

УДК 621.039

С.М. Дмитриев, А.А. Добров, М.А. Легчанов, А.Е. Хробостов

**ВЕРИФИКАЦИЯ CFD-ПРОГРАММЫ ЛОГОС НА БАЗЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НГТУ ПО ИЗУЧЕНИЮ ЛОКАЛЬНОГО МАССООБМЕНА ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ТВС**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Посвящена расчетному моделированию процессов перемешивания теплоносителя во фрагменте топливной сборке ядерного реактора с перемешивающей решеткой. Для проведения расчетов использовался программный комплекс «ЛОГОС 5.0», результаты расчетов в котором сравнивались с экспериментальными данными, а также с результатами, полученными в аналогичных программах Ansys CFX 14.0 и Ansys FLUENT 14.0.

*Ключевые слова:* ядерный реактор, вычислительная гидродинамика, тепловыделяющая сборка, перемешивающая решетка.

**Введение**

В данной работе проводится сравнение результатов, полученных в программах вычислительной гидродинамики «ЛОГОС 5.0», с результатами экспериментальных исследований перемешивания потока теплоносителя в модели тепловыделяющей сборки (ТВС), проведенных на аэродинамическом стенде НГТУ им. Р.Е. Алексеева [1-3], а также с результатами кросс-верификационных расчетов, выполненных в программах Ansys CFX 14.0 и Ansys FLUENT 14.0.

Актуальность проведения расчетных исследований локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВС связана с внедрением современных программ вычислительной гидродинамики в практику теплогидравлического расчета активных зон ядерных реакторов. CFD-программы позволяют учесть локальные гидродинамические эффекты в потоке теплоносителя, вызванные за счет установки дополнительных турбулизаторов потока, и спрогнозировать отдельные теплогидравлические характеристики элементов ТВС еще на этапе проектирования, тем самым сократить объем экспериментальных исследований.

Пакет программ «ЛОГОС», разработанный в ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», предназначен для решения связанных и сопряженных задач тепломассопереноса и гидродинамики на параллельных ЭВМ с десятками тысяч расчетных ядер. Пакет программ «ЛОГОС» позволяет численно моделировать течения вязкого несжимаемого газа с учетом турбулентного перемешивания, процессы распространения тепла в твердом теле с учетом излучения, течения в анизотропных пористых средах и другие процессы [4–8].

**Описание методики проведения эксперимента**

Экспериментальный стенд для исследований локальных характеристик межъячеечного массообмена и гидродинамических характеристик потока теплоносителя в модели ТВС представляет собой аэродинамический разомкнутый контур, через который прокачивается воздух. Экспериментальная модель (ЭМ), представляющая собой фрагмент ТВС с треугольной упаковкой твэлов (рис. 1), выполнена в увеличенном масштабе и состоит:

- из девятнадцати цилиндрических твэлов-имитаторов;
- устройства фиксации датчика;
- трех поясов дистанционирующих решеток (ДР);
- пояса пластинчатой перемешивающей решетки (ПР).



Рис. 1. Общий вид экспериментальной модели

Методика проведения экспериментальных исследований основана на методе диффузии пассивной примеси в основной поток теплоносителя. В эксперименте в качестве примеси использовался пропановый трассер.

Основной целью данного эксперимента, используемого в качестве верификационной базы для CFD-программ, являлось получение данных о распределении концентрации трассера по центрам всех условных ячеек ЭМ. Поперечное сечение экспериментальной модели условно разбивалось на ячейки согласно схеме, представленной на рис. 2. Каждой ячейке присваивался свой порядковый номер.

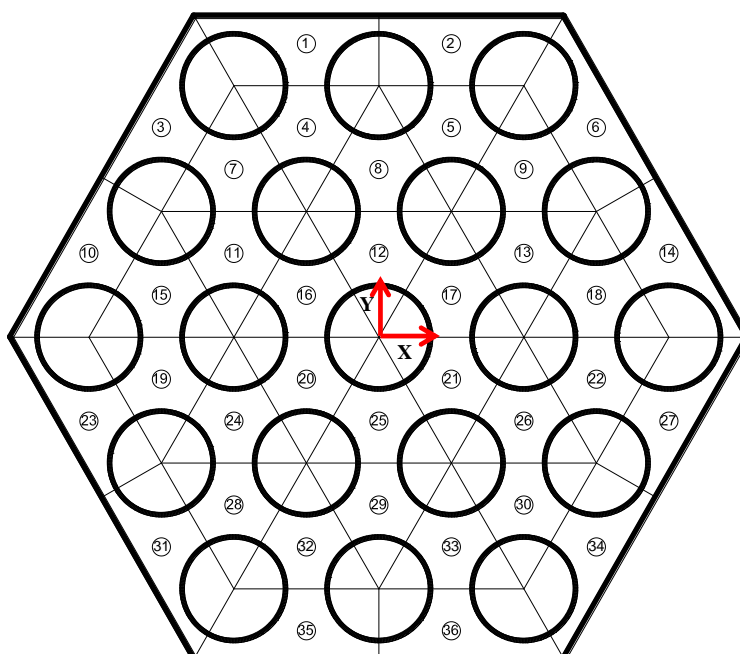
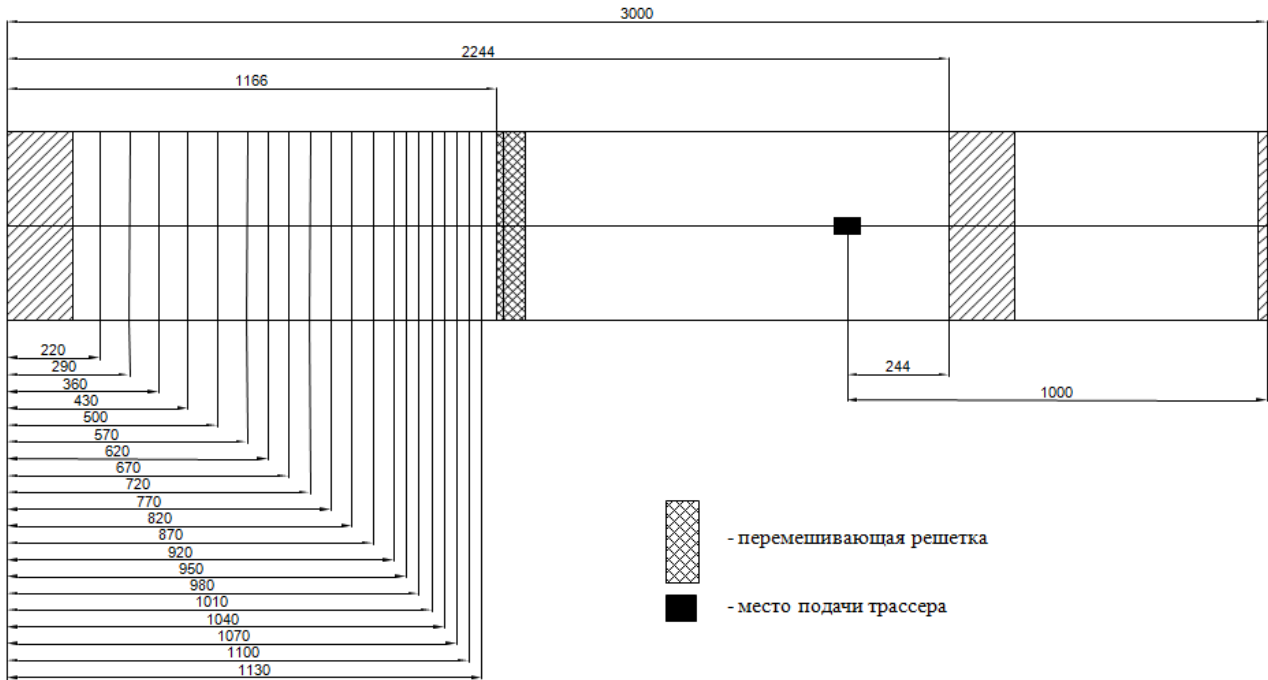


Рис. 2. Нумерация ячеек модели ТВС в поперечном сечении

Подача трассера осуществлялась в ячейку №11. За поясом ПР с помощью отборного зонда газоанализатором измерялась концентрация трассера во всех 36 ячейках по сечению модели. В каждой из ячеек производился замер концентрации по 20 сечениям по длине ЭМ (рис. 3).



**Рис. 3. Сечения отбора трассера по длине ЭМ для измерения концентрации трассера в пучке с перемешивающей решеткой**

**Постановка расчетной задачи и описание методики проведения расчетных исследований**

Модель переноса пассивной примеси реализована в программном комплексе ЛОГОС добавлением к основной системе уравнений гидродинамики уравнения переноса скалярной величины.

Уравнение переноса произвольной скалярной величины записывается в следующем виде:

$$\frac{d(\rho\phi)}{dt} + \nabla \cdot (\rho U\phi) = \nabla \cdot (D_\phi \nabla \phi) + S_\phi, \tag{1}$$

где  $U$  - скорость потока;  $\rho$  – плотность;  $D_\phi$  - диффузионная вязкость.

Для турбулентных течений, осредненных по Рейнольдсу, уравнение записывается в следующем виде:

$$\frac{d(\rho\phi)}{dt} + \nabla \cdot (\rho U\phi) = \nabla \cdot \left( \left( D_\phi + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \nabla \phi \right) + S_\phi, \tag{2}$$

где  $\mu_t$  - турбулентная вязкость;  $Sc_t$  - турбулентное число Шмидта.

При проведении расчетов использовались следующие параметры физической модели:

- тип течения – изотермическое, турбулентное;
- модель турбулентности – k- $\omega$  SST;
- пристеночная функция – All Reynolds;
- вещество – воздух при температуре 20 °С (соответствует условиям проведения физического эксперимента);

Задача расчетного исследования распределения концентрации трассера (пассивной примеси) за перемешивающей решеткой тепловыделяющей сборки разбивалась на две подзадачи (схема расчетной области представлена на рис. 4).

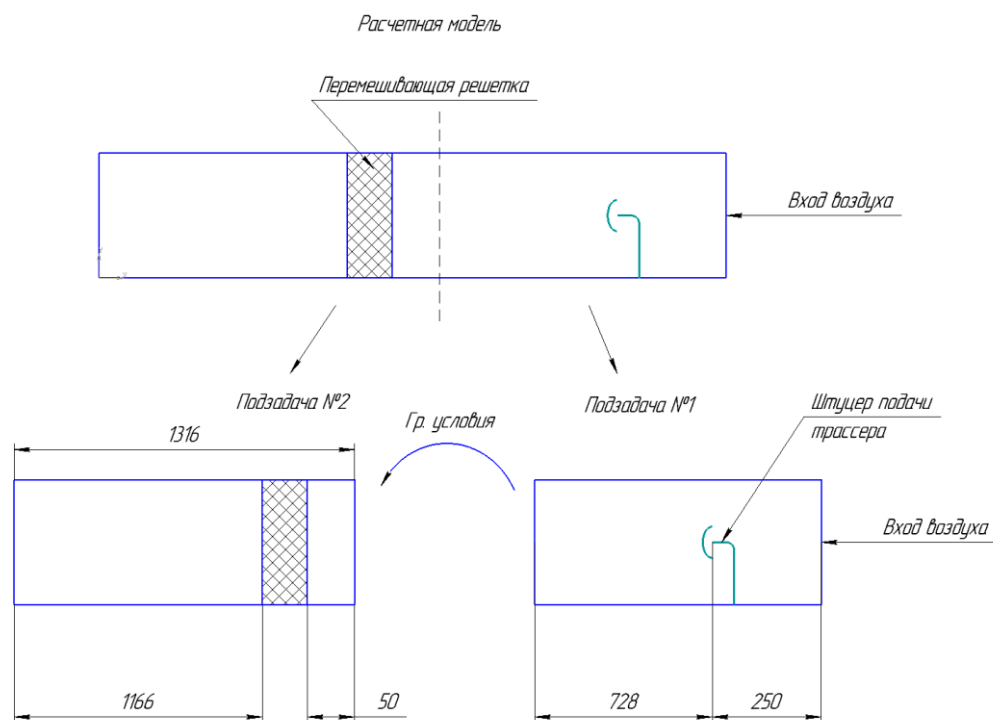


Рис. 4. Схема расчетных моделей для подзадач 1 и 2

*Подзадача 1* - строится расчетная область (рис. 5), включающая в себя имитаторы твэлов и устройство подачи трассера в модель (впускной зонд), расположение которого соответствовало экспериментальной модели. Подача трассера осуществляется в ячейку №11.

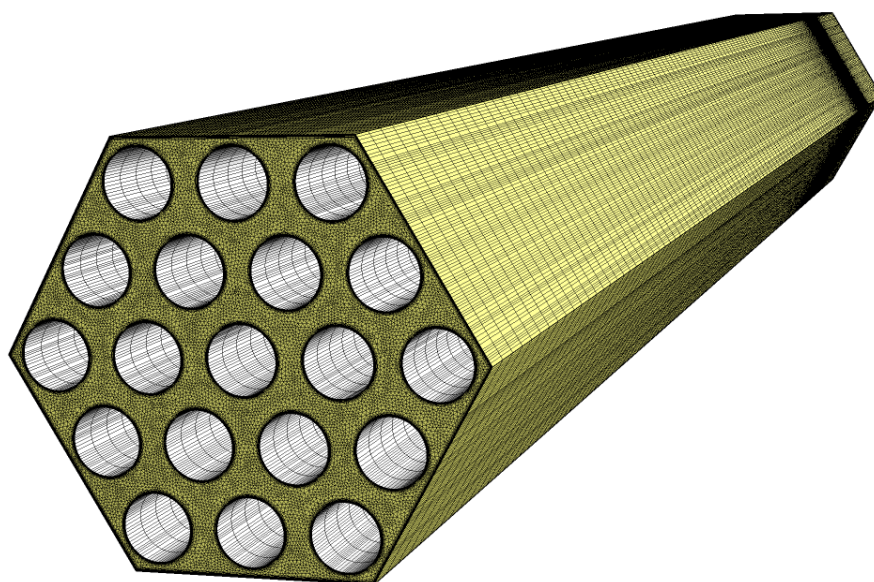


Рис. 5. Общий вид расчетной сетки для проведения расчетных исследований турбулентного перемешивания теплоносителя в «гладком» 19-стержневом фрагменте ТВС

Полученные в результате расчета подзадачи 1 данные о распределении проекций скорости теплоносителя и данные о распределении концентрации пассивной примеси на выходной границе используются для задания входных граничных условий для решения подзадачи 2.

*Подзадача 2* - строится расчетная область, включающая в себя имитаторы твэлов и перемешивающую решетку. Общий вид расчетной области представлен на рис. 6.

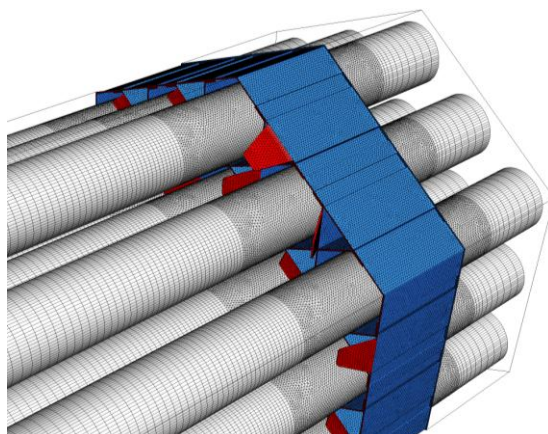


Рис. 6. Вид расчетной сетки в области перемешивающей решетки

На входе в расчетную область задаются поля проекций скорости и поле концентрации пассивной примеси, полученные на выходной границе расчетной области подзадачи 1.

### Результаты

На рис. 7 – рис. 12 представлены результаты распределения концентрации трассера за перемешивающей решеткой модели ТВС в характерных ячейках. В качестве осевой координаты на графиках использовано относительное расстояние от перемешивающей решетки  $L/d_2$ , где  $L$  – абсолютное расстояние от решетки, м;  $d_2$  – гидравлический диаметр модели ТВС, определенный на участке без перемешивающей решетки, м. Данная величина позволяет оценить эффективное расстояние воздействия решетки на поток и перенести результаты на натурную ТВС.

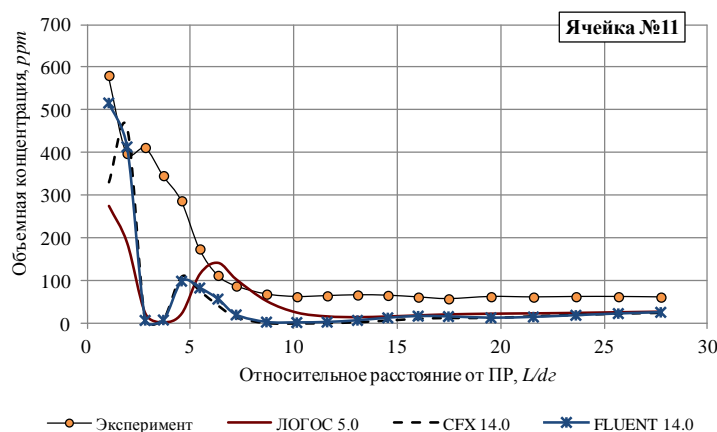


Рис. 7. Распределение концентрации трассера за ПР по длине модели в ячейке №11

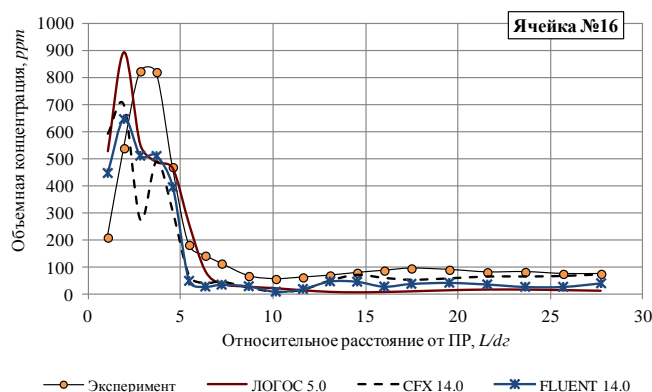


Рис. 8. Распределение концентрации трассера за ПР по длине модели в ячейке №16

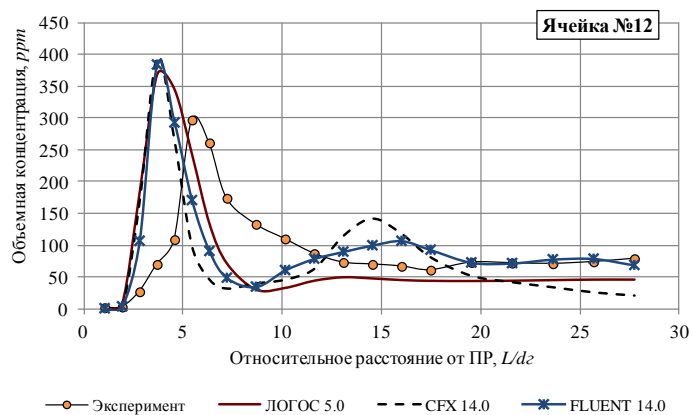


Рис. 9. Распределение концентрации трассера за ПР по длине модели в ячейке №12

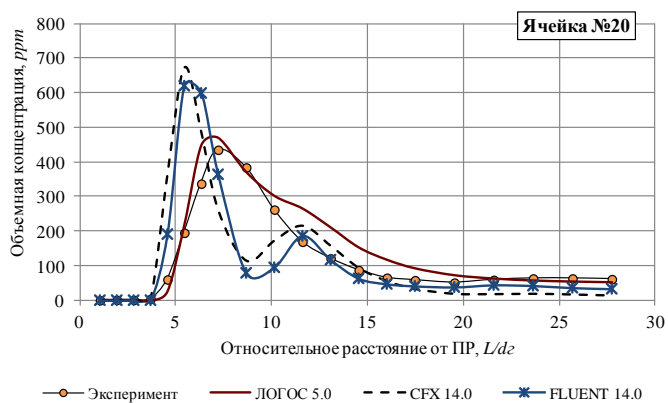


Рис. 11. Распределение концентрации трассера за ПР по длине модели в ячейке №20

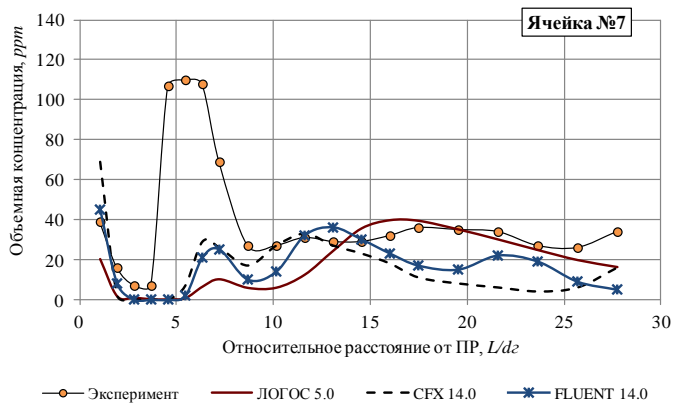


Рис. 10. Распределение концентрации трассера за ПР по длине модели в ячейке №7

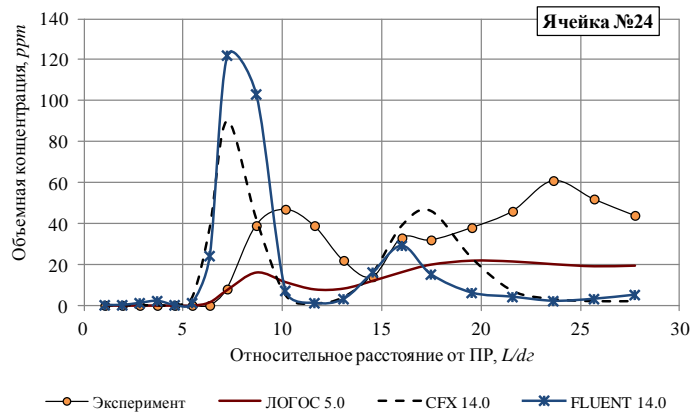
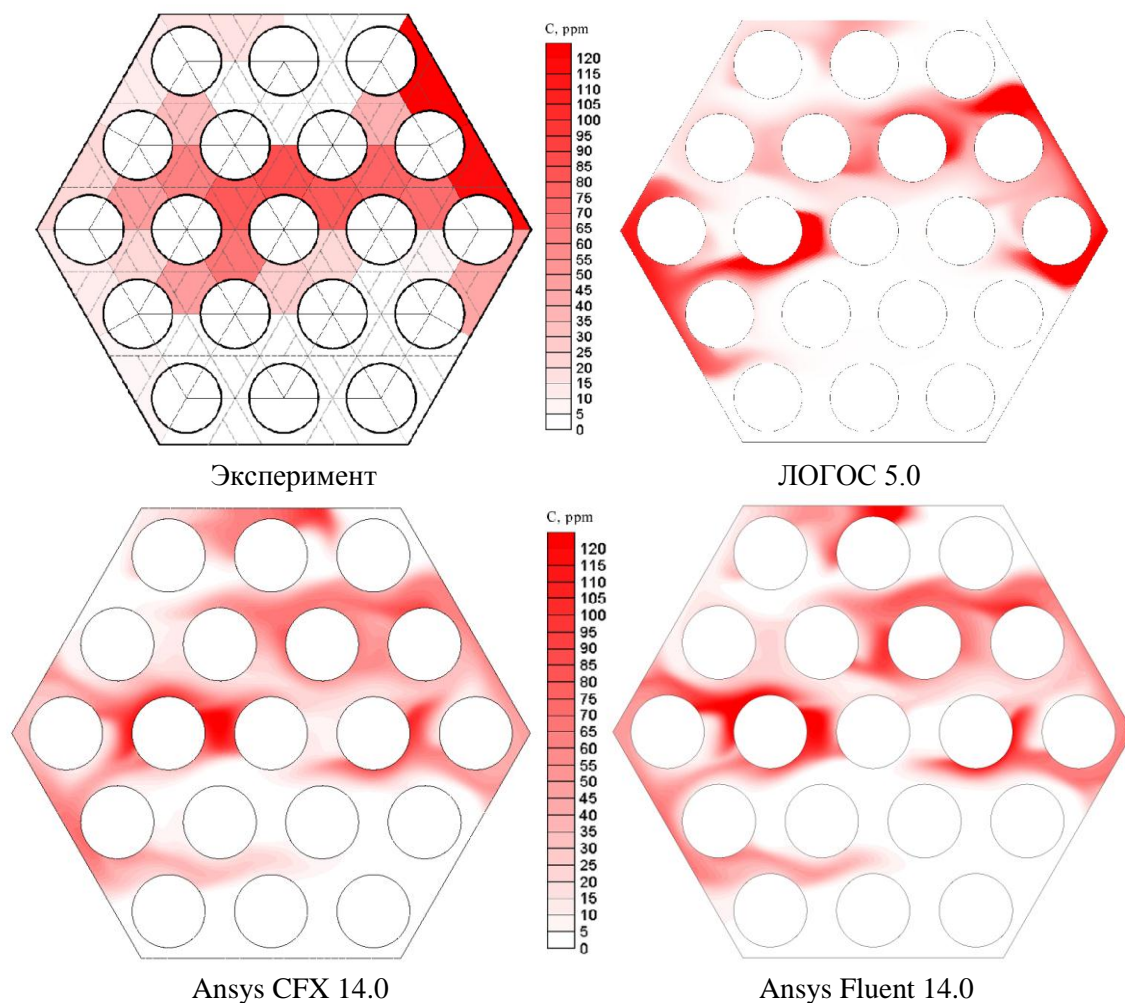


Рис. 12. Распределение концентрации трассера за ПР по длине модели в ячейке №24



**Рис. 13. Распределение концентрации трассера в выходном сечении модели**

В результате качественного и количественного сравнения графиков распределения концентрации трассера по длине ЭМ в характерных ячейках можно сделать следующие выводы:

1. В расчете по программе ЛОГОС 5.0 не было получено совпадения по значениям концентрации трассера сразу за ПР в ячейке подачи, однако уже на расстоянии  $L/d_s=6$  расчетные значения концентрации соответствуют экспериментальным. Это может свидетельствовать о том, что коэффициент турбулентной диффузии в программе ЛОГОС, входящий в уравнение переноса пассивной примеси, принимает слишком низкое значение на участке до ПР. В результате этого на участке до ПР не происходит достаточного перемешивания трассера по сечению модели. Пройдя дефлектор ПР струя трассера отклоняется от осевого направления течения, и проходит мимо центра ячейки, где в эксперименте размещался измерительный зонд.

2. Для следующей по направлению дефлектора ячейки №16 в программе ЛОГОС получено весьма точное совпадение с экспериментом по максимальному значению концентрации трассера (отличие не более 5-6%), хотя по длине этот максимум смещен на расстояние порядка двух калибров вверх по потоку. Аналогичное смещение максимума наблюдается также и в программах Ansys CFX и Ansys FLUENT, однако значение максимума концентрации по длине ниже экспериментального на 22% и 17% соответственно.

3. В ячейке №7, расположенной против направления дефлектора от ячейки подачи сразу за решеткой значения концентрации, полученные по программе ЛОГОС опять оказываются самыми низкими, что также может свидетельствовать о недостаточном перемешивании на участке модели до ПР. При этом на достаточном удалении от ПР (порядка 12–13 ка-

либров) результаты по программе ЛОГОС гораздо лучше, как качественно, так и количественно согласуются с экспериментальными данными.

4. В ячейке №20 наблюдается практически полное совпадение результатов по программе ЛОГОС с данными эксперимента.

На рис. 13 представлены картограммы распределения концентрации трассера в выходном сечении модели ТВС, приведенные к экспериментальной шкале. Можно видеть, что в целом все три CFD-программы выдали похожие результаты. Качественное сравнение этих результатов с данными эксперимента показало, что программы Ansys CFX и Ansys FLUENT несколько сильнее размещали трассер в поперечном сечении. Об этом свидетельствует наличие примеси в ячейках №№2, 21, 26, 29, 32, что не наблюдалось в эксперименте. В результатах программы ЛОГОС трассер в указанных ячейках отсутствовал.

### Выводы

В данной работе проведено сравнение результатов, полученных в программах вычислительной гидродинамики «ЛОГОС 5.0», с результатами экспериментальных исследований перемешивания потока теплоносителя в модели ТВС, проведенных на аэродинамическом стенде НГТУ им. П.Е. Алексеева, а также с результатами кросс-верификационных расчетов, выполненных в программах Ansys CFX 14.0 и Ansys FLUENT 14.0.

Комплексный анализ полученных данных позволяет говорить о достаточно высокой эффективности применения программ вычислительной гидродинамики к расчету процессов локального массопереноса потока теплоносителя за перемешивающими решетками в ТВС. Хотя в отдельных точках наблюдалось некоторое расхождение с экспериментом, в целом полученные данные позволяют оценить эффективность конструкции перемешивающей решетки ТВС с точки зрения таких критериев как длина затухания массообменных процессов, т.е. расстояние на котором заканчивается интенсивный поперечный перенос массы за счет конвективных течений, обусловленных дефлекторами решетки; а также позволяет определить на основании численных экспериментов значения эффективного коэффициента межканального обмена, используемого в программах поячеечного расчета при обосновании теплотехнической надежности активных зон.

### Библиографический список

1. **Дмитриев, С.М.** Экспериментальные исследования эффективности перемешивания теплоносителя в обоснование выбора оптимальной конструкции ТВСА для внедрения в реакторы типа ВВЭР / С.М. Дмитриев [и др.] // Ядерная энергетика. – 2009. – №1. – С. 88–97.
2. **Бородин, С.С.** Исследование эффективности перемешивающих решеток в обоснование выбора оптимальной конструкции ТВСА-Альфа реактора типа ВВЭР / С.С. Бородин [и др.] // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2010. – № 1 (80). – С. 101–108.
3. **Бородин, С.С.** Особенности гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВСА-Альфа реактора ВВЭР / С.С. Бородин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2010. – № 1. – С. 42.
4. **Гребенников, А.Н.** Адаптация, верификация и использование пакета программ ЛОГОС для решения задач атомной энергетики / А.Н. Гребенников [и др.] // 8-я Международная научно-техническая конференция «Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР». Сборник тезисов докладов. – Подольск. – 2013. – С. 65–66.
5. **Шагалиев, Р.М.** Пакет программ ЛОГОС для моделирования задач атомной энергетики / Р.М. Шагалиев [и др.] // International Congress on Advances in Nuclear Power Plants. Сборник тезисов и докладов, Южная Корея, остров Четжу (Jeju), 2013.
6. Пакет программ ЛОГОС 5.0. Техническое руководство // ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».
7. **Дмитриев, С.М.** Применение программы ЛОГОС для исследования особенностей гидродинамики в тепловыделяющей сборке реактора КЛТ-40С / С.М. Дмитриев [и др.] // Системы управления и информационные технологии. – 2014. – Т. 57. – №3.2. – С. 232–236.



8. Дмитриев, С.М. Моделирование течения потока теплоносителя в топливной сборке реактора плавучей АЭС с использованием CFD-программы «ЛОГОС» / С.М. Дмитриев [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88. – № 5. – С. 1253–1259.

*Дата поступления  
в редакцию 25.10.2016*

**S.M. Dmitriev, A.A. Dobrov, M.A. Legchanov, A.E. Khrobostov**

**VERIFICATION OF CFD-PROGRAM LOGOS BASED ON NNSTU EXPERIMENTS  
FOR THE STUDY OF COOLANT MASS TRANSFER IN FUEL ASSEMBLY**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev

**Purpose:** Numerical simulation of coolant flow in FA with mixing grid using LOGOS CFD-program and it's verification based on NNSTU experiments.

**Design/methodology/approach:** Computational domain is a fragment of fuel assembly with mixing grid. Simulation of tracer carried out by introducing an additional passive scalar and solution of its transfer equation.

**Results:** As a result, the distribution of the passive scalar concentration behind mixing grid were received. These data were compared with the experimental results and the calculation results in the CFD-programs.

*Key words:* nuclear reactor, fuel assembly, coolant heat hydrodynamics, spacing grid.