

РАЗВИТИЕ CFD КОДА GIDR-3M ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КИПЕНИЯ НЕДОГРЕТОЙ ЖИДКОСТИ

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

¹ *НИЦ «Курчатовский институт»*

² *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН*

Отечественный, исследовательский CFD код GIDR-3M

Разработка началась в 1997 г.

Расчет стационарных и нестационарных полей скорости и температуры в жидких и газовых средах и температуры в твердых телах.

Код аттестован в 2010г. в НТЦ ЯРБ и применяется для расчета ядерных энергетических установок (ЯЭУ). Регистрационный номер аттестационного паспорта ПС 271, дата выдачи 18.02.2010.

Возможности моделирования включают:

- несжимаемая и слабо сжимаемая среда
- ламинарные и турбулентные течения (к-ε модель) и тепломассообмен
- вынужденная и естественная конвекция
- теплообмен излучением
- течения с вращением типа ротор статор
- течения в подвижных объектах
- горение и перенос массовых фракций химических веществ
- приближение пористого тела
- плавление и затвердевание.
- кипение недогретой жидкости (RPI модель)

Интеграция с другими кодами для решения междисциплинарных задач

- Расчет точечной нейтронной кинетики для учета изменения поля энерговыделения в активной зоне ядерного реактора.
- Одномерный многофазный теплогидравлический код Serpent
- Отработка интерфейса связи с нейтронно-физическим кодом MCU (метод Монте-Карло) на примере космического ядерного реактора ТОПАЗ.

Расчетные сетки и численные методы

- Структурированные сетки, содержащие произвольные гексаэдры и треугольные призмы.
- Универсального генератора нет, требуется ручная разбивка геометрии на блоки и заполнение их структурированной сеткой.
- Можно использовать сетку из других генераторов.
- Конечно-объемный метод дискретизации дифференциальных уравнений.
- Связка переменных давление-скорость.
- Первый порядок аппроксимации по пространству.
- Неявная схема интегрирования по времени.
- Метод Гаусса-Зейделя для СЛАУ с несимметричной матрицей.
- Уравнение Пуассона для поправки давления решается методом сопряженных градиентов с предобуславливанием неполным разложением Холецкого, а также с локальным шагом по времени.

Математическая модель кипения недогретой жидкости

- ДВУХФАЗНАЯ ГОМОГЕННАЯ МОДЕЛЬ СО СКОРОСТЬЮ ДРЕЙФА
- МОДЕЛЬ ТУРБУЛЕНТНОСТИ: $k-\varepsilon$
- НЕДОГРЕТАЯ ЖИДКОСТЬ:
Температура и физические свойства пара принимаются на линии насыщения.

RPI модель

$$Q_w = Q_f + Q_e + Q_q$$

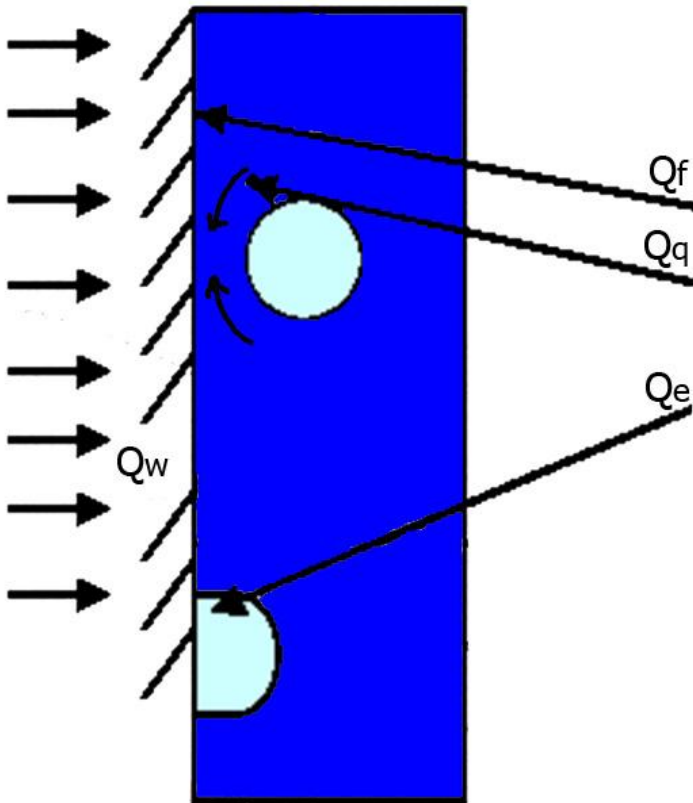
где

Q_w - плотность теплового потока, падающего на нагреваемую поверхность,

Q_f - плотность конвективного теплового потока,

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



$$Q_e = \frac{\pi d_{bw}^3 n f \rho_v L}{6}, \quad f = \left(\frac{4g(\rho_l - \rho_v)}{3d_{bw} \rho_l} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$Q_q = 2f\Omega \left(\frac{\tau_w \lambda_l \rho_l C_{pl}}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} (T_w - T_l), \quad \tau_w = \frac{0.8}{f}$$

$$Q_f = h_{lw} (T_w - T_l) (1 - \Omega),$$

где h_{lw} коэффициент теплоотдачи для жидкой фазы, вычисляется либо по логарифмическому закону (если поток турбулентный), либо по закону Фурье (если поток ламинарный).

$$\Omega = \min(\pi d_{bw}^2 n, 1)$$

-доля площади нагреваемой поверхности занятая пузырьками пара

ДОПУЩЕНИЯ И ПРЕДПОЛОЖЕНИЯ

f_{drag} определяется согласно модели Shiller and Naumann [1]:

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 \text{Re}^{0.687} & \text{Re} \leq 1000 \\ 0.0183 \text{Re} & \text{Re} > 1000 \end{cases} \quad \text{Re} = \frac{\rho_1 |\vec{V}_v - \vec{V}_l|}{\mu_1} d_v,$$

ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

на обогреваемой поверхности задаются условия:

$$d_{bw} = \text{MIN}(0.0014, 0.0014 \exp(-\frac{T_{sat} - T_l}{45})), \quad n = (185(T_w - T_{sat}))^{1.805}$$

Для уравнения паровой фазы на обогреваемой поверхности задается условие непроницаемости. A_w представляет отношение площади поверхности соседней с нагреваемой стенкой ячейки к ее объему [8].

диаметр парового пузырька определялся, как функция недогрева $T_{sub} = T_{sat} - T_l$ [9]:

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

УРАВНЕНИЯ (1)

ГОМОГЕННАЯ МОДЕЛЬ СО СКОРОСТЬЮ ДРЕЙФА

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m \vec{V}_m) = 0$$

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

Уравнение для объемного паросодержания:

$$\frac{\partial \alpha_v}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_v \vec{V}_v) = \text{div} \left(\frac{\mu_m + \mu_t}{\rho_\ell Sh} \nabla \alpha_v \right) - \frac{G_v}{\rho_v} + Q_e A_w / (\rho_v (L + C_{pl} (T_{sat} - T_\ell)));$$

$$G_v = \frac{ha^{\text{int}} (T_{sat} - T_\ell)}{L}; \quad a^{\text{int}} = \frac{6\alpha_v}{d_v}$$

УРАВНЕНИЯ (2)

Уравнение энергии для жидкой фазы:

$$\frac{\partial \rho_\ell C_{pl} \alpha_\ell T_\ell}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_\ell C_{pl} \alpha_\ell \vec{V}_\ell T_\ell) = \text{div} \left(\alpha_\ell \left(\lambda_\ell + \frac{\mu_t C_{pl}}{\text{Pr}_t} \right) \nabla T \right) + G_v H_v$$

G_v - массовая скорость конденсации при $T_{\text{sat}} > T_l$, или как массовая скорость парообразования в противоположном случае.

h – коэффициент межфазного теплообмена определяется по зависимости:

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

$$\vec{V}_m = \frac{\alpha_l \rho_l \vec{V}_l + \alpha_v \rho_v \vec{V}_v}{\rho_m}, \quad \vec{V}_{dr} = \vec{V}_v - \vec{V}_m, \quad \vec{V}_{vl} = \vec{V}_v - \vec{V}_l$$

Вектор относительной скорости определяется согласно зависимости:

$$\vec{V}_{vl} = \frac{(\rho_v - \rho_m) d_v^2 \vec{a}}{18 \mu_1 f_{\text{drag}}}, \quad \vec{a} = \vec{g} - (\vec{V}_m \cdot \nabla) \vec{V}_m - \frac{\partial \vec{V}_m}{\partial t}, \quad d_v \text{ – диаметр пузырька пара}$$

Геометрия (1)

Верификационные расчеты процесса подкипания теплоносителя для топливной сборки FRIGG (FT-6a) [7], состоящей из шести электрически нагреваемых стержней в цилиндрическом сосуде давления

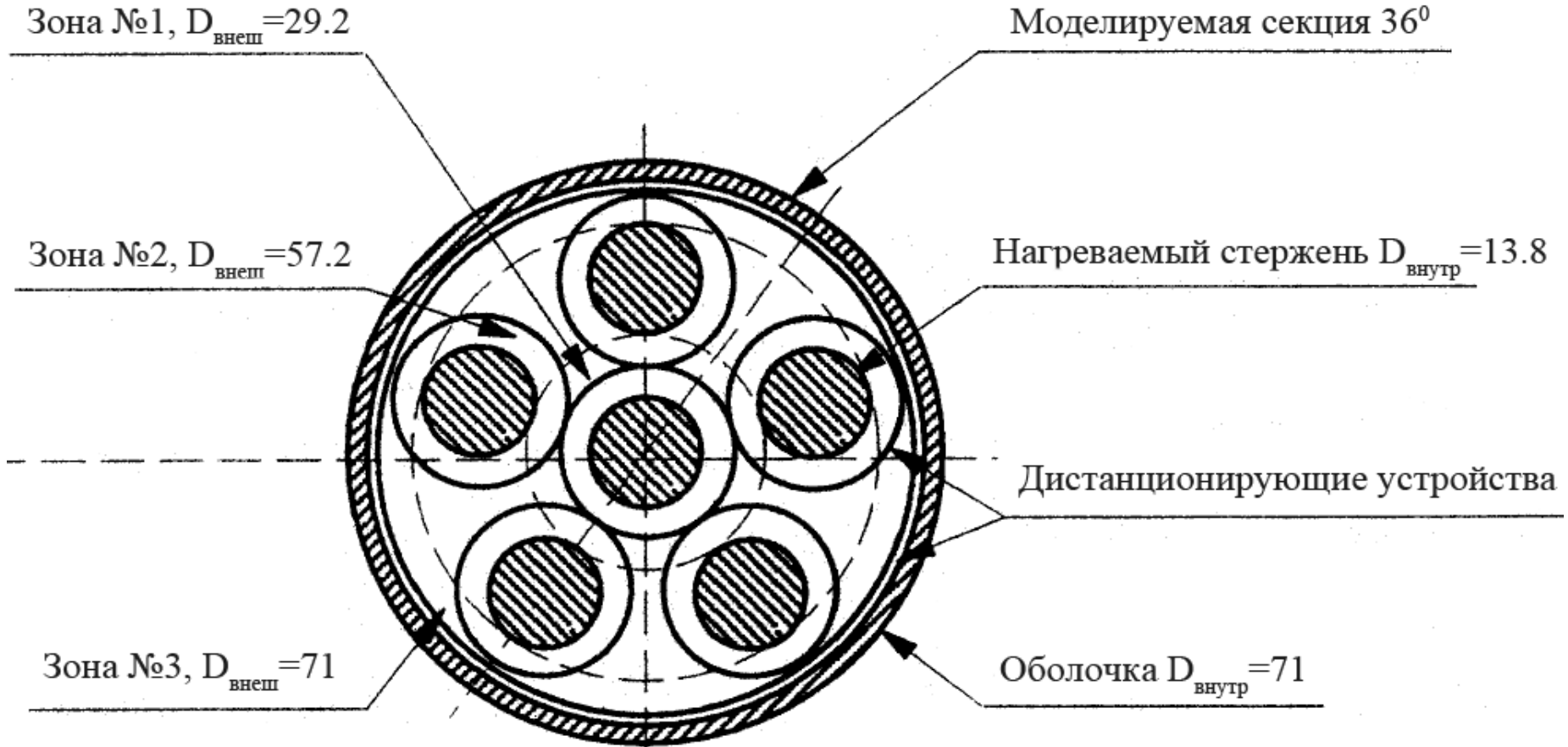
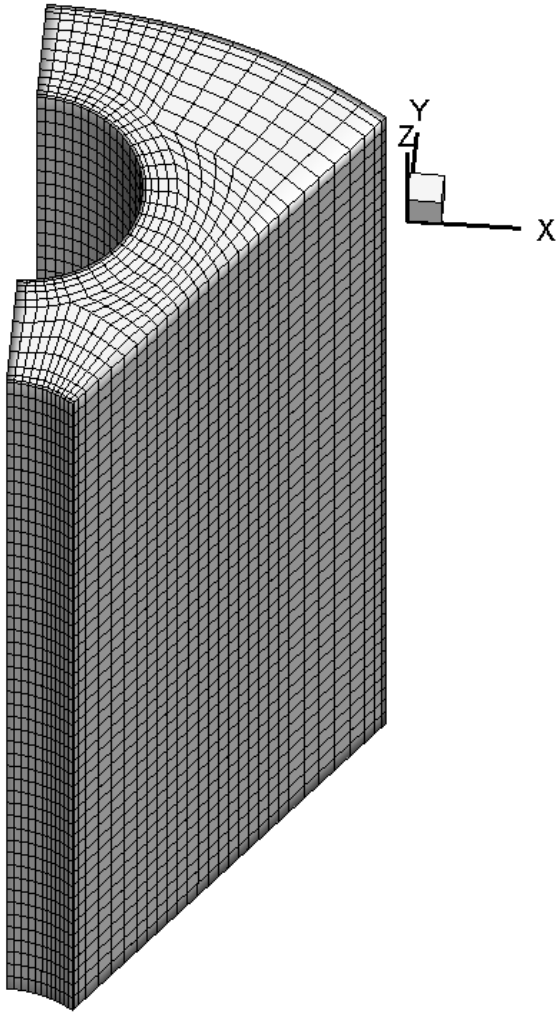


Рис. 1

Длина в аксиальном направлении (ось Z) 1.2 м, внешний диаметр 71 мм, диаметр нагреваемого стержня 13.8 мм.

Геометрия (2)



Верификационные расчеты процесса подкипания теплоносителя для топливной сборки FRIGG (FT-6a) [7], состоящей из шести нагреваемых стержней в цилиндрическом сосуде.

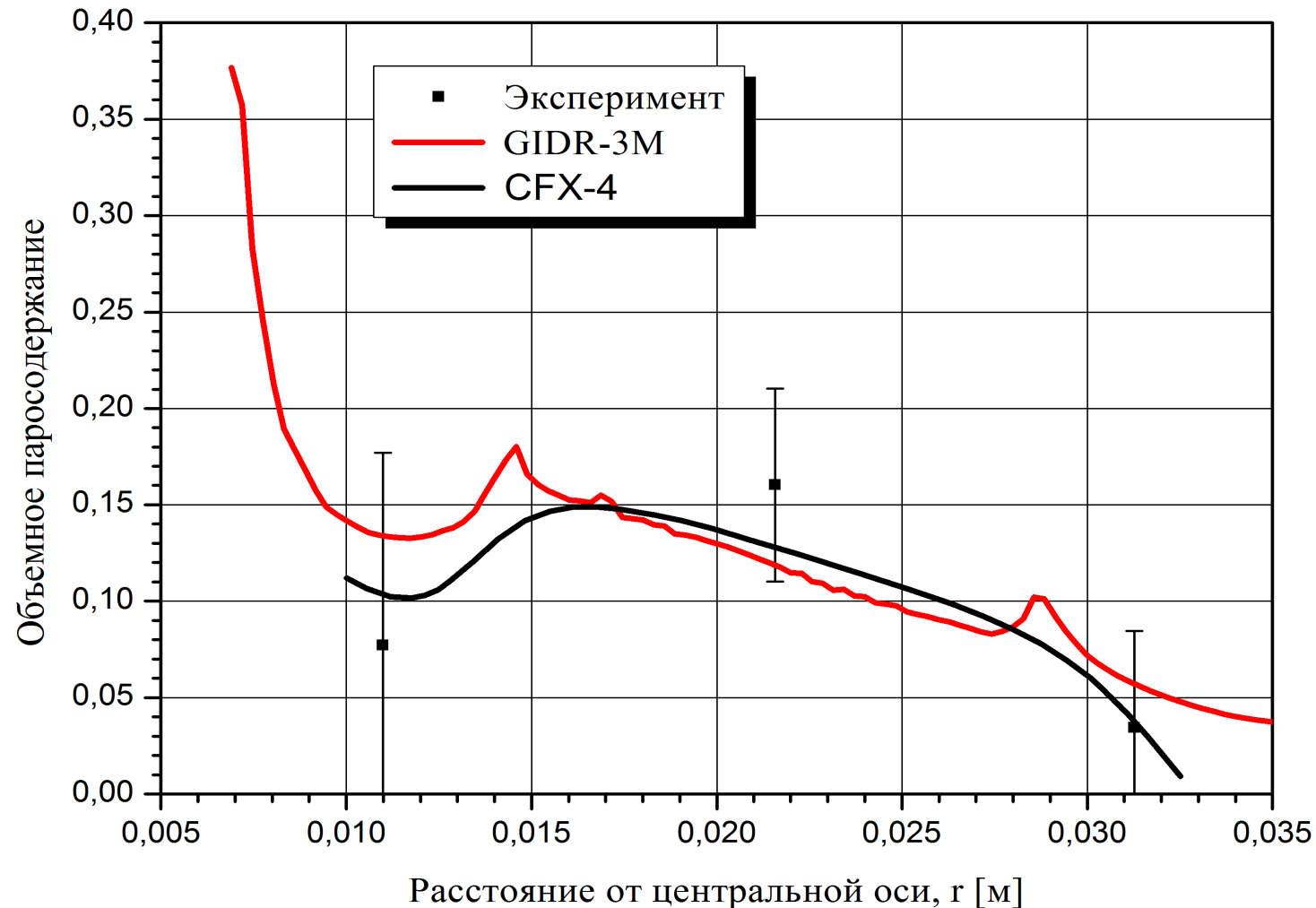
Длина в аксиальном направлении (ось Z) 1.2 м,
внешний диаметр 71 мм,
диаметр нагреваемого стержня 13.8 мм.

Рис. 2. Расчетная область моделирования с сеткой.

Экспериментальные условия

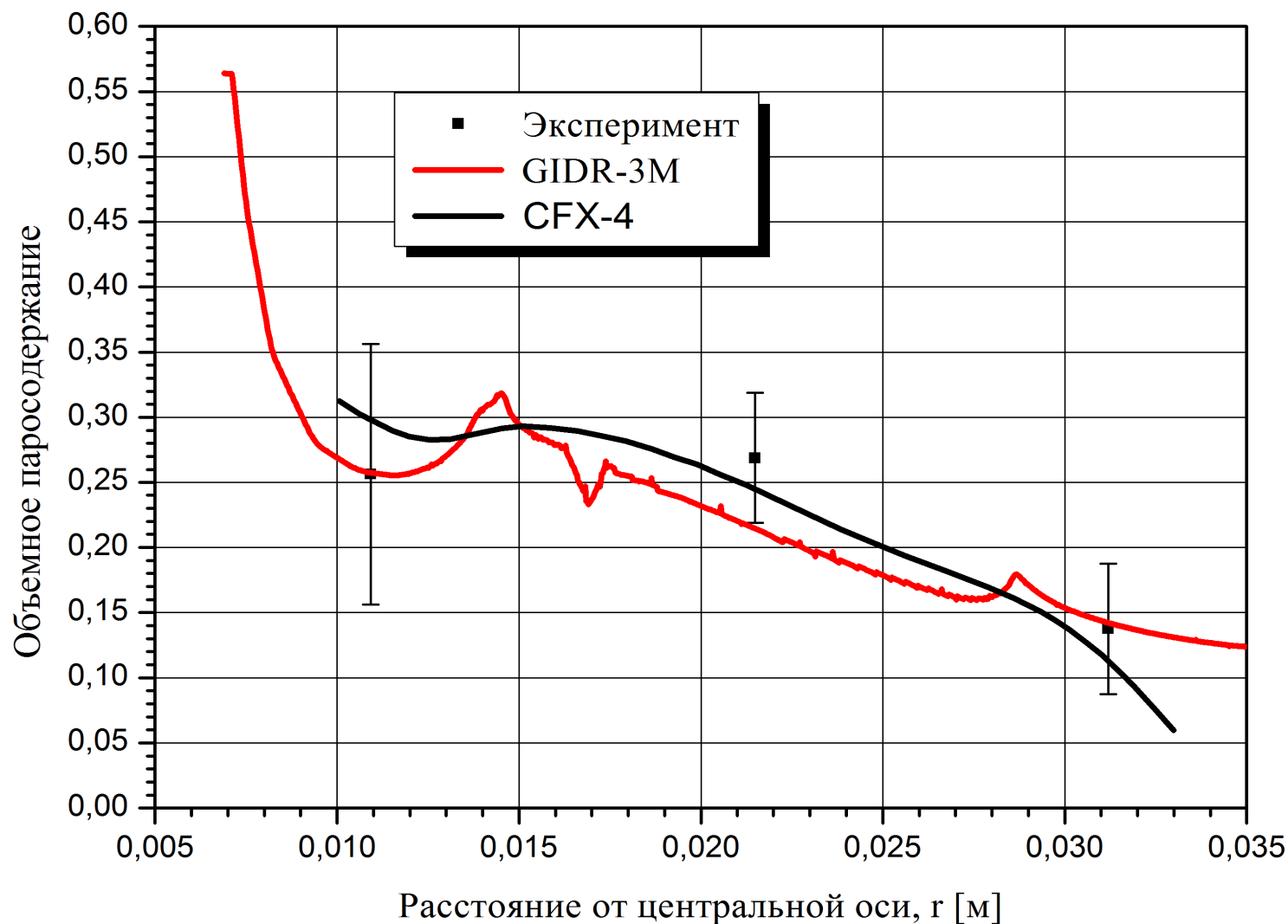
P_{BX} [МПа]	T_{sat} [К]	$T_{\text{sub BX}}$ [К]	Q_w [кВт/м ²]	G [кг/м ² с]
5	537	4,5	522	1163

Результаты расчета в сравнении с экспериментальными данными (1)



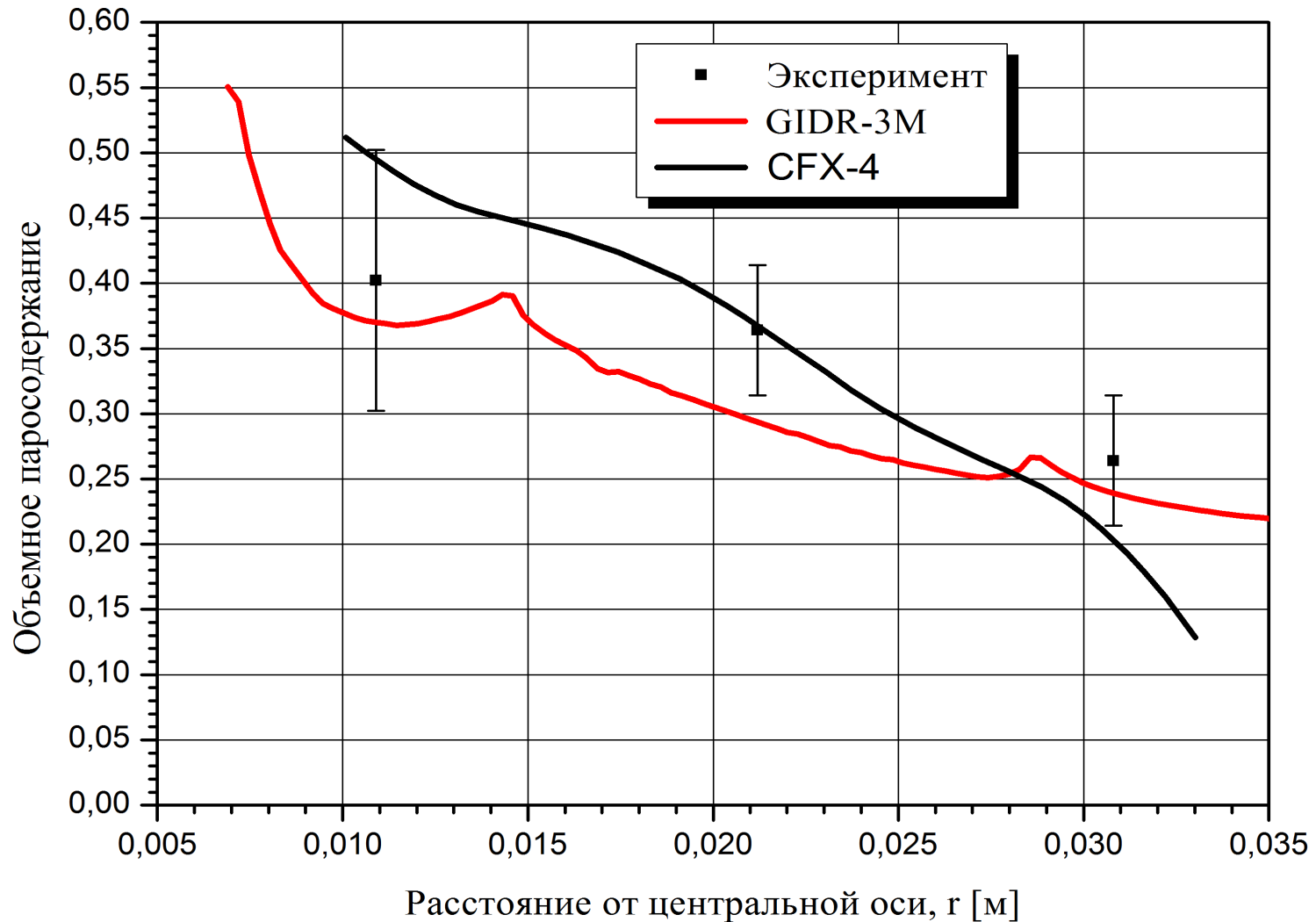
Распределения паровой фракции, осредненные по азимутальному углу в поперечном сечении на расстояниях 0,304 м от входа в сборку

Результаты расчета в сравнении с экспериментальными данными (2)



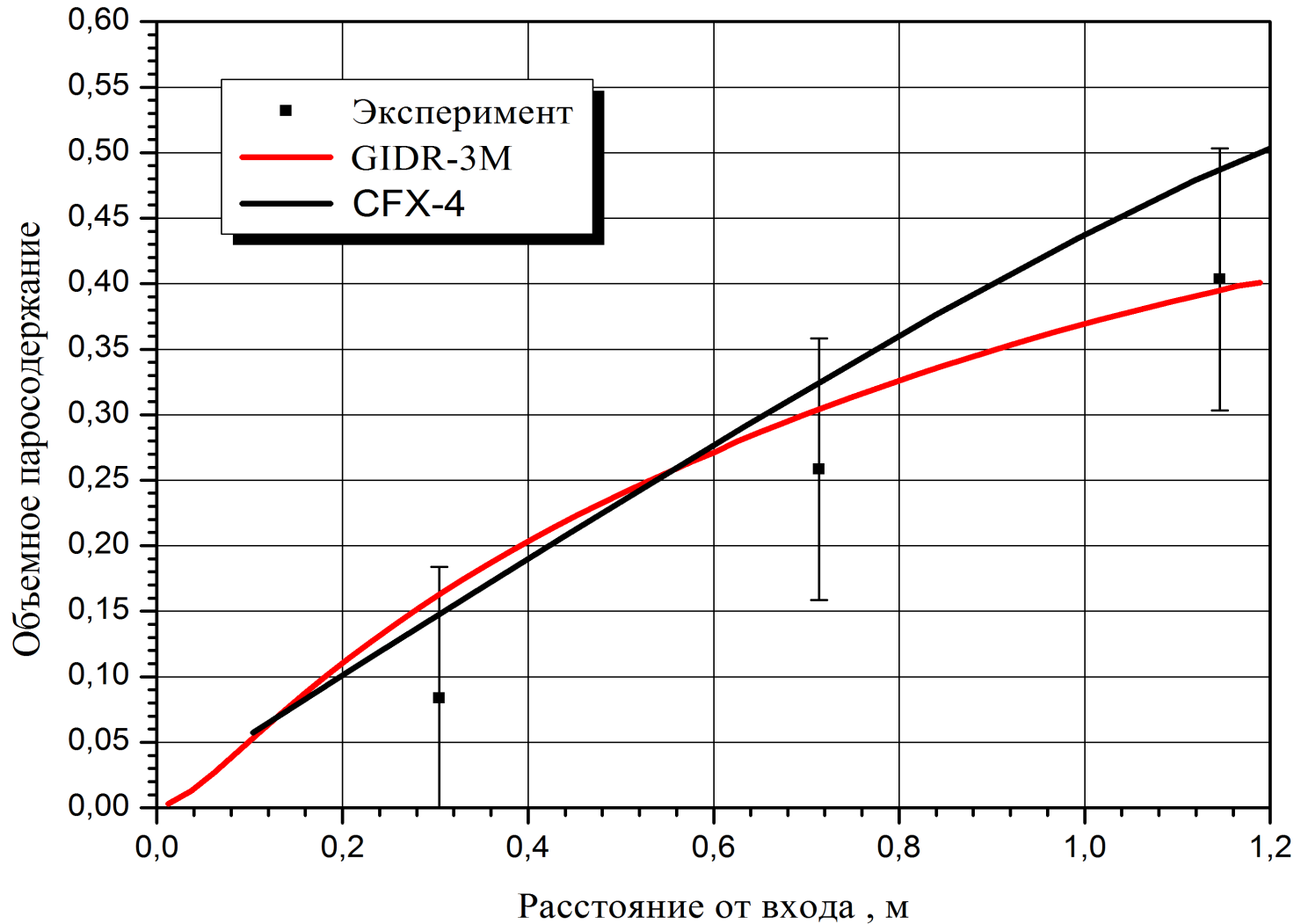
Распределения паровой фракции, осредненные по азимутальному углу в поперечном сечении на расстояниях 0,713 м от входа в сборку

Результаты расчета в сравнении с экспериментальными данными (3)



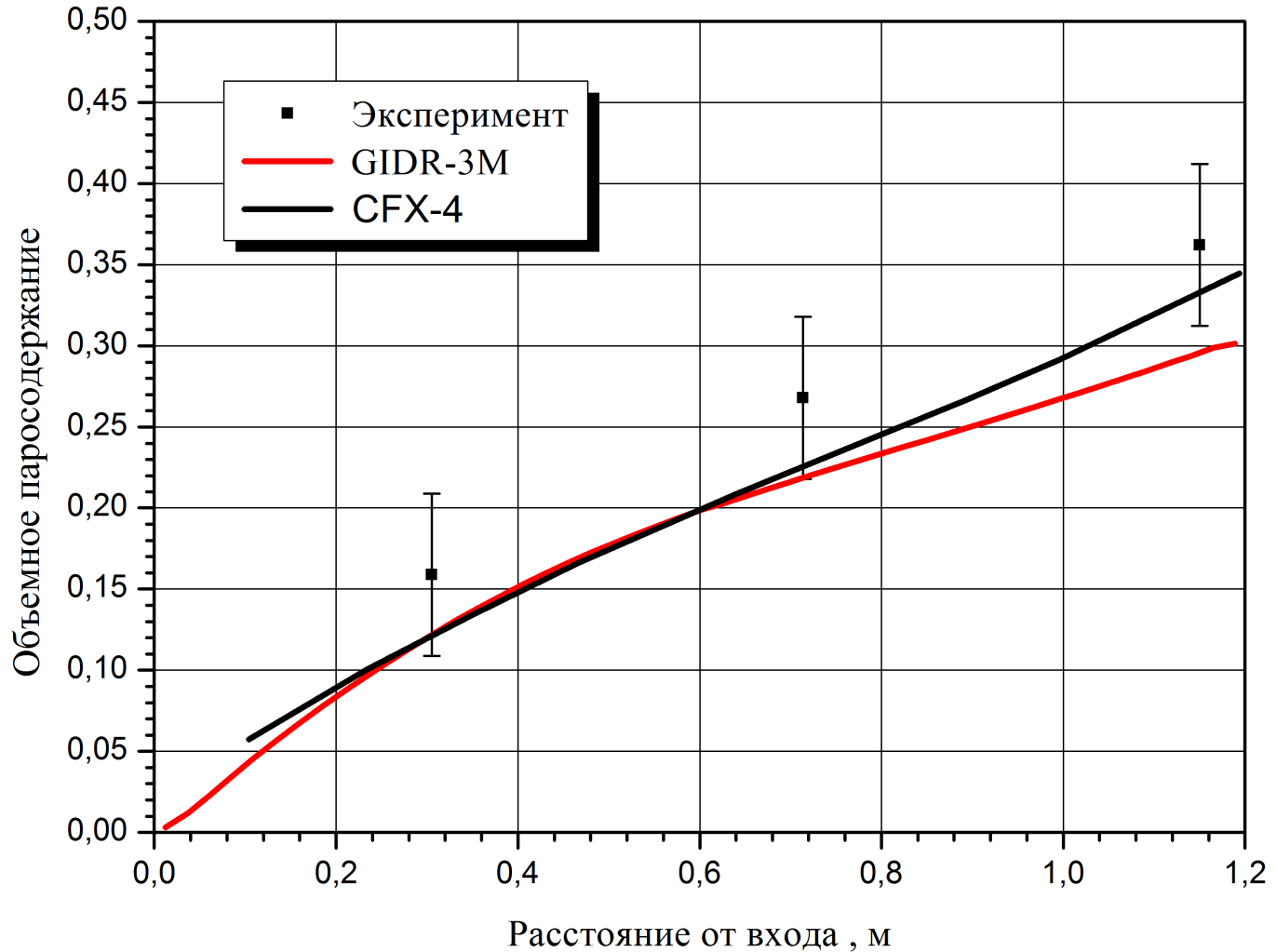
Распределения паровой фракции, осредненные по азимутальному углу в поперечном сечении на расстояниях 1,148 м от входа в сборку

Результаты расчета в сравнении с экспериментальными данными (4)



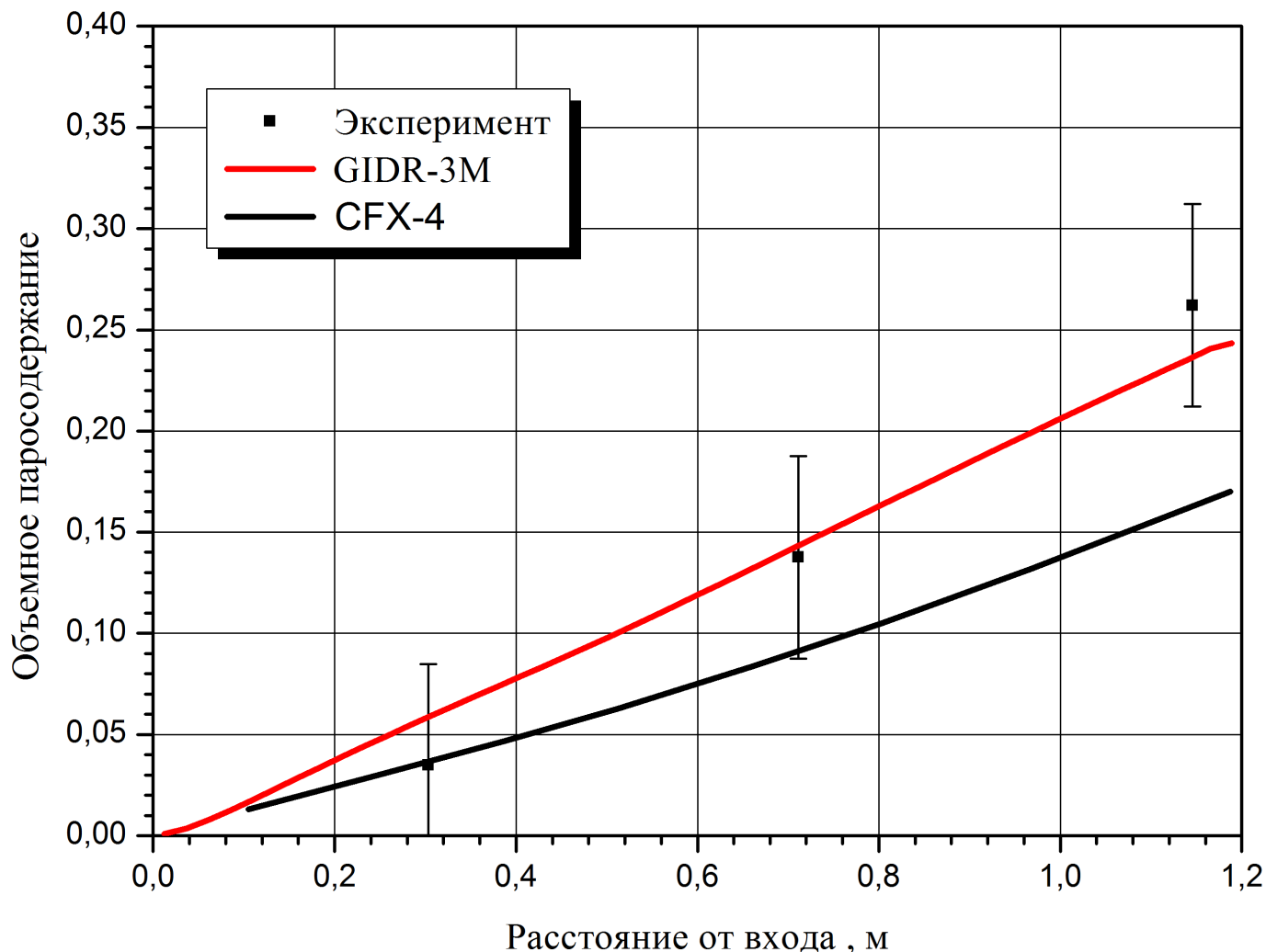
Распределение осредненного паросодержания по длине сборки в поперечном сечении 1-ой зоны (см. рис. 1)

Результаты расчета в сравнении с экспериментальными данными (5)



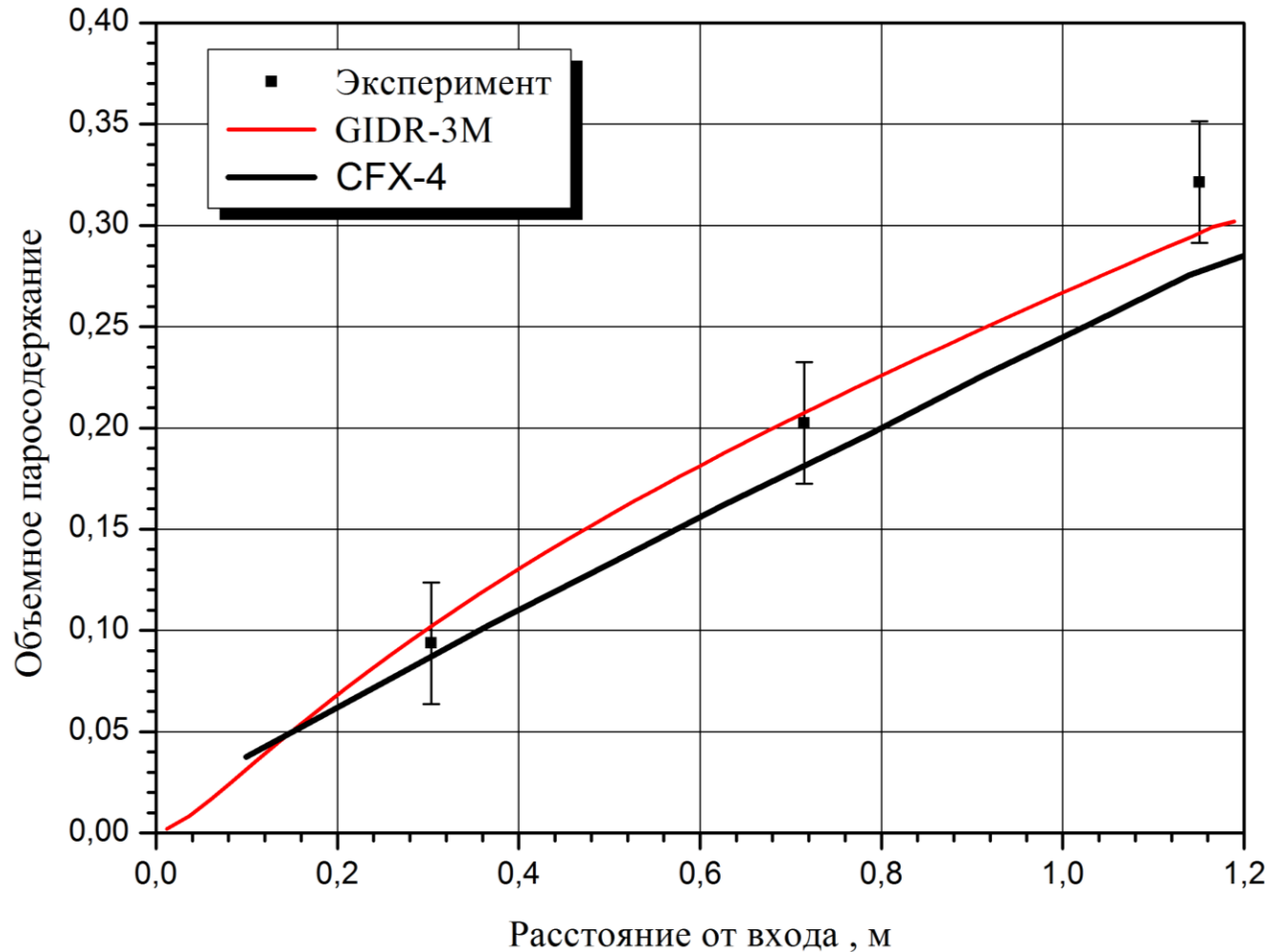
Распределение осредненного паросодержания по длине сборки в поперечном сечении 2-ой зоны (см. рис. 1)

Результаты расчета в сравнении с экспериментальными данными (6)



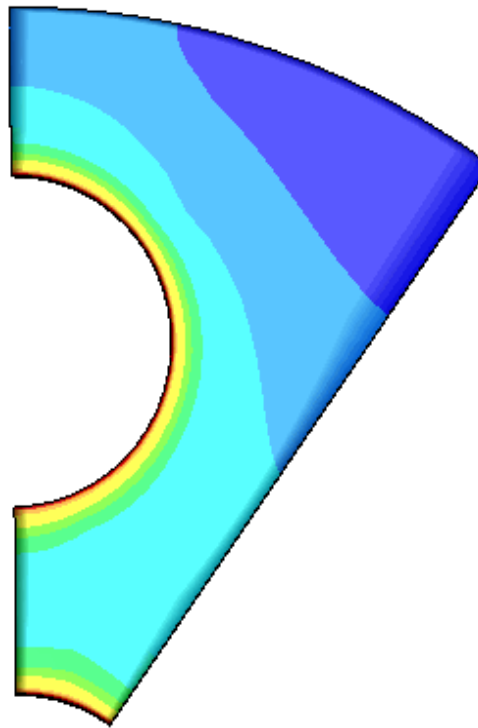
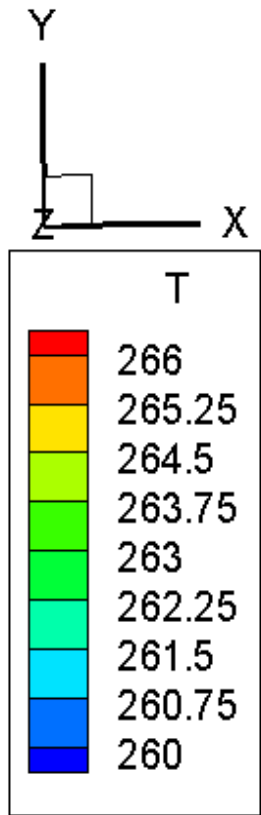
Распределение осредненного паросодержания по длине сборки в поперечном сечении 3-ой зоны (см. рис. 1)

Результаты расчета в сравнении с экспериментальными данными (7)

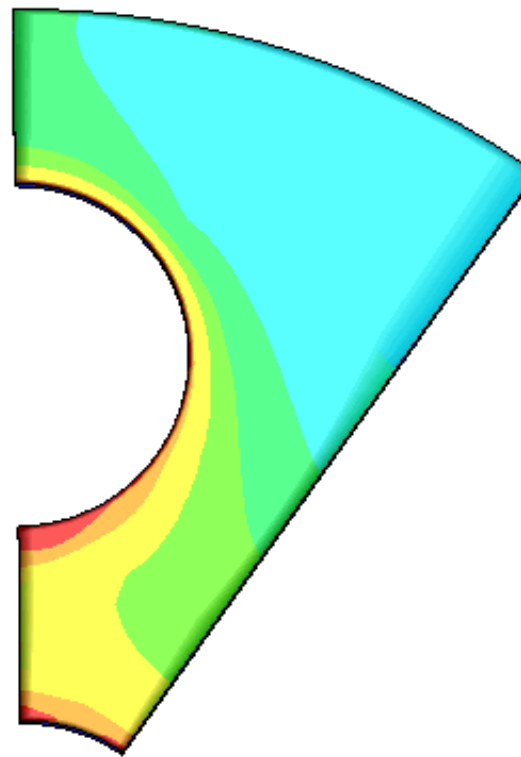


Распределение осредненного в поперечном сечении паросодержания по длине сборки ₂₀

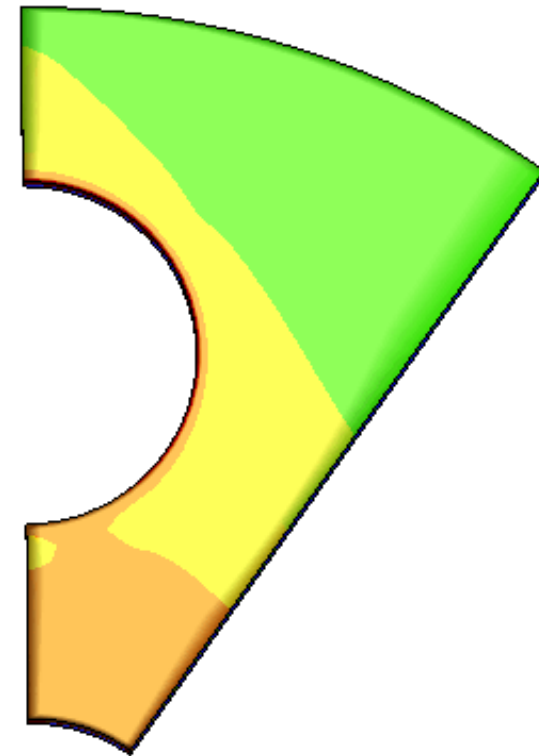
Изотермы



(a)



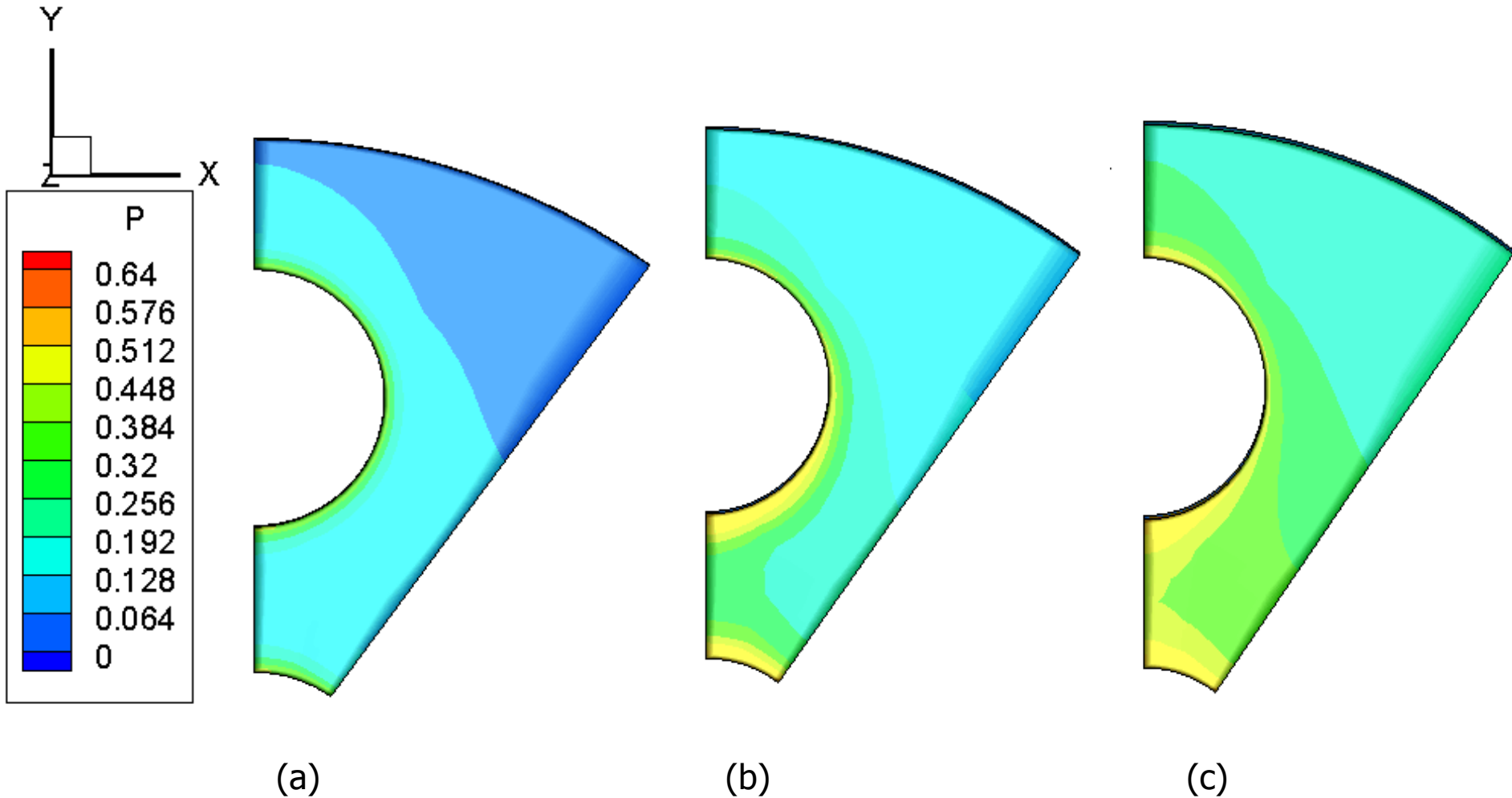
(b)



(c)

Распределения температуры в жидкости (воде) в поперечных сечениях на расстояниях 0,304 м (a), 0,713 м (b) и 1,148 м (c) от начала сборки

Паросодержание



Распределения паросодержания в поперечных сечениях на расстояниях 0,304 м (a), 0,713 м (b) и 1,148 м (c) от начала сборки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Разработана модель, для численного моделирования процессов подкипания теплоносителя с учетом течения пароводяной смеси.
- Сравнение результатов расчетов по коду GIDR-3M с экспериментальными данными показало хорошее качественное и количественное согласие.
- Отличие от экспериментальных данных определяется точностью используемых исходных данных и замыкающих соотношений.

Литература

1. L. Shiller and Z. Naumann. Z. Ver. Deutsch Ing., 77:318, 1935.
2. 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.
3. S.Kim Q. Wu and M. Ishii. One-group Interfacial Area Transport in Vertical Bubbly Flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 41:1103-1112, 1997.
4. M. Ishii and S. Kim. Micro Four-Sensor Probe Measurement of Interfacial Area Transport for Bubbly Flow in Round Pipes. *Nuclear Engineering and Design*, 205:123-131, 2001
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. Белов И.А., Кудрявцев Н.А. Теплоотдача и сопротивление пакетов труб. Л.: Энергоатомиздат, 1987, 223 с.
7. 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.
8. 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.
9. Kurul, N. and Podowski, M.Z., 1990, Multidimensional effects in forced convection subcooled boiling subcooled boiling, in Ninth International Heat Transfer Conferense, Jerusalem, Israel, I-BO-04, pp 21-26.

Спасибо за внимание