

*Е.М. Смирнов, А.Г. Абрамов, П.Е. Смирнов*

## **ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОМАССОБМЕНА ПРИ ПЛЕНОЧНОЙ КОНДЕНСАЦИИ ВОДЯНОГО ПАРА НА ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТРУБКЕ В УСЛОВИЯХ ЦИРКУЛИРУЮЩЕГО ТУРБУЛЕНТНОГО ДВИЖЕНИЯ ПАРОВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ**

СПбГПУ

В современных проектах по созданию новых блоков АЭС, ориентирующихся на использование реакторов типа ВВЭР, предусматривается разработка систем, основанных на естественно-конвективном механизме удаления теплоты распада и гарантирующих длительное поддержание допустимого уровня давления внутри защитной оболочки (контейнмента) реактора в течение возможной тяжелой аварии, связанной с потерей теплоносителя (воды). В зависимости от проекта, условия для конденсации (удаления) водяного пара, образующегося в нижней части контейнмента и перетекающего в подкупольное помещение, создаются либо на стенках контейнмента, либо на специальных конденсаторах (например, трубного типа), располагаемых в подкупольном пространстве.

Известно, что даже небольшое количество неконденсирующегося газа резко уменьшает интенсивность переноса тепла к стенке, на которой происходит пленочная конденсация пара. При этом у поверхности конденсации в условиях действия сил плавучести развивается свободно-конвективное течение, которое на практике в большинстве случаев имеет турбулентный характер, либо включает в себя область ламинарно-турбулентного перехода.

Используемые в инженерной практике расчетные методики для предсказания коэффициента теплоотдачи при турбулентном режиме течения парогазовой среды базируются либо на применении корреляционных соотношений, аппроксимирующих экспериментальные данные [1, 2], либо на использовании аналогии процессов теплообмена и массообмена в двумерном пограничном слое и полуэмпирических зависимостях, описывающих локальные переносные свойства слоя в целом [3]. Результаты численного решения уравнений в частных производных, описывающих процессы пленочной конденсации при турбулентном режиме свободно-конвективного течения, в литературе сколько-нибудь полно не представлены; соответственно, отсутствует и опыт приложения современных дифференциальных моделей турбулентности для предсказания локальной интенсивности поверхностной конденсации в присутствии неконденсирующегося газа. Современные вычислительные средства и методы позволяют восполнить этот пробел, не ограничиваясь приближением теории пограничного слоя, а решая задачи на основе осред-

ненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса, с полным разрешением образующихся при пленочной конденсации пограничных слоев. Необходимость использования такого подхода определяется тем, что в замкнутых областях реализуется циркулирующий характер движения паровоздушной среды.

В ходе проведенных авторами исследований был разработан и апробирован эффективный метод учета процессов поверхностной конденсации, предусматривающий аккуратное разрешение динамического, температурного и диффузионного пограничного слоев, образующихся при пленочной конденсации из парогазовой среды, и использование нелинейных граничных условий, отражающих физику процесса конденсации и переноса тепла через пленку конденсата [4]. Математическая формулировка метода основана на использовании осредненных по Рейнольдсу полных уравнений Навье-Стокса, дополненных уравнениями энергии и конвективно-диффузионного переноса. Замыкающие систему уравнений соотношения учитывают переменность по пространству физических свойств парогазовой смеси: зависимости коэффициентов диффузии, динамической вязкости и теплопроводности от температуры, давления и массового отношения фракций смеси. Разработанная математическая модель предусматривает возможность решения задачи тепломассообмена при пленочной конденсации из парогазовой среды как с учетом термического сопротивления и движения пленки конденсата конечной толщины, так и в приближении бесконечно тонкой пленки.

Первичная апробация математического метода, оценка работоспособности алгоритма расчета массового потока конденсирующего пара в пленку, а также изучение влияния на поля величин и значения теплового потока на поверхности конденсации ряда физических и модельных параметров было проведено при численном решении задачи в приближении пограничного слоя [4]. Особое внимание при этом уделялось тестированию возможностей дифференциальных RANS-моделей турбулентности применительно к изучаемой проблеме. По результатам тестирования для проведения последующих расчетов была отобрана низкорейнольдсовая  $k-\varepsilon$  модель Лина-Лешцинера [5].

Развиваемый на кафедре гидроаэродинамики СПбГПУ программный комплекс (ПК) SINF [6] в соответствии с разработанной и апробированной математической моделью был дополнен возможностью решения трехмерных задач с предсказанием локальной интенсивности пленочной конденсации пара в присутствии неконденсирующегося газа. На базе доработанной версии ПК в условиях, приближенных к экспериментам [2], было проведено численное моделирование процесса пленочной конденсации водяного пара на тонкой вертикальной трубе, помещенной в центральную часть замкнутой цилиндрической камеры, заполненной паровоздушной средой (рис. 1а). В экспериментах [2] труба имела длину 3.5 м, внешний диаметр 38 мм и охлаждалась постоянно циркулирующим потоком воды. Водяной пар поступал в рабочую

область со дна камеры, на котором были расположены нагревательные элементы. Эксперименты были проведены при трех разных значениях давления в камере (1.5, 3.0 и 4.5 атм.) и нескольких среднеобъемных значениях массовой доли  $C$  неконденсирующегося газа (из диапазона 0.33÷0.88). Производились измерения среднего по поверхности трубы теплового потока и среднеобъемных температур по высоте камеры.

Представляемые расчеты проводились в осесимметричной постановке для кольцевой области (рис. 1б). На внешней поверхности трубы (отрезок EF) задавалось экспериментальное распределение температуры по данным [2]. На частях границы расчетной области AE и BF задавались условия непротекания и нулевой поток тепла. Верхняя стенка камеры полагалась теплоизолированной. Температура нижней горячей стенки задавалась постоянной и определялась из соотношения, аппроксимирующего связь парциального давления пара и его температуры в состоянии насыщения. Граничные значения вертикальной компоненты скорости пара на дне камеры определялись в ходе итерационного процесса, исходя из условия равенства массовых потоков чистого пара, поступающего в камеру снизу и конденсирующегося на поверхности трубы. Давление в камере принималось равным 1.5 атм. Значение молекулярного числа Прандтля  $Pr$  было принято равным 0.71, а значения турбулентных чисел Прандтля и Шмидта полагались равными 0.9. Расчеты были проведены в приближении бесконечно тонкой пленки, так как при расчетах в приближении пограничного слоя для данного экспериментального режима (при низком давлении в камере) было показано, что учет пленки незначительно влияет на величину теплового потока. В выполненных расчетах согласованно изменялись начальные значения среднеобъемной температуры и концентрации водяного пара в камере.

Проведенный анализ результатов расчетов показал, что существенное влияние на интенсивность теплоотдачи оказывает замкнутость рабочей области. В камере формируется крупномасштабное циркулирующее дви-

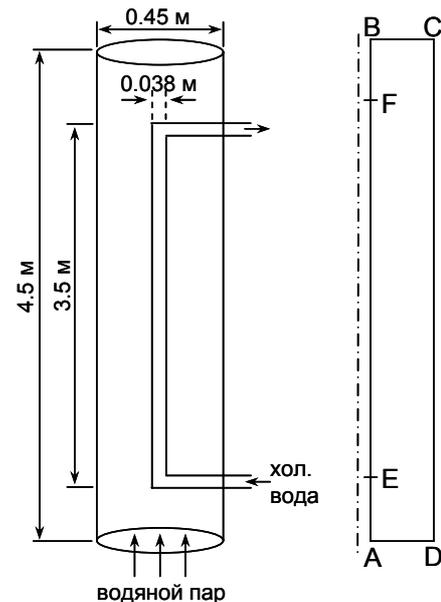


Рис. 1. Схема экспериментальной установки в работе [2] (а) и схема к постановке расчетной задачи (б).

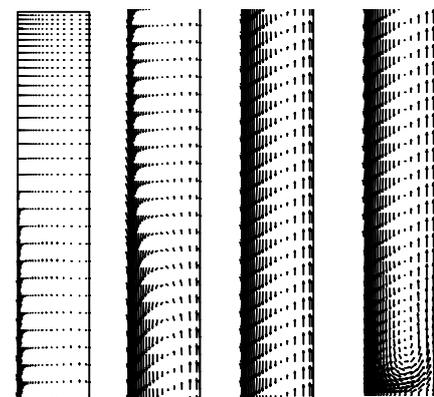


Рис. 2. Картина циркулирующего движения паровоздушной смеси в камере.

0.0 1.0 2.0 3.0 4.0 X

Рис. 3. Изменение среднеобъемной массовой доли воздуха по высоте камеры: сопоставление результатов расчета и эксперимента [2].

жение паровоздушной среды. Это иллюстрируется на рис. 2, где приведена (разреженная в 4 раза) картина векторов скорости для режима с  $C=0.32$  (для лучшего воспроизведения картина разбита по высоте на четыре фрагмента). Вдоль охлаждаемой трубы развивается нисходящая пристенная кольцевая струя с преимущественным содержанием воздуха. У внешней стенки формируется менее интенсивный восходящий поток с высокой концентрацией водяного пара, поступающего со дна камеры. Следует заметить, что турбулентная вязкость в камере генерируется естественным путем, что исключает влияние на решение уровня "входной" вязкости, отмечавшееся в расчетах в приближении пограничного слоя [4].

В настоящих расчетах был воспроизведен соответствующий экспериментальным данным качественный характер изменения среднеобъемной температуры и массовой доли воздуха с уменьшением высоты, а именно: незначительный рост температуры и уменьшение массовой доли воздуха по мере развития основного свободно-конвективного течения вдоль поверхности конденсации (рис. 3, линейная координата отсчитывается от верха трубы в направлении дна камеры). При этом приемлемое количественное согласие с экспериментальными профилями имеет место только в верхней части камеры. В нижней же ее части предсказываются завышенные значения температуры и концентрации водяного пара. По-видимому, это обусловлено неспособностью RANS-модели предсказывать должный уровень смешения, типичный для конвекции Релея-Бенара, развивающейся в нижней части камеры.

Обращаясь к анализу теплового потока на поверхности конденсации, следует заметить, что он складывается из двух составляющих: потока тепла, порожденного изменением агрегатного состояния пара, и диффузионного потока, обусловленного молекулярным теплопереносом в парогазовой смеси за счет возникающих у поверхности градиентов температуры. В рассмотренной задаче средний тепловой поток, связанный с конденсацией пара на поверхности охлаждения, примерно на порядок превышает величину диффузионного потока. Типичное распределение рассчитанной плотности теплового потока вдоль трубы показано на рис. 4, на котором отчетливо видно месторасположение ламинарно-турбулентного перехода ( $x \cong 1.1$  м). На рис. 5

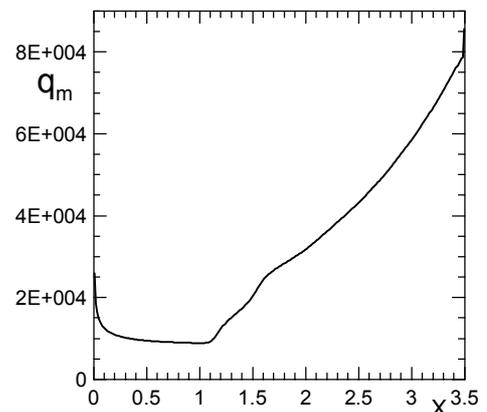


Рис. 4. Распределение плотности теплового потока вдоль трубы, Вт/м<sup>2</sup>.

производится сопоставление расчетных и вычисленных по экспериментальной зависимости значений среднего по поверхности конденсации теплового потока при разных среднеобъемных значениях массовой доли воздуха в камере. Видно, что расчеты по методу RANS занижают значения теплового по-

тока примерно на 15%.

В продолжение исследований планируется с использованием двумерной и трехмерной нестационарных постановок провести развернутые параметрические исследования по влиянию различных факторов на характеристики теплоотдачи. Есть основания ожидать, что расчеты в трехмерной нестационарной постановке позволят более корректно предсказать структуру течения, разрешить важные для течения и процессов теплообмена эволюционирующие вихревые образования и, как следствие, получить лучшую степень согласия с экспериментами по среднему тепловому потоку.

Работа частично выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-08-00977).

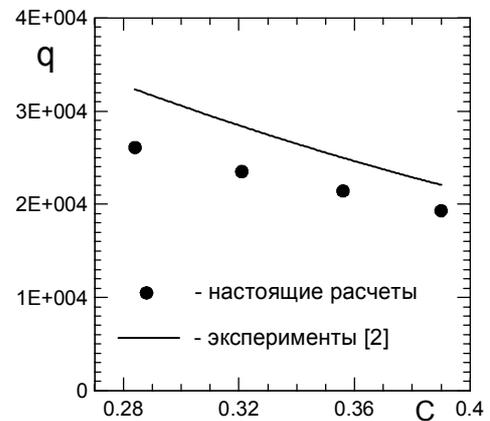


Рис. 5. Сопоставление результатов расчетов с данными [2] для среднего теплового потока, Вт/м<sup>2</sup>.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Uchida H., Oyama A., Togo Y.* Evaluation of Post-Incident Cooling Systems of Light-Water Power Reactors / Proceedings of International Conference on Peaceful Uses of Atomic Energy, 13 93-102. 1965.
2. *Dehby A.A., Golay M.W., Kazimi M.S.* Condensation experiments in steam-air steam-helium mixture under turbulent natural convection / National Conference of Heat Transfer, AIChE Symp. Ser. 1991. No 87(283). P. 19-28.
3. *Исаев С.И., Кожин И.А. и др.* Теория теплообмена. Под ред. А.И. Леонтьева. - М.: Высшая школа, 1979. - 495 с.
4. *Смирнов Е.М., Абрамов А.Г., Кумзерова Е.Ю., Смирнов П.Е.* О применении современных дифференциальных моделей турбулентности для расчета поверхностной конденсации в условиях свободной конвекции паровоздушной среды / Научные исследования и инновационная деятельность: материалы научно-практ. конф. СПб. Изд. Политехн. ун-та, 2008. С. 83-89.
5. *Lien F.S., Leschziner M.A.* Computational modelling of a transitional 3D turbine-cascade flow using a modified low-Re  $k-\epsilon$  model and a multi-block scheme // Int. J. of Computational Fluid Dynamics. 1999. Vol. 12. P. 1-15.
6. *Смирнов Е.М., Зайцев Д.К.* Метод конечных объемов в приложении к задачам гидрогазодинамики и теплообмена в областях сложной геометрии // Научно-технические ведомости №2 (36). Изд. СПбГПУ. Санкт-Петербург, 2004. С. 70-81.