. 8th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NuReTH-8).- Kyoto, Japan, September.- 1997.
35. Bui V.A., Dinh T.N., Sehgal B.R. Deformation and Fragmentation of a Melt Drop in the Flow Field: Results of a Numerical Study/ Int. Symposium on Intense Multiphase Interactions and Explosive Eruptions AMIGOIMI.- Sendai, Japan.- 1997.
36. Bui V.A., Dinh T.N., Sehgal B.R. Analysis of Liquid Jet Instability: Effects of Physical Properties and Phase Change/ Int. Symposium on Liquid-Liquid 2-Phase Flow and Transport Phenomena.- Antalya, Turkey.- 1997.
37. Osher S., Sethian J.A. Fronts Propagating with Curvature-Dependent Speed: Algorithms Based on Hamilton-Jacobi Formulations// J. Comp. Physics.- 1988.- 79.- P. 12-49.
38. Sussman M., Smereka P., Osher S. A Level Set Approach for Computing Solutions to Incompressible Two-Phase Flow// J. Comp. Physics.- 1994.- 114.- P. 146-159.
39. Yabe T., Ishikawa T., Kadota Y., Ikeda F. A Multidimensional Cubic-Interpolated Pseudoparticle (CIP) Method without Time Splitting Technique for Hyperbolic Equations// J. Phys. Soc. Japan.- 1990.- 59.- P. 2301-2304.
40. Nourgaliev R.R., Dinh T.N., Sehgal B.R. Simulation of Multiphase Mixing by a Particle Transport Model/ CD-ROM Proc. 5th Int. Conf. on Nuclear Engineering.- Nice, France.- 1997.
41. Nourgaliev R.R., Dinh T.N., Sehgal B.R. Parametric Investigation of a Model of Film Boiling on Horizontal Cylinders/ CD-ROM Proc. 5th Int. Conf. on Nuclear Engineering.- Nice, France.- 1997.
42. Dinh T.N., Dinh A.T., Nourgaliev R.R., Sehgal B.R. Investigation of Film Boiling Thermal Hydraulics under FCI Conditions: Results of a Numerical Study/ Proc. OECD:CSNI Specialist Meeting on Fuel-Coolant Interactions.- JEARI-Conf97-011(Part II), NEA:CSNI: R(97)26, JEARI.- Tokai, Japan, May 19-21.- 1997.- P. 674-695.
43. Nishio S., Ohtake H. Vapor-film-unit Model and Heat Transfer Correlation for Natural-Convection Film Boiling with Wave Motion under Subcooled Conditions// Intern. J. Heat Mass Transfer.- 1993.- 36 (10).- P. 2541-2552.