

# ВЕРИФИКАЦИЯ 3D CFD КОДА «GIDR-3M» НА ЗАДАЧЕ О КИПЕНИИ НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ

В.В. Даничев<sup>1</sup>, М.Н. Загуменный<sup>1</sup>, Л.П. Смирнов<sup>1</sup>,  
А.И. Федюшкин<sup>1,2</sup>, В.С. Устинов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> НИЦ «Курчатовский институт

<sup>2</sup> Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН

*Аннотация.* В данной работе приводятся результаты численного моделирования охлаждения твэлов с использованием трехмерного программного CFD кода «GIDR-3M», разработанного авторами. Выполнены верификационные расчеты кипения недогретой жидкости для сборки реактора.

*Ключевые слова:* численное моделирование, кипение.

## VERIFICATION OF THE 3D CFD CODE "GIDR-3M" ON THE PROBLEM OF THE SUBCOOLED BOILING

V. V. Danichev<sup>1</sup>, M. N. Zagumennov<sup>1</sup>, L. P. Smirnov<sup>1</sup>,  
A. I. Fedyushkin<sup>1,2</sup>, V. S. Ustinov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> NRC "Kurchatov Institute"

<sup>2</sup> Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics RAS

*Abstract.* The results of numerical simulation of cooling of fuel elements using three-dimensional CFD computer code "GIDR-3M", was developed by the authors. verification calculations were performed for the process of boiling of subcooled liquid.

*Keywords:* numerical simulation, subcooled boiling

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 (например, можно указать известные монографии [1-5], ставшие уже учебниками для специалистов), явление кипения до настоящего времени изучено недостаточно и нет единой математической модели кипения, без эмпирических предположений. Это связано с тем, что физические процессы, происходящие при кипении, являются сложными, многофакторными с точки зрения тепломассообмена, гидродинамики движения и взаимодействия паровых пузырьков, фазового перехода жидкости в пар, зарождения центров и частоты образования пузырьков. Первые исследования процессов кипения

были экспериментальными, например, [6], 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 [7-9].

Проблема подкипания теплоносителя первого контура (кипения недогретой жидкости) в активной зоне является актуальной для водородного энергетического реактора (ВВЭР). От паросодержания зависят нейтронно-физические характеристики реактора, водно-химический режим теплоносителя и локальный перегрев оболочек ТВЭЛов влияет на надежность активной зоны. В данной работе приводятся результаты численного моделирования охлаждения ТВЭЛов с использованием трехмерного программного CFD кода «GIDR-3М», разработанного авторами. Проведены верификационные расчеты процесса подкипания теплоносителя для топливной сборки FRIGG (FT-6а), состоящей из шести электрически нагреваемых стержней в цилиндрическом сосуде давления. Результаты расчетов сравнены с экспериментальными данными [9] по распределению паровой фракции.

## 1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ.

В принятой модели двухфазного течения теплоносителя фаза паровых пузырьков является вторичной, а водяная фаза основной. Учитывается перемешивание и разделение фазовых фракций. 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.

Рассматривается система уравнений, уравнение сохранения массы, уравнение импульса k-ε модель 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. Так как во многих случаях течения при переохлажденном кипении являются турбулентными, используется k-ε модель турбулентности.

Искомые и используемые переменные были следующими: объемные фракции -  $\alpha_l$  - вода,  $\alpha_v$  - газ (пар) вторичная фаза,  $\alpha_l = 1 - \alpha_v$ ;  $U_l, V_l, W_l$  - компоненты вектора скорости жидкой фазы;  $U_v, V_v, W_v$  - компоненты вектора скорости газа (пара);  $a^{int}$  - концентрация межфазной поверхности;  $T_l$  - температура жидкости;  $T_{sat}$  - температура насыщения;  $T_{sub} = T_{sat} - T_l$ ;  $H_v$  - энтальпия газа (пара) на линии насыщения;  $\rho_l$  - плотность жидкости;  $\rho_v$  - плотность газа (пара);  $\Delta \rho = \rho_l - \rho_v$ ;  $\mu_l$  - динамическая вязкость жидкости;  $\mu_v$  - динамическая вязкость газа (пара); Усредненная плотность -  $\rho_m = \alpha_l \rho_l + \alpha_v \rho_v$ ; Усредненная вязкость -  $\mu_m = \alpha_l \mu_l + \alpha_v \mu_v$ ; теплопроводность жидкости -  $\lambda_l$ ; Теплопроводность газа (пара) -  $\lambda_v$ ; теплоемкость жидкости -  $c_{pl}$ ; теплоемкость газа (пара) -  $c_{pv}$ ; усредненная теплоемкость -  $c_{pm} = \alpha_l c_{pl} + \alpha_v c_{pv}$ ; усредненная турбулентная вязкость -  $\mu_t$ ; турбулентное число Прандтля -  $Pr_t = 0.9$ ; турбулентное число Шмидта -  $Sh = 0.1$ ; теплота парообразования -  $L$ ; усредненный вектор скорости  $\vec{V}_m = \frac{\alpha_l \rho_l \vec{V}_l + \alpha_v \rho_v \vec{V}_v}{\rho_m}$ , вектор скорости дрейфа

газовой фазы:  $\vec{V}_{dr} = \vec{V}_v - \vec{V}_m$ ,  $\vec{V}_{vl} = \vec{V}_v - \vec{V}_l$ , вектор относительной скорости

определяется согласно зависимости:  $\vec{V}_{vl} = \frac{(\rho_v - \rho_m) d_v^2 \vec{a}}{18 \mu_l f_{drag}}$ ,  $\vec{a} = \vec{g} - (\vec{V}_m \cdot \nabla) \vec{V}_m - \frac{\partial \vec{V}_m}{\partial t}$ ,  $f_{drag}$

определяется согласно модели Shiller and Naumann

[1]:  $f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 Re^{0.687} & Re \leq 1000 \\ 0.0183 Re & Re > 1000 \end{cases}$ ,  $Re = \frac{\rho_l |\vec{V}_v - \vec{V}_l|}{\mu_l} d_v$ , где  $d_v$  - диаметр пузырька газа

(пара)  $d_v = \frac{6 \alpha_v}{a^{int}}$

## 2. РЕАЛИЗАЦИЯ В КОДЕ GIDR-3М МОДЕЛИ СМЕШЕНИЯ СО СКОРОСТЬЮ ДРЕЙФА И С УЧЕТОМ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕЖФАЗНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАЗДЕЛА

Система основных уравнений, которая была принята для модели смешения со скоростью дрейфа, имеет следующий вид:

$$\text{Уравнение неразрывности} \quad \frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{V}_m) = 0; \quad (2.1)$$

Уравнение переноса импульса

$$\frac{\partial (\rho_m \vec{V}_m)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{V}_m \vec{V}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [(\mu_m + \mu_t)(\nabla \vec{V}_m + \nabla \vec{V}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{V}_{dr} \vec{V}_{dr}) \quad (2.2)$$

Уравнение для объемной фракции газа (пара):

$$\frac{\partial \alpha_v}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_v \vec{V}_v) = \text{div} \left( \left( \frac{\mu_m + \mu_t}{\rho_l Sh} \right) \nabla \alpha_v \right) - \frac{G_v}{\rho_v} + q_e A_w / (\rho_v (L + c_{pl}(T_{sat} - T_l))) \quad (2.3)$$

$$G_v = \frac{ha^{int}(T_{sat} - T_l)}{L}$$

Транспортное уравнение для концентрации площади межфазной поверхности:

$$\frac{\partial a^{int}}{\partial t} + \nabla \cdot (a^{int} \vec{V}_m) = -\frac{2}{3} a^{int} \frac{G_v}{\alpha_v \rho_v} + S_{rc} + S_{we} + S_{ii} \quad (2.4)$$

Изменение концентрации межфазной поверхности в результате парообразования или конденсации учитывается в первом источниковом члене правой части (2.4).  $S_{rc}$  и  $S_{we}$  – источниковые члены, отвечающие за слияние вследствие случайного столкновения и волнового захвата,  $S_{ii}$  – источниковый член, учитывающий разрушение пузырей за счет турбулентных пульсаций. Используются модели Hibiki-Ishii [2] и Ishii-Kim [3, 4].

Уравнение энергии жидкой фракции

$$\frac{\partial \rho_\ell c_{p\ell} \alpha_\ell T_\ell}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_\ell c_{p\ell} \alpha_\ell \vec{V}_\ell T_\ell) = \text{div} \left( \alpha_\ell \left( \lambda_\ell + \frac{\mu_\ell c_{p\ell}}{Pr_\ell} \right) \nabla T \right) + G_v H_v \quad (2.5)$$

Энтальпия и температура пара определяются по давлению на линии насыщения. Множитель в источниковых членах уравнений (2.3)-(2.4) определяется как массовая скорость конденсации при  $T_{\text{sat}} > T_1$ , или как массовая скорость парообразования в противоположенном случае.

$h$  – коэффициент межфазного теплообмена определяется по зависимости:

$$u_r = |\vec{V}_v - \vec{V}_l|, \quad h = \frac{\lambda_\ell (2 + 0.6 \text{Pr}^{0.3} \text{Re}^{0.5})}{d_v}, \quad \text{Pr} = \frac{\mu_\ell c_{p\ell}}{\lambda_\ell}, \quad \text{Re} = \frac{\rho_\ell d_v u_r}{\mu_\ell},$$

Для уравнений (2.2) усредненный вектор скорости, скорость жидкой фазы, скорость газовой (паровой) фазы, скорость дрейфа газовой (паровой) фазы на твердой границе равны нулю. Для уравнения (2.3) на обогреваемой поверхности задается условие непроницаемости, в дискретной форме  $A_w$  представляет отношение площади поверхности соседней с нагреваемой стенкой ячейки к ее объему [8].

$$d_{bw} = \text{MIN}(0.0014, 0.0014 \exp(-\frac{T_{\text{sat}} - T_\ell}{45})) \quad \alpha_w = \frac{\pi d_{bw}^2 n}{4}$$

где  $T_1$  - температура в соседнем узле со стенкой [5],

$n$  - плотность образования пузырьков на обогреваемой поверхности, равная

$n = (185(T_w - T_{\text{sat}}))^{1.805}$ , где  $T_w$  - температура стенки (определяется из решения уравнения (2.5) с соответствующими граничными условиями).

На входном участке  $\alpha_v = 0$ ,  $a^{\text{int}} = 0$ , на выходном участке и на внешней границе  $d\alpha_v/dn = 0$ ,  $da^{\text{int}}/dn = 0$ ; Для уравнения (2.4) на обогреваемой поверхности задаются условия Г<sup>о</sup> рода:  $a^{\text{int}} = \frac{6\alpha_w}{d_{bw}}$

Согласно RPI модели [7] для уравнения (2.5) на обогреваемой поверхности плотность теплового потока делится на три составные части:  $\alpha_\ell Q_w = Q_l + q_e + Q_q$ , где  $Q_w$  – плотность теплового потока, падающего на

нагреваемую поверхность,  $Q_1$  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:  $Q_1 = h_{lw}(T_w - T_l)(1 - \Omega)$ , где  $h_{lw}$  коэффициент теплоотдачи для единичной фазы, вычисляется либо по логарифмическому закону (если поток турбулентный), либо по закону Фурье (если поток ламинарный).

$$q_E = \frac{\pi d_{bw}^3 n f \rho_v L}{6}, \quad f = \left( \frac{4g(\rho_l - \rho_v)}{3d_{bw}\rho_l} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \tau_w = \frac{0.8}{f}, \quad Q_q = 2f\Omega \left( \frac{\tau_w \lambda_l \rho_l C_{pl}}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} (T_w - T_l),$$

где  $f$  - частота отрыва пузырьков от стенки, определяемая из соотношения: Эффективная площадь нагреваемой поверхности занятая пузырьками пара составляет:  $\Omega = \min(\pi d_{bw}^2 n, 1.0)$  .

Постановка граничных условий для конвективного теплообмена в турбулентном режиме течения выполняется методом пристеночных функций [6]. В данной работе диаметр парового пузырька определялся, как функция недогрева  $T_{sub} = T_{sat} - T_\ell$  [9]:

$$d_v = \begin{cases} 1.5 \cdot 10^{-4}, & T_{sub} > 13.5K \\ 1.5 \cdot 10^{-3} - 10^{-4} T_{sub}, & 0 < T_{sub} < 13.5K \\ 1.5 \cdot 10^{-3}, & T_{sub} < 0 \end{cases}$$

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ КОДА GIDR-3M

Для численного моделирования течений двухфазных сред использована версия трехмерного кода GIDR-3M, ранее адаптированная к варианту модели смеси, представленной выше, которая на данном этапе работы была дополнена моделями учета слияния и деления паровых пузырей, использующих уравнение переноса для концентрации межфазной площади. Проведены верификационные расчеты процесса подкипания теплоносителя для топливной сборки FRIGG (FT-6a) [7], состоящей из

шести электрически нагреваемых стержней в цилиндрическом сосуде давления. Поперечное сечение топливной сборки приведено на рис. 1, а конечно-элементная сетка для CFD модели на рис. 2.

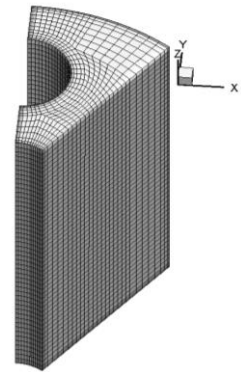
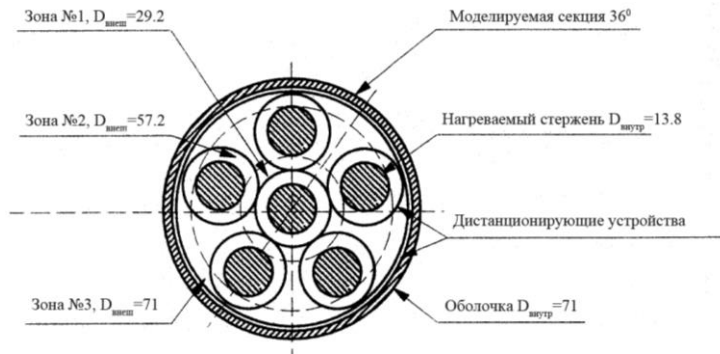


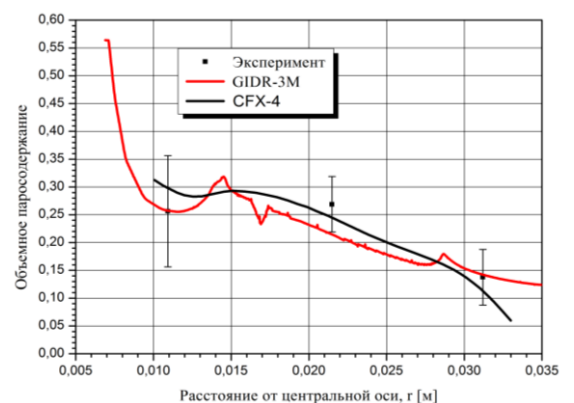
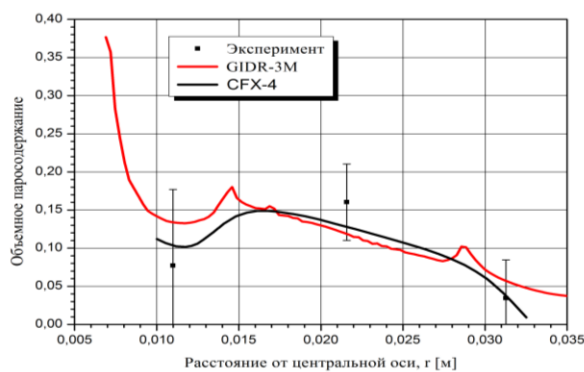
Рис. 1. Поперечное сечение сборки FT-6а.

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/(м<sup>2</sup>·с), температура недогрева на входном участке  $T_{sub} = 4.5$  К, плотность теплового потока на обогреваемых поверхностях 522 кВт/м<sup>2</sup>.

На рис. 3 представлены результаты сравнения расчета с экспериментальными распределениями паровой фракции, осредненными по азимутальному углу в поперечном сечении на расстояниях 0,304 м, 0,713 м и 1,148 м от входа в сборку.



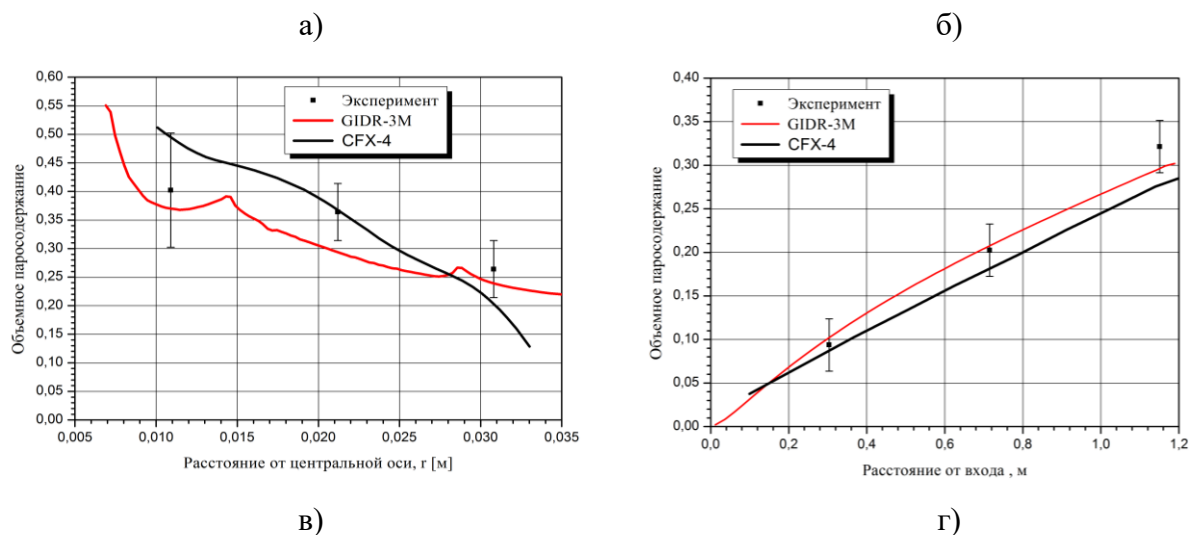


Рис. 3. Распределение паросодержания (а, б), в) -осредненного по азимутальному углу в поперечных сечениях:  $z=0,304, 0,713, 1.148$  м, г) - осредненного в поперечном сечении по длине сборки).

На рис. 3г представлены результаты сравнения расчета с экспериментальными данными по распределениям осредненного в поперечном сечении паросодержания по длине сборки.

На рис. 4 и 5 представлены результаты в виде изолиний, полученные по коду GIDR-3M, распределения температуры жидкости (воды) и паросодержания соответственно в поперечных сечениях сборки на расстояниях 0,304 м, 0,713 м и 1,148 м от входа в сборку.

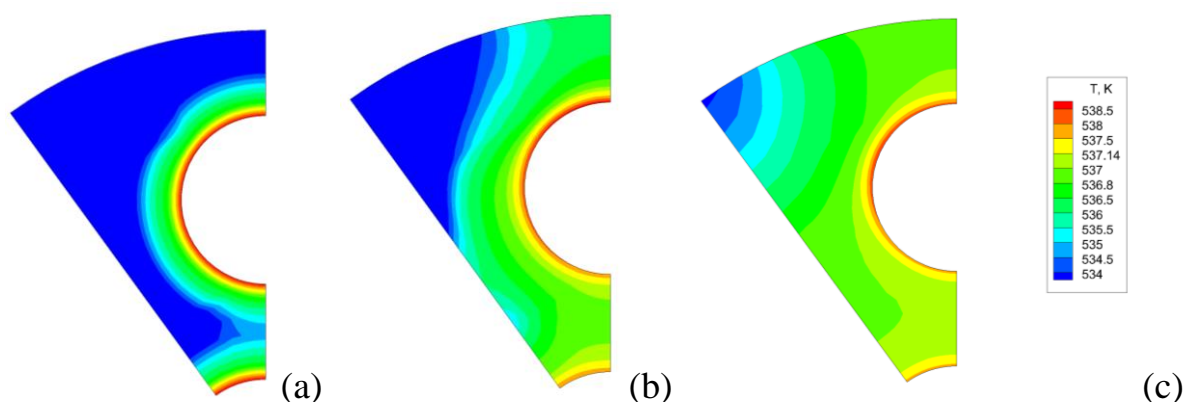


Рис. 4. Распределения температуры в жидкости (воде) в поперечных сечениях на расстояниях 0,304 м (а), 0,713 м (б) и 1,148 м (в) от начала сборки.



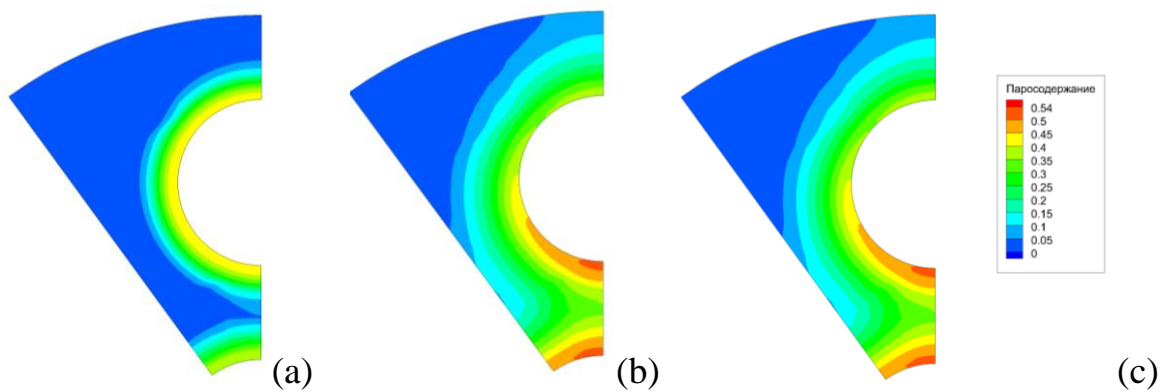


Рис. 5. Распределения паросодержания в поперечных сечениях на расстояниях 0,304 м (а), 0,713 м (b) и 1,148 м (с) от начала сборки.

На рис. 3-5 представлены результаты сравнения расчета с экспериментальными данными по распределениям осредненного паросодержания по длине сборки в поперечных сечениях 1-ой, 2-ой и 3-ей зон (см. рис. 1).

## ВЫВОДЫ

Разработаны модель, кипения недогретой жидкости теплоносителя с учетом течения пароводяной смеси и реализована в отечественном 3D коде GIDR-3M. 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.