

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КИПЕНИЯ НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ

В.В. Даничев¹, М.Н. Загуменный¹, Л.П. Смирнов¹, А.И. Федюшкин², В.С. Устинов¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия, vydanichev@mail.ru

² Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, Москва, Россия, fai@ipmnet.ru

Процессы кипения жидкостей давно исследуются поскольку широко используются и играют важную роль в промышленности, в технологиях получения материалов, энергетике, в процессах интенсивного охлаждения нагреваемых поверхностей. Несмотря на большое количество научных работ по кипению явление кипения до настоящего времени изучено недостаточно и нет единой математической модели кипения, без эмпирических предположений для замыкания модели. Это связано с тем, что физические процессы, происходящие при кипении, являются сложными, многофакторными с точки зрения теплообмена, гидродинамики движения и взаимодействия паровых пузырьков, фазового перехода жидкости в пар, зарождения центров и частоты образования пузырьков. Первые исследования процессов кипения были экспериментальными, например, [1], затем наряду с экспериментальными работами стали появляться теоретические работы с аналитическими приближениями и только в последние десятилетия появились работы по численному моделированию, использующие накопленные эмпирические и теоретические знания для замыкания математических моделей [2-9].

Проблема подкипания (кипения недогретой жидкости) актуальна для водо-водяного энергетического реактора (ВВЭР) теплоносителя первого контура в активной зоне. От паросодержания зависят нейтронно-физические характеристики реактора, водно-химический режим теплоносителя и локальный перегрев оболочек твэлов, что влияет на надежность активной зоны. В данной работе приводятся результаты численного моделирования охлаждения твэлов с использованием трехмерного программного CFD кода «GIDR-3M», разработанного авторами. Проведены верификационные расчеты процесса подкипания теплоносителя для топливной сборки FRIGG (FT-6а) [9] (рис.1).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для численного моделирования течений двухфазных сред использована версия трехмерного конечноэлементного кода GIDR-3M, ранее адаптированная к варианту модели смеси, которая была дополнена моделями учета слияния и деления паровых пузырей. Поперечное сечение топливной сборки FRIGG (FT-6а) [9] приведено на рис. 1, а конечно-элементная сетка для CFD модели на рис. 2.

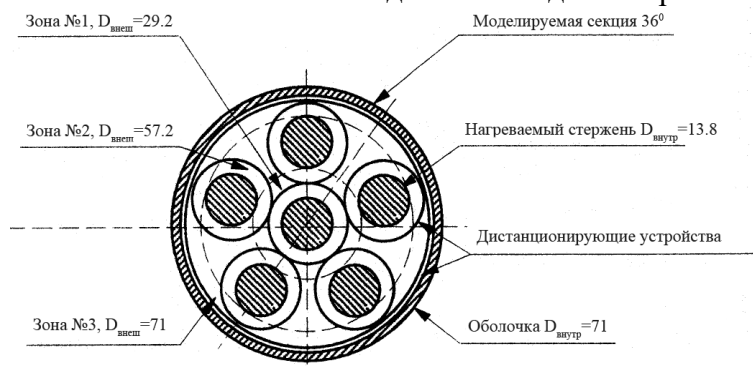


Рис. 1. Поперечное сечение сборки FT-6а.

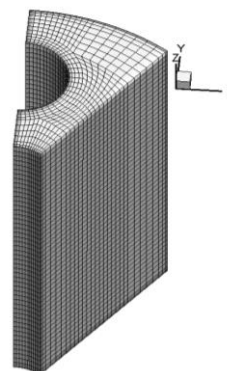


Рис. 2. Конечно-элементная модель.

Число узлов данного разбиения состоит из 27350 узлов. Геометрия моделируемого участка: длина в аксиальном направлении (ось Z) 1.2 м, внешний диаметр 71 мм, диаметр нагреваемого стержня 13.8 мм. Моделируются следующие условия работы

экспериментальной установки FRIGG: расход теплоносителя на входном участке 1163 кг/(м²·с), температура недогрева на входном участке $T_{\text{sub}} = 4.5$ К, плотность теплового потока на обогреваемых поверхностях 522 кВт/м².

В модели двухфазного течения теплоносителя учитывается перемешивание и разделение фазовых фракций, водяная фаза принята основной, а фаза паровых пузырьков вторичной. Решаются уравнения импульса, энтальпии и сохранения массы. Поле давления для всех фаз используется единое. Энтальпия, температура и физические свойства пара принимаются на линии насыщения. Учитываются силы межфазного трения.

В математической модели используется система уравнений, состоящая из уравнения сохранения массы, уравнения импульса, уравнений k-ε модели турбулентности и уравнение сохранения энергии (за исключением паровой фазы, где предполагается, что энтальпия пара находится на линии насыщения) с соответствующими требованиями для обмена на границе раздела для массы, импульса и энергии.

Энтальпия и температура пара определяются по давлению на линии насыщения, вектор скорости, скорость жидкой фазы, скорость газовой (паровой) фазы, скорость дрейфа газовой (паровой) фазы на твердой границе равны нулю, на обогреваемой поверхности задается условие непроницаемости,

Согласно RPI модели [7] на обогреваемой поверхности плотность теплового потока делится на три составные части: $Q_w = Q_l + Q_e + Q_q$, где Q_w – плотность теплового потока, падающего на нагреваемую поверхность, Q_l конвективный тепловой поток, Q_e – плотность потока парообразования на стенке, Q_q – плотность потока, падающего на горячую стенку со стороны холодной жидкости, за счет замещения вакансий уходящих со стенки пузырьков пара. Постановка граничных условий для конвективного теплообмена в турбулентном режиме течения выполняется методом пристеночных функций [8]. В данной работе диаметр парового пузырька определялся, как кусочно-линейная функция недогрева [7].

РЕЗУЛЬТАТЫ

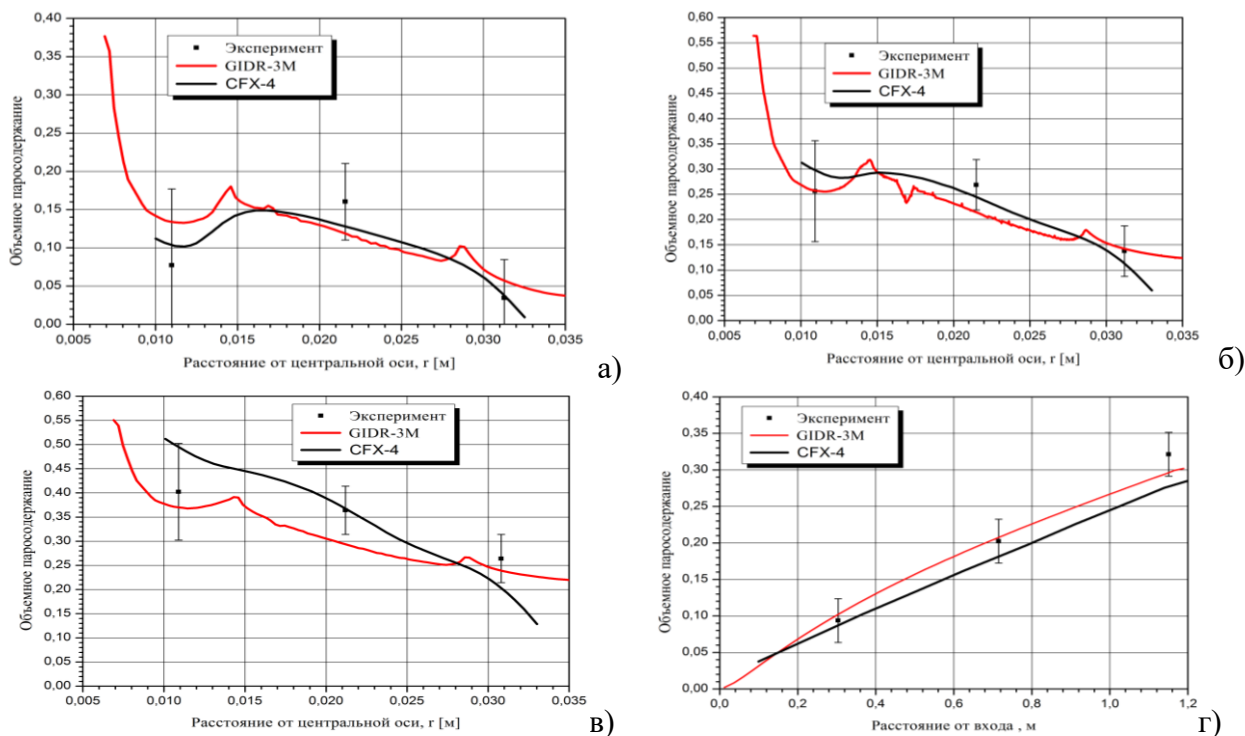


Рис. 3. Распределение паросодержания (а), б), в) -осредненного по азимутальному углу в поперечных сечениях: $z=0,304, 0,713, 1,148$ м, г) - по длине сборки, осредненного в поперечном сечении).

На рис. 3 представлены распределения паровой фракции, полученные по коду GIDR-3M в сравнении с экспериментальными данными и с результатами, полученными по коду

CFX. На рис. 3(а-в) показаны распределения паровой фракции, осредненные по азимутальному углу для поперечных сечений $z=0,304$ м, $0,713$ м и $1,148$ м от входа в сборку, а на рис.3г) - распределения паровой фракции по длине сборки, осредненные в поперечном сечении.

На рис. 4 и 5 представлены изотермы жидкости (воды) и паросодержания, полученные по коду GIDR-3M в поперечных сечениях сборки на расстояниях $z=0,304$ м, $0,713$ м и $1,148$ м от входа в сборку.

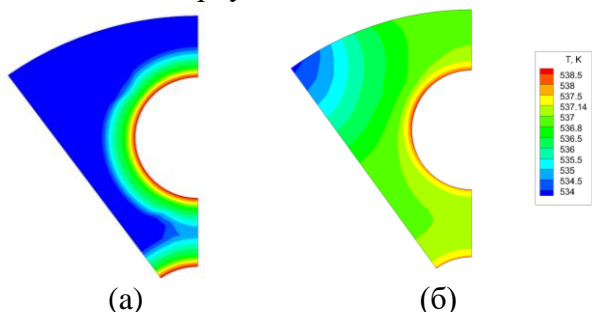


Рис.4. Изотермы в воде в поперечных сечениях при $z=0,304$ м (а), и $1,148$ м (б).

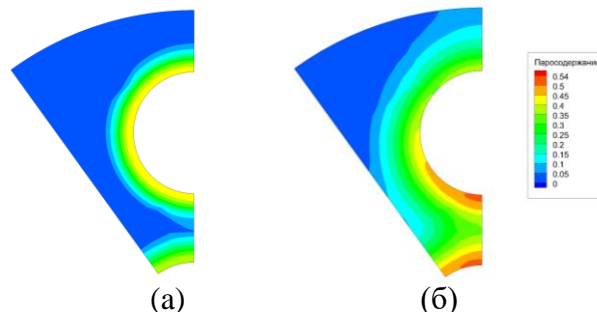


Рис. 5. Паросодержания в поперечных сечениях при $z=0,304$ м (а), и $1,148$ м (б).

ВЫВОДЫ

Разработаны модель, кипения недогретой жидкости теплоносителя и течения пароводяной смеси. Сравнение результатов расчетов по коду GIDR-3M с экспериментальными данными показало хорошее согласие по распределению паросодержания, что правильно отражает характер протекающих процессов в двухфазной среде.

Литература

1. Бартоломей Г.Г., Чантурия В.М. Экспериментальное исследование истинных паросодержаний при кипении недогретой воды в вертикальных трубах. - "Теплоэнергетика", 1967, №2, с.80-83.
2. Lee, T.H., Park, G.-C., Lee, D.J., 2002. Local flow characteristics of subcooled boiling flow of water in a vertical annulus. Int. J. Multiphase Flow 28, 1351–1368.
3. J. Y. TU and G. H. YEON. DEVELOPMENT OF A NUMERICAL MODEL FOR SUBCOOLED BOILING FLOW. Proceedings of Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia ,10-12 December 2003. p.559-568
4. T. Hibiki and M. Ishii. One-group Interfacial Area Transport of Bubbly Flows in Vertical Round Tubes. International Journal of Heat and Mass Transfer, 43:2711-2726, 2000.
5. E. Krepper. CFD modelling of subcooled boiling, // The 10th international meeting on nuclear reactor thermal hydraulics (NURETH-10). Seoul. Korea. October 5-9. 2003.
6. Andrey Troshko, David Schowalter, Chokri Guetari. CFD validation benchmark of subcooled boiling under near saturation conditions. The 12th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-12). Log Number: B00068, Pittsburgh, U.S.A, September 30-October 4, 2007.
7. Kurul, N. and Podowski, M.Z., 1990, Multidimensional effects in forced convection subcooled boiling. Proceedings of Ninth International Heat Transfer Conference, Jerusalem, Israel, I-BO-04, pp 21-26.
8. Белов И.А., Кудрявцев Н.А. Теплоотдача и сопротивление пакетов труб. Л.: Энергоатомиздат, 1987, 223 с.
9. Wang-Kee. In, Tae-Hyun. Chum, Dong-Seok. Oh, Chang-Hwan. Shin. CFD evaluation of the two-phase flow models for the subcooled boiling flow in a rod bundle. The 11th International Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal-Hydraulics (NURETH-11). Paper 126, Avignon, France, October 2-6, 2005.