

transformation of calculation blocks for the difference scheme vectorization. The main idea of the vectorization approach is based on tetrahedralization of the cells of the initial mesh. This approach makes vectorization on arbitrary meshes possible. Testing of vectorized algorithms shows that the computation results produced by two algorithms (the standard one used in TIM method and the vectorized one) are the same, and the speedup from the vectorization obtained on Intel Xeon Phi coprocessor is ~2.5 times, and it is ~1.1 times on Intel Haswell central processing unit.

Keywords: unstructured Lagrangian polyhedral mesh, vectorization, Lagrangian gas dynamics, Intel Xeon Phi.

УДК 004.94

КРОСС-ВЕРИФИКАЦИЯ ПАКЕТА ПРОГРАММ ЛОГОС НА ПОЛНОМАСШТАБНЫХ РАСЧЕТАХ СМЕШЕНИЯ НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОТОКОВ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В НАПОРНОЙ КАМЕРЕ СУДОВОЙ РУ

*Е. А. Данилов¹, А. А. Деулин¹, О. В. Денисова¹, В. В. Курулин¹, О. О. Шестак¹,
Е. В. Глазунова¹, Д. Н. Свешников²*

¹ Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский НИИ экспериментальной физики, Саров

² АО «ОКБМ Африкантов», Нижний Новгород

В настоящей работе представлены результаты моделирования смешения неизотермических потоков в напорной камере РУ РИТМ 200 при отключении парогенератора, а также представлено сравнение результатов моделирования по пакету программ ЛОГОС с данными, полученными с использованием коммерческого CFD-кода ANSYS CFX. Постановка задачи, исходная геометрия и результаты расчетов по ANSYS CFX для выполнения кросс-верификации предоставлены АО «ОКБМ Африкантов». В расчетах рассмотрены различные варианты компоновки оборудования напорной камеры для обоснования конструкторского решения по установке смесительного оборудования.

Сравнительный анализ результатов моделирования, выполненного с использованием пакетов ЛОГОС и ANSYS CFX, продемонстрировал их удовлетворительное согласие по всем оцениваемым параметрам.

Ключевые слова: пакет программ ЛОГОС, кросс-верификация, судовая РУ, РИТМ 200, турбулентное течение, смешение неизотермических потоков, турбулентная конвекция, CFD-коды, напорная камера, Ansys CFX.

Введение

Одним из актуальных направлений применения пакетов программ трехмерного теплогидравлического расчета (CFD-кодов) является их использование при обосновании режимов эксплуатации реакторных установок (РУ) при парциальном составе работающего оборудования (при отключении парогенератора, секции парогенератора и т. п.).

Данные режимы характеризуются возникновением неизотермических потоков в камерах реактора, которые, попадая на вход в активную зону, могут повлиять на ее теплотехническую надежность или повлиять на условия работы датчиков системы управления установкой.

Поскольку парциальные режимы сопровождаются существенной трехмерностью и нестационарностью процессов смещения потоков в камерах реактора, их корректное моделирование возможно только с использованием CFD-кодов на базе применения современных вихреобразующих моделей турбулентности.

В Российском федеральном ядерном центре – ВНИИЭФ разработан и активно развивается отечественный многофункциональный пользовательский пакет программ инженерного анализа и суперкомпьютерного моделирования ЛОГОС[1], одной из областей применения которого является CFD-моделирование трехмерных задач тепломассопереноса.

В настоящее время выполняется значительный объем работ, направленный на верификацию и адаптацию пакета ЛОГОС для решения задач атомной энергетики. Так в рамках совместных работ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и АО «ОКБМ Африкантов» выполняются верификационные и валидационные расчеты для подтверждения применимости пакета программ ЛОГОС к моделированию теплогидравлических процессов в оборудовании РУ. В ходе данных работ проведена верификация пакета ЛОГОС на задачах, описывающих характерные явления в элементах конструкции РУ (смещение неизотермических потоков в условиях влияния крупных вихревых структур; смешение неизотермических потоков в условиях влияния сил плавучести; термостратификация в слабонаклоненных трубопроводах; пульсации температуры; турбулентные течения в каналах сложной формы и др.). Выполняется валидация пакета ЛОГОС на основе экспериментальных исследований процессов смешения в моделях напорных камер РУ, имитирующих отключение парогенератора.

Выполненный объем работ по верификации и адаптации позволил использовать пакет ЛОГОС для решения производственной задачи по моделированию парциальных режимов работы перспективной судовой РУ РИТМ 200.

Расчеты по пакету ЛОГОС и сравнение с данными расчетов по ANSYS CFX выполнено для двух вариантов компоновки напорной камеры: рассмотрен вариант без смесительного устройства (модель №1) и вариант со смесительным устройством (модель № 2).

С использованием моделей рассматриваются парциальный режим работы установки: для модели № 1 рассматривается отключение секции парогенератора (далее ПГ) 1, а для модели № 2 рассматривается худший вариант, при котором горячий теплоноситель протекает на нижний уровень смесительного устройства, расположенный максимально близко к входу в а. з.

Исходные конструкторские геометрии расчетных моделей созданы в АО «ОКБМ Африкантов». Каждая модель состоит из двух геометрически изолированных несвязанных расчетных областей 1 и 2.

На рис. 1 показана расчетная область 1 – от выходов секций ПГ до насосов.

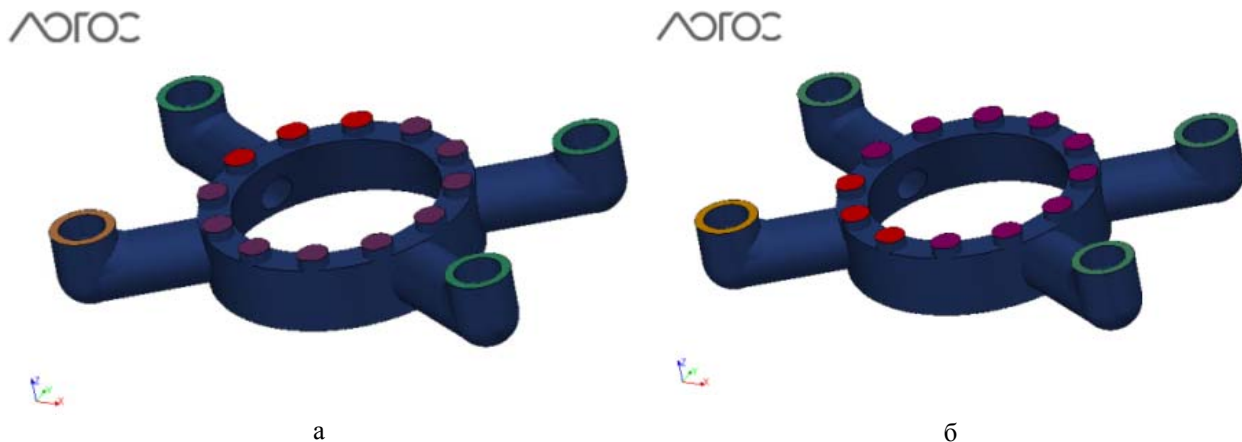


Рис. 1. Расчетная область 1: а – модель № 1, б – модель № 2

Расчетная область 1 используется для формирования граничных условий (далее ГУ) на входе в напорную камеру и геометрически идентична для двух моделей. Отличие состоит в расположении входных ГУ, моделирующих выходы секций ПГ. Выходы, соответствующие отключенным секциям для двух моделей, помечены на рис. 1 красным цветом.

На рис. 2 показана расчетная область 2 – от напора насосов до входа в а. з. Для модели № 2 расчетная область включает смесительное устройство. Данная расчетная область является основным объектом исследования при проведении моделирования.



Рис. 2. Расчетная область 2: а – модель № 1, б – модель № 2

В расчетах моделируется нестационарное турбулентное течение несжимаемого теплоносителя (воды) в пределах расчетных моделей, теплообмен с материалом корпуса не учитывается, внешние границы рассматриваются как адиабатические жесткие стенки.

В расчетах учитывается сила тяжести, ускорение свободного падения $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. Естественная конвекция моделируется путем учета влияния силы плавучести на основании модели с переменной плотностью.

Для учета турбулентного перемешивания применяется модель LES Смагоринского [3].

В качестве начальных данных задается постоянное значение температуры $T = 550 \text{ К}$ и нулевые поля скорости и давления.

Расчеты по пакету ЛОГОС проводятся в два этапа: на первом этапе моделируется расчетная область 1 со стационарными ГУ, на втором этапе – расчетная область 2 с нестационарными входными граничными условиями, сформированными по результатам первого расчета.

Расчеты обоих этапов выполнены в нестационарной постановке до момента времени $t = 100 \text{ с}$. Используется постоянный шаг по времени $\Delta t = 0.004 \text{ с}$. Временное слагаемое аппроксимируется при помощи схемы второго порядка точности, для аппроксимации скорости используется низкодиссипативная схема VCD второго порядка точности, а для остальных конвективных слагаемых используется схема UD первого порядка точности.

По результатам второго этапа расчетов определяются усредненные по времени поля температуры и скорости в расчетной области 2. Время начала усреднения составляет $40 \text{ }^\circ\text{С}$.

При проведении кросс-верификации расчетных кодов всегда, когда это возможно, расчеты выполняются на одной сеточной модели. В силу существенных отличий в методах, моделях и подходах, которые применяются в пакетах ЛОГОС и ANSYS CFX, готовые расчетные сетки из ANSYS CFX (табл. 5) не пригодны для проведения моделирования в пакете ЛОГОС, поскольку состоят из несостыкованных между собой фрагментов, а также содержит ячейки в форме тетраэдров.

В связи с этим выполнено построение новых сеточных моделей для пакета программ ЛОГОС. Построена неструктурированная преимущественно гексаэдрическая сетка с призматическими пристеночными слоями, содержащая $\sim 8 \text{ млн}$ ячеек, для первого этапа расчета.

Для создания итоговых вариантов сеток для расчетной области 2 сеточные модели для отдельных фрагментов были состыкованы с использованием инструмента сшивки сеток. При этом

для фрагментов «верх» и «середина» использованы сетки из ANSYS CFX, предоставленные АО «ОКБМ Африкантов», поскольку они являются гексаэдрическими. Итоговая сетка для расчетной области 2 содержит ~27 млн. ячеек в модели № 1 и ~28 млн ячеек в модели № 2.

Одной из основных целей моделирования является анализ температурной неоднородности на входе в а. з., по которому выполняется обоснование ее теплотехнической надежности.

В табл. 1 и 2 приведены значения перепадов усредненной по времени температуры на входе в а. з., полученные по ЛОГОС и ANSYS CFX, а также относительные отклонения перепадов, вычисленные по формуле:

$$\delta = \left| \frac{\Delta T_{a.z. \text{ЛОГОС}} - \Delta T_{a.z. \text{CFX}}}{\Delta T} \right| \cdot 100\%,$$

где $\Delta T_{a.z. \text{ЛОГОС}}$ и $\Delta T_{a.z. \text{CFX}}$ – перепады усредненной по времени температуры на входе в а. з., полученные по ЛОГОС и ANSYS CFX, ΔT – перепад температуры по всей задаче ($\Delta T = 28^\circ\text{C}$).

Таблица 1

Перепад усредненной по времени температуры,
относительное отклонение между ЛОГОС и ANSYS CFX для модели № 1

	$\Delta T_{a.z.}, ^\circ\text{C}$	$\delta, \%$
ЛОГОС	17,38	3,0
ANSYS CFX	16,54	

Таблица 2

Перепад усредненной по времени температуры,
относительное отклонение между ЛОГОС и ANSYS CFX для модели № 2

	$\Delta T_{a.z.}, ^\circ\text{C}$	$\delta, \%$
ЛОГОС	4,79	0,21
ANSYS CFX	4,85	

На рис. 3, 4 представлены поля усредненной температуры на входе в а. з. для моделей № 1 (без смесителя) и № 2 (со смесителем), полученные по пакетам ЛОГОС и ANSYS CFX.

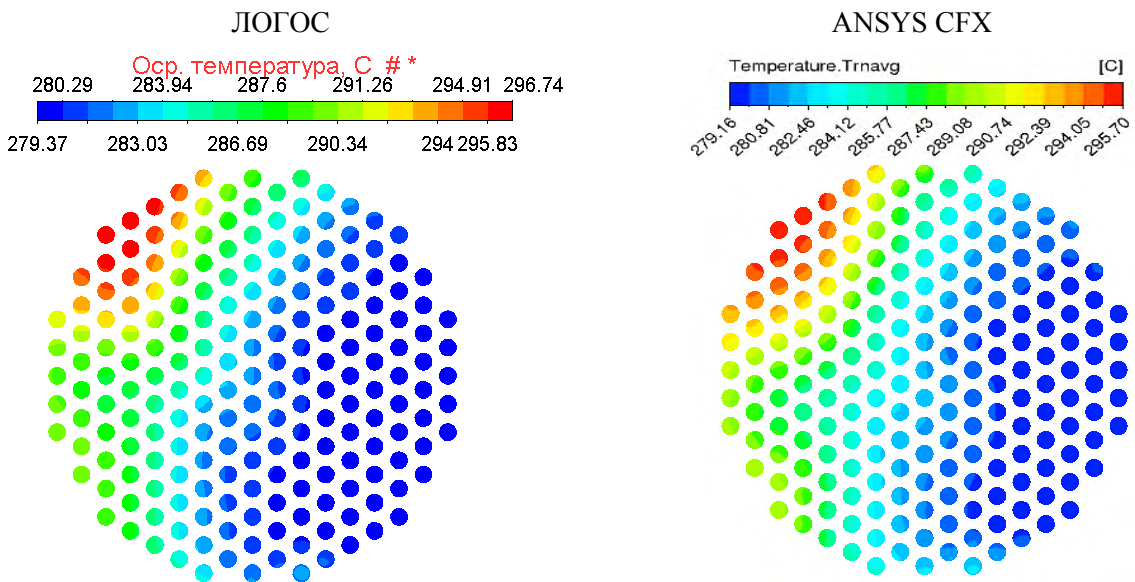


Рис. 3. Поля усредненной по времени температуры на входе в а. з. для модели № 1

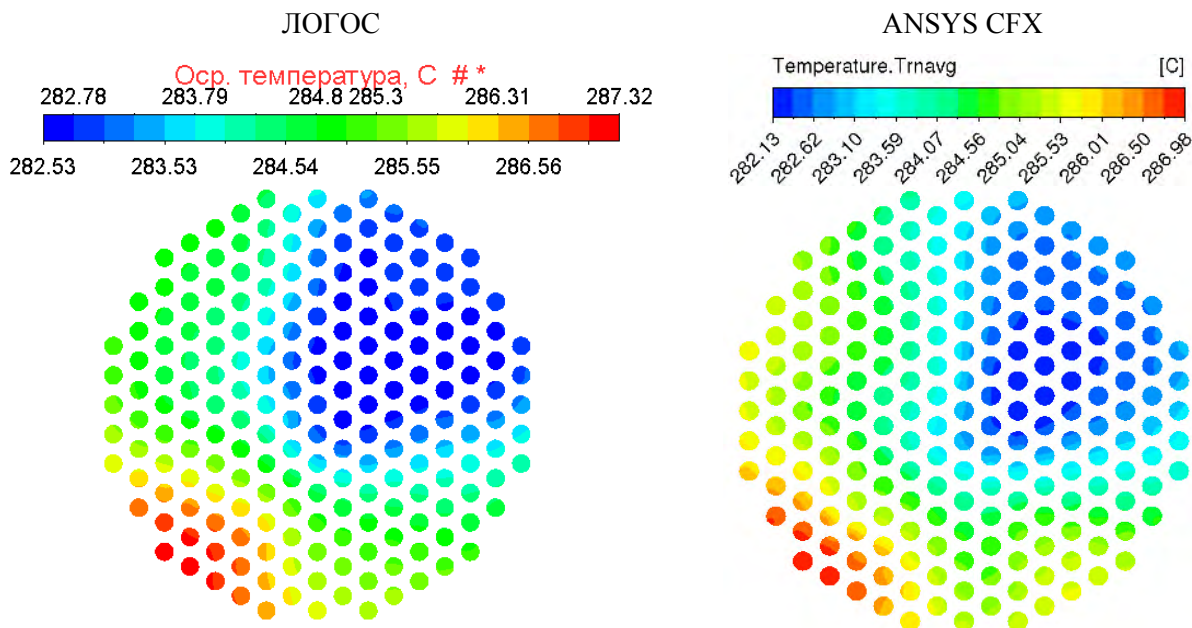


Рис. 4. Поля усредненной по времени температуры на входе в а. з. для модели № 2

Сравнительный анализ результатов расчетов по пакетам программ ЛОГОС и ANSYS CFX, представленных в табл. 1, 2 и на рис. 3, 4, демонстрирует их удовлетворительное качественное и количественное совпадение.

Полученные по двум пакетам программ поля усредненной по времени температуры имеют схожий характер для обеих расчетных моделей.

Для модели № 1 (без смесителя) в правой части входа в а.з. наблюдается холодная зона, а в левом верхнем углу – горячая зона (рис. 3). Визуальные границы холодной и горячей зон имеют схожую форму. Местоположение горячей зоны соответствует расположению входов из отключенного ПГ1.

По пакету ЛОГОС для модели № 1 получен перепад усредненной по времени температуры на входе в а. з., равный 17,38 °С, по ANSYS CFX – 16,54 °С. Относительное отклонение перепада температуры между ЛОГОС и ANSYS CFX составляет 3 % (табл. 3).

Для модели № 2 (со смесителем) визуальные границы холодной и горячей зон имеют схожую форму для ЛОГОС и ANSYS CFX (рис. 4). Местоположение горячей зоны соответствует расположению входов из отключенного ПГ4.

Максимальное значение температуры, полученное по пакету ЛОГОС, составляет 287,32 °С, по ANSYS CFX – составляет 286,98 °С.

Минимальное значение температуры, полученное по пакету ЛОГОС, составляет 282,53 °С, по ANSYS CFX – составляет 282,13 °С.

По пакету ЛОГОС для модели № 2 получен перепад усредненной по времени температуры на входе в а. з., равный 4,79 °С, по ANSYS CFX – 4,85 °С. Относительное отклонение перепада температуры между ЛОГОС и ANSYS CFX составляет 0,21 % (табл. 4).

Общий анализ результатов показал, что установка смесительного устройства оказывает существенное влияние на процессы смешения и позволяет снизить перепад температуры и максимальное значение температуры на входе в а. з., т. е. позволяет эффективно сократить температурную неоднородность на данном участке.

На рис. 5 показаны поля усредненной по времени (сверху) и мгновенной (снизу) температуры в продольном сечении для модели № 1.

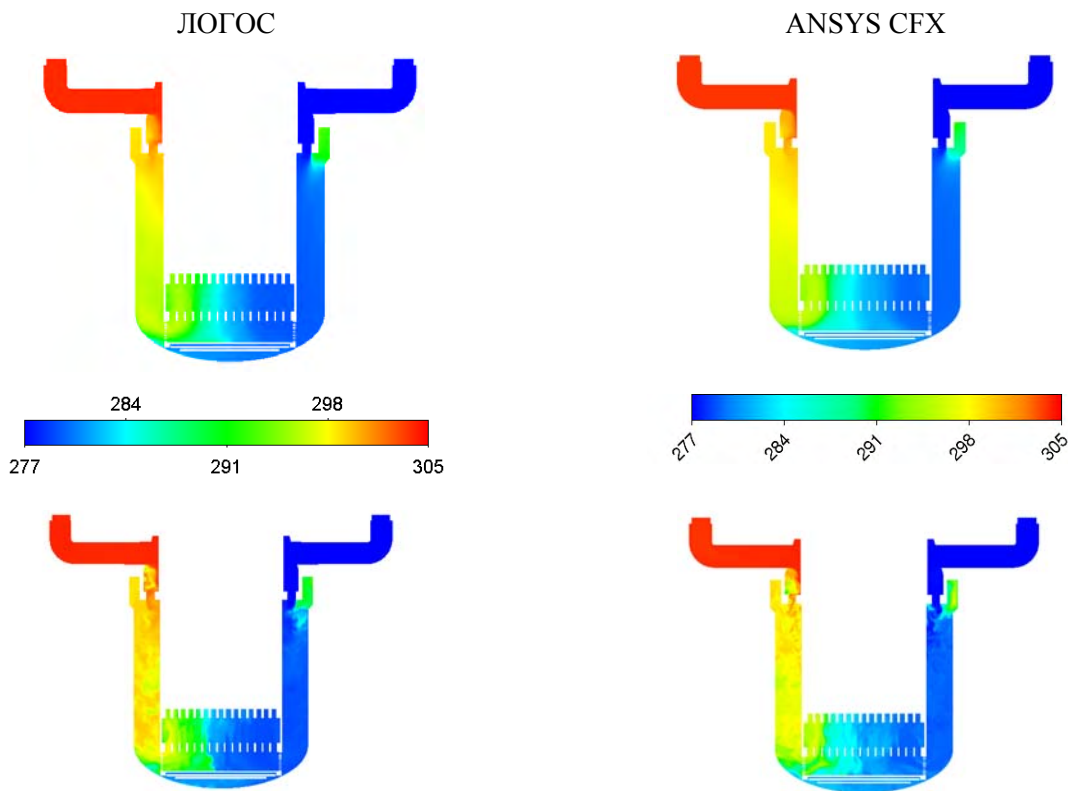


Рис. 5. Поля температуры в продольном сечении, °С. Модель № 1

Сравнительный анализ расчетных данных для модели № 1 (без смесителя), демонстрирует удовлетворительное качественное совпадение усредненной картины температурного поля, полученного по двум расчетным кодам. Мгновенные поля в целом также имеют схожий характер, имеющиеся различия в вихревых структурах объясняются случайной природой численно разрешаемых турбулентных структур, а также рядом отличий в используемых методах и схемах.

На рис. 6 показаны поля усредненной по времени (сверху) и мгновенной (снизу) температуры в продольном сечении для модели № 1.

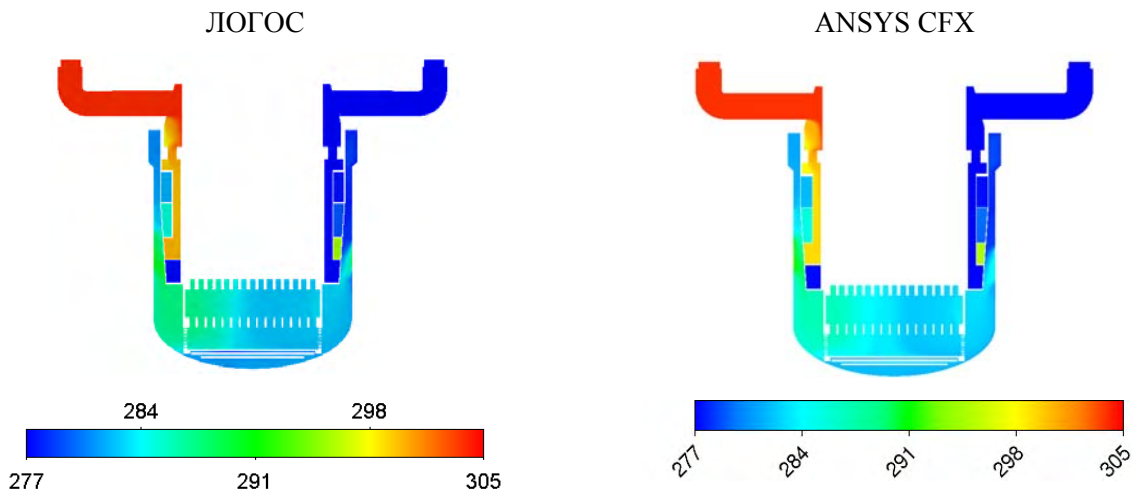


Рис. 6. Поля температуры в продольном сечении, °С. Модель № 2

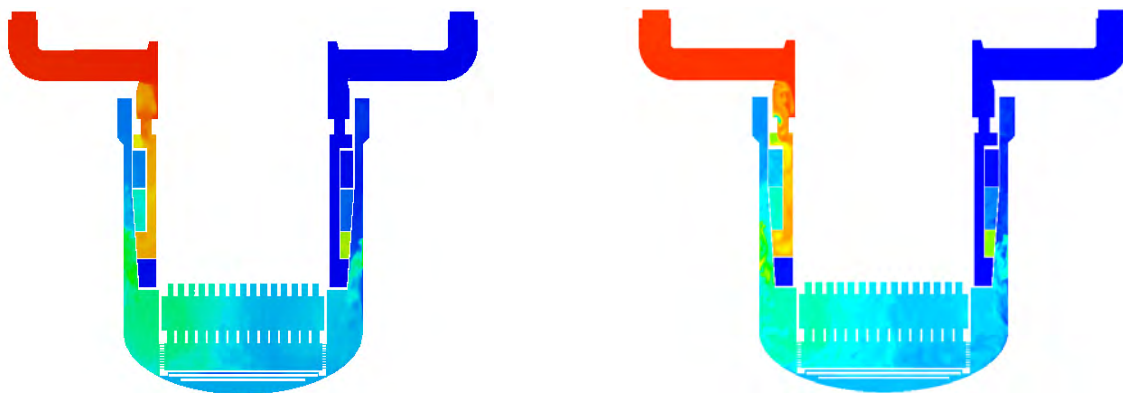


Рис. 6. Окончание

Дополнительно выполнено сравнение результатов расчетов по пакету программ ЛОГОС с результатами расчетов ANSYS CFX по температурным значениям в 15 контрольных точках, 12 из которых находятся внутри напорной камеры (далее НК) (точки СВ_Т01 – СВ_Т12) и 3 вблизи входа в а. з. (точки Тvhod_1 – Тvhod_3).

Сравнение производится по следующим параметрам:

1) Средним по времени значениям температуры в контрольных точках, вычисляемые в соответствии с [4] по формуле:

$$\langle T \rangle = \frac{\sum_{i=1}^N T_i}{N}, \quad (1)$$

где T_i – мгновенное значение температуры с индексом i из массива расчетных данных, N – количество значений температуры в массиве расчетных данных.

2) Среднеквадратичным отклонением температуры (RMS) в контрольных точках, которые вычисляются в соответствии с [4] по формуле:

$$RMS(T) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (T_i - \langle T \rangle)^2}{N - 1}}. \quad (2)$$

3) Разности между средними по времени значениями температуры в контрольных точках, полученными по ЛОГОС и ANSYS CFX, определяются по формулам:

$$\Delta \langle T \rangle = |\langle T \rangle_{\text{ЛОГОС}} - \langle T \rangle_{\text{CFX}}|, \quad (3)$$

где $\langle T \rangle_{\text{ЛОГОС}}$ – среднее значение температуры, полученное по ЛОГОС, $\langle T \rangle_{\text{CFX}}$ – среднее значение температуры, полученное по ANSYS CFX.

4) Относительным отклонением средних по времени значений температуры в контрольных точках между ЛОГОС и ANSYS CFX, вычисляемым по формуле:

$$\delta = \left| \frac{\Delta \langle T \rangle}{\Delta T} \right| \cdot 100\%, \quad (4)$$

где ΔT – перепад температуры по всей задаче.

Сравнение данных расчета ЛОГОС – ANSYS CFX по перечисленным параметрам (по результатам расчетов для модели № 1), представлено в табл. 3.

Таблица 3

Средние по времени значения температуры и среднеквадратичные отклонения температуры в контрольных точках, модель № 1

Контрольная точка	< T >, К		$\Delta < T >$, К	δ , %	RMS (T), К	
	ЛОГОС	ANSYS CFX			ЛОГОС	ANSYS CFX
CB_T01	566,7315	568,2492	1,5177	5,4203	2,5932	1,4421
CB_T02	570,2962	569,9399	0,3563	1,2725	1,4516	1,4389
CB_T03	567,5807	565,9709	1,6098	5,7492	2,4301	3,3747
CB_T04	558,8570	556,6460	2,211	7,8964	2,7769	2,6702
CB_T05	553,4190	553,1162	0,3028	1,0814	0,8832	0,7446
CB_T06	552,5813	552,4800	0,1013	0,3617	0,3898	0,2018
CB_T07	552,5748	552,4461	0,1287	0,4596	0,3001	0,2532
CB_T08	552,5962	552,4301	0,1661	0,5932	0,3338	0,3507
CB_T09	553,2662	553,5461	0,2799	0,9996	0,6711	1,1558
CB_T10	556,8014	557,0219	0,2205	0,7875	1,4657	2,1895
CB_T11	562,2285	563,8179	1,5894	5,6764	2,1718	3,0263
CB_T12	566,0690	566,2504	0,1814	0,6478	1,2235	1,9001
Tvhod_1	559,6230	557,7376	1,8854	6,7335	2,5765	2,7968
Tvhod_2	553,0585	553,1447	0,0862	0,3078	0,7114	1,0202
Tvhod_3	554,3412	555,7131	1,3719	4,8996	1,1181	1,9572

Для модели № 1 максимальное относительное отклонение средней по времени температуры между ЛОГОС и ANSYS CFX наблюдается в контрольной точке CB_T04 и составляет 7,9 %, разность средних температур в этой точке составляет 2,2 К. Точка CB_T04 находится на границе зоны смешения горячего теплоносителя и зоны холодного теплоносителя, что и объясняет полученное отклонение.

В значениях среднеквадратичных отклонений температуры для модели № 1 имеются расхождения, однако максимальная величина расхождения не превышает 1,2 К, а изменение среднеквадратичных отклонений относительно контрольных точек имеет схожий немонотонный характер для двух расчетных кодов.

В табл. 12 представлены средние по времени значения температуры и среднеквадратичные отклонения температуры в контрольных точках, а также разности и относительные отклонения в определении средней температуры между ЛОГОС и ANSYS CFX, вычисленные по формулам (1 – 4) по результатам расчетов для модели № 2.

Таблица 12

Средние по времени значения температуры и среднеквадратичные отклонения температуры в контрольных точках, модель № 2

Контрольная точка	< T >, К		$\Delta < T >$, К	δ , %	RMS (T), К	
	ЛОГОС	ANSYS CFX			ЛОГОС	ANSYS CFX
CB_T01	555,8069	555,9244	0,1175	0,4196	0,3751	0,6818
CB_T02	556,0503	555,8185	0,2318	0,8279	0,4773	0,8537

Окончание таблицы 12						
CB_T03	555,4917	555,6803	0,1886	0,6736	0,4137	0,6978
CB_T04	556,9334	556,9328	0,0006	0,0021	0,6581	0,9247
CB_T05	557,9447	558,2048	0,2601	0,9289	0,5014	0,915
CB_T07	559,1240	559,2116	0,0876	0,3129	0,5375	0,898
CB_T08	560,6422	560,5325	0,1097	0,3918	0,5158	0,977
CB_T09	559,3339	559,0626	0,2713	0,9689	0,5558	0,9149
CB_T10	558,8255	558,7543	0,0712	0,2543	0,5132	0,8089
CB_T11	557,9711	558,8893	0,9182	3,2793	0,5711	0,9353
CB_T12	556,8632	556,9673	0,1041	0,3718	0,4927	0,7123
Tvhod_1	556,1472	557,2929	1,1457	4,0918	0,6184	0,4938
Tvhod_2	555,3722	555,3029	0,0693	0,2475	0,1602	0,5302
Tvhod_3	556,9539	556,6284	0,3255	1,1625	0,6764	0,9091

В значениях среднеквадратичных отклонений температуры для модели № 2 имеются расхождения, однако максимальная величина расхождения не превышает 0,5 К, а изменение среднеквадратичных отклонений относительно контрольных точек имеет схожий немонотонный характер для двух расчетных кодов.

На рис. 7 – 12 представлены спектры пульсаций температуры (полученные методом Фурье) в контрольных точках для модели № 1, полученные по пакетам программ ЛОГОС и ANSYS CFX, а также теоретический закон Колмогорова (закон «пяти третей»), который определяется следующим соотношением: $E(v) = c \cdot v^{-5/3}$, где c – константа, определяющая положение наклона спектра.

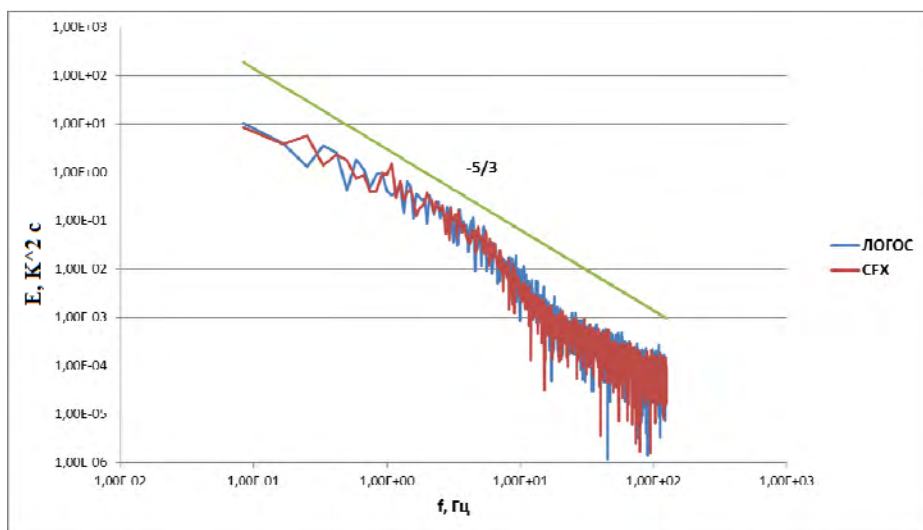


Рис. 7. Спектр пульсаций температуры в точке Tvhod_1

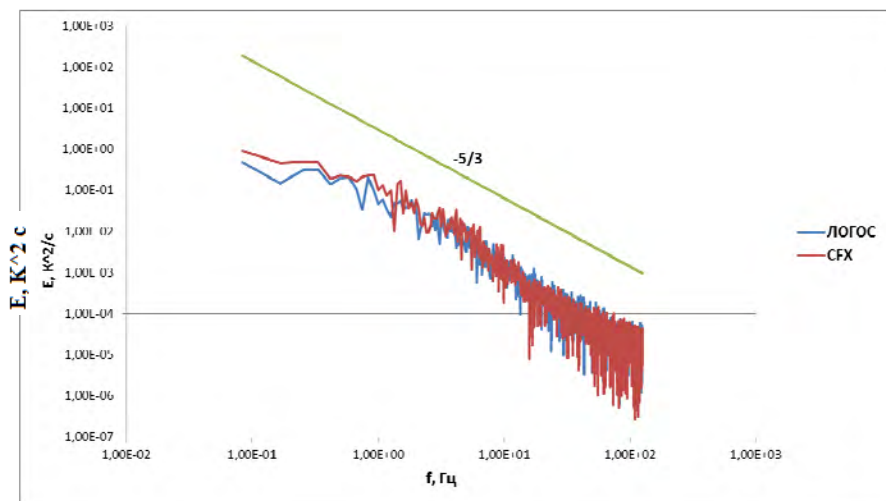


Рис. 8. Спектр пульсаций температуры в точке Tvhod_2

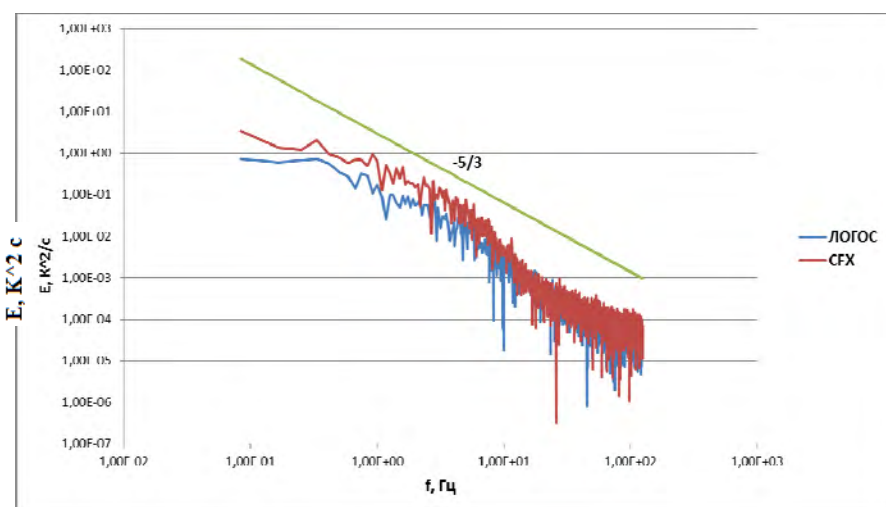


Рис. 9. Спектр пульсаций температуры в точке Tvhod_3

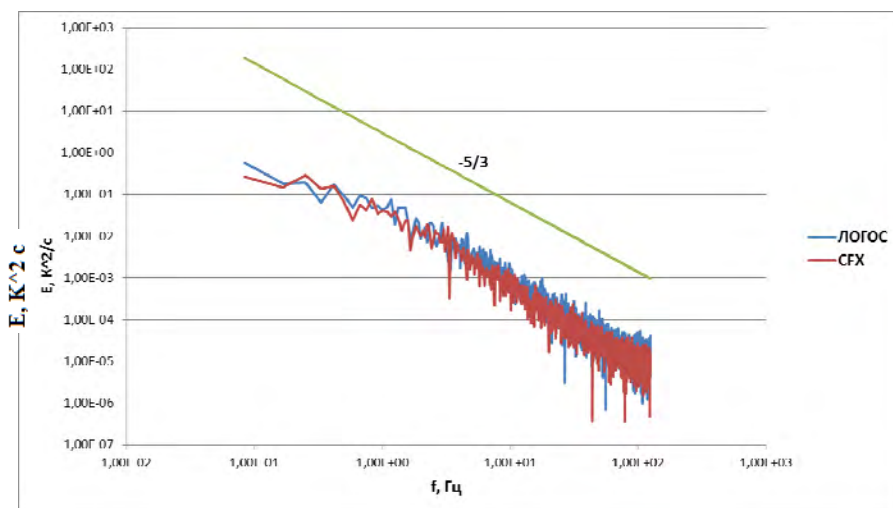


Рис. 10. Спектр пульсаций температуры в точке Tvhod_1

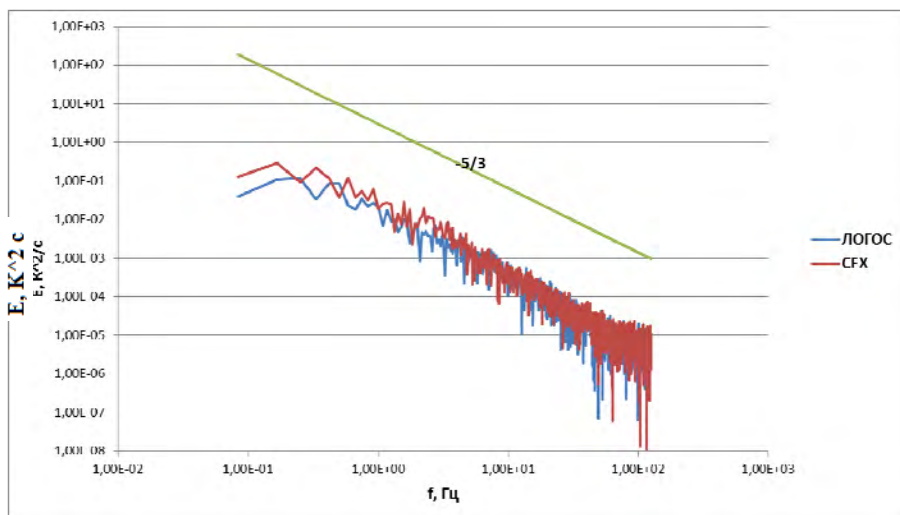


Рис. 11. Спектр пульсаций температуры в точке Tvhod_2

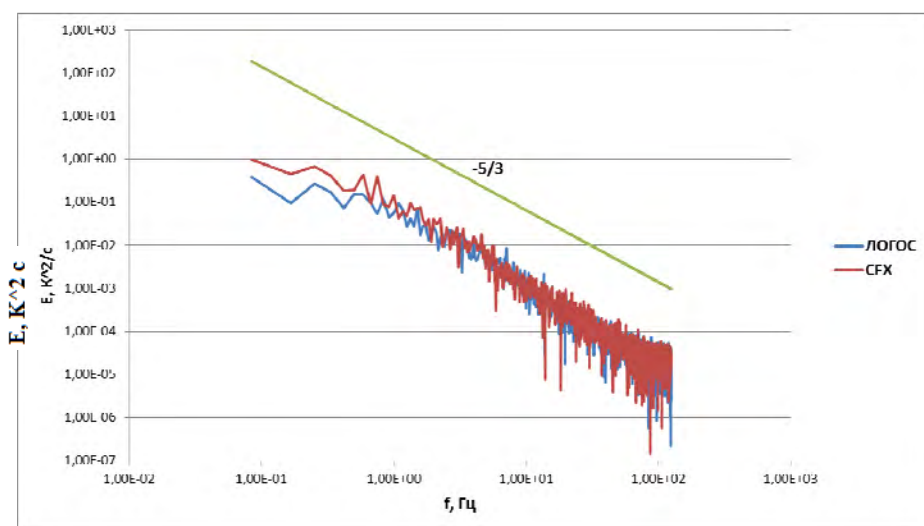


Рис. 12. Спектр пульсаций температуры в точке Tvhod_3

Приведенные на рис. 7 – 12 спектральные характеристики температурных пульсаций свидетельствуют о развитом турбулентном характере потока. В инерционном интервале обеспечивается каскадный перенос энергии вихревых структур от более крупных к более мелким. Наклон линии спектров ЛОГОС и ANSYS CFX достаточно хорошо совпадает с теоретическим законом Колмогорова. Также наблюдается достаточно схожее поведение спектров в низкочастотном диапазоне $10 < f < 100$ Гц в двух расчетных кодах. В области частот $0,1 < f < 10$ Гц амплитуды температурных пульсаций имеют схожий характер, при этом амплитуды, полученные по ANSYS CFX, имеют завышенные значения по сравнению с ЛОГОС. Это указывает на большее вихреобразование в ANSYS CFX по сравнению с ЛОГОС, что также было отмечено при анализе мгновенных полей температуры.

Выводы

1. В докладе представлены результаты моделирования смешения неизотермических потоков в напорной камере РУ РИТМ 200 при отключении парогенератора, а также представлено сравнение результатов моделирования по пакету ЛОГОС с данными, полученными с использованием коммер-

ческого CFD-кода ANSYS CFX. Постановка задачи, исходная геометрия и результаты расчетов по ANSYS CFX для выполнения кросс-верификации предоставлены АО «ОКБМ Африкантов». В расчетах рассмотрены различные варианты компоновки оборудования напорной камеры для обоснования конструкторского решения по установке смесительного оборудования.

2. Сравнительный анализ результатов моделирования, выполненного с использованием пакетов ЛОГОС и ANSYS CFX, продемонстрировал их удовлетворительное согласие по всем оцениваемым параметрам (перепаду температуры на входе в а. з., полю температуры в различных сечениях напорной камеры, статистическим характеристикам изменения температуры в контрольных точках). Относительное отклонение перепада температуры на входе в а. з. между ЛОГОС и ANSYS CFX, которое является ключевым анализируемым параметром, составляет 3 % для модели без смесителя и 0,21 % для модели со смесителем.

3. В результате выполненных расчетов дополнительно показана эффективность работы смесительного устройства. Установлено, что установка смесителя в напорной камере оказывает существенное влияние на процессы смешения и позволяет снизить как перепад температуры, так и максимальное значение температуры на входе в а. з., т. е. позволяет эффективно сократить температурную неоднородность на данном участке.

Литература

1. Дерюгин Ю. Н., Козелков А. С., Спиридонов В. Ф., Цибереv К. В., Шагалиев Р. М. Многофункциональный высокопараллельный пакет программ ЛОГОС для решения задач тепломассопереноса и прочности // Санкт-Петербургский научный форум «Наука и общество»: сб. тез. Санкт-Петербург, 2012.
2. [Electronic resource]. Mode of access: <http://cae-expert.ru/product/ansys-cfx>
3. Снегирев А. Ю. Высокопроизводительные вычисления в технической физике. Численное моделирование турбулентных течений: учебное пособие. СПб.: Политехнический университет, 2009.
4. ГОСТ Р 8.736-2011 Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – М.: Стандартинформ, 2013.

LOGOS SOFTWARE CROSS-VERIFICATION IN THE FULL-SCALE SIMULATION OF MIXING NON-ISOTHERMAL COOLANT FLOWS IN PRESSURE CHAMBER OF MARINE REACTOR PLANT

*E. A. Danilov¹, A. A. Deulin¹, O. V. Denisova¹, V. V. Kurulin¹, O. O. Shestak¹,
E. V. Glazunova¹, D. N. Sveshnikov²*

¹Russian Federal Nuclear Center –

All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov

²JSC «Africantov Experimental Design Bureau of Machine Building»,
Nizhny Novgorod

The paper presents simulation results for the process of mixing non-isothermal flows in pressure chamber of the RITM 200 reactor plant with steam generator shedding and also gives the comparison between the LOGOS software simulation results and those obtained with the commercial CFD code ANSYS CFX. The problem statement, its original geometry, and the ANSYS CFX simulation results for the cross-verification were submitted by JSC «Africantov EDBM». Simulations were performed with different arrangements of the pressure chamber equipment to justify the engineering decision on the arrangement of mixing equipment.

The comparative analysis of simulation results obtained with the LOGOS and ANSYS CFX packages demonstrates a good agreement in all simulated parameters.

Key words: LOGOS software, cross-verification, marine reactor plant, RITM 200, turbulent flow, non-isothermal flow mixing, turbulent convection, CFD codes, pressure chamber, Ansys CFX.

УДК 519.61, 519.63, 550.3

ОПТИМИЗИРОВАННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РАЦИОНАЛЬНОГО МЕТОДА АРНОЛЬДИ ПРИ ПРИБЛИЖЁННОМ РЕШЕНИИ ДВУХ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ЗАДАЧ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ

В. Л. Друскин¹, М. Ю. Заславский², Л. А. Книжнерман³

¹Druskin Algorithms, Бостон, США

и Вустерский политехнический институт, Вустер, США

²Научно-исследовательский центр «Шлюмберже-Долл», Бостон, США

³АО «Центральная геофизическая экспедиция» (холдинг «Росгеология»), Москва

В докладе описаны численные методы решения временных и частотных задач электроразведки в случае, когда требуется знать решение для широкого диапазона моментов времени или частот. Решение сводится к вычислению матричных функций с параметрами – временем или частотой соответственно. Применяется рациональный метод Арнольди, то есть проекция Галёркина на рациональное подпространство Крылова. Для определения оптимальных сдвигов используются скелетная аппроксимация и теория плоского потенциала. Показано, что предельные распределения сдвигов слабо сходятся к мерам из равновесной пары мер подходящих плоских конденсаторов в расширенной комплексной плоскости. Работа предложенных методов с расширяемыми последовательностями сдвигов проиллюстрирована на примерах временной и частотной электроразведочных задач. Численные результаты подтверждают эффективность предложенных нами методов.

Ключевые слова: рациональный метод Арнольди; вычисление матричных функций с параметрами; численное решение; временные и частотные задачи электроразведки; теория плоского потенциала; скелетная аппроксимация; плоский конденсатор; третья задача Золотарёва в комплексной плоскости; слабая сходимости мер.

1. Крыловские и рациональные крыловские методы. Многие задачи вычислительной геофизики (и не только геофизики) требуют вычисления векторов u вида

$$u = f(A)b, \quad A \in \mathbb{C}^{N \times N}, \quad b \in \mathbb{C}^N, \quad (1)$$

где функция f определена на числовом образе («поле значений») матрицы A

$$W(A) = \left\{ \langle Ac, c \rangle \mid c \in \mathbb{C}^N, \|c\| = 1 \right\}. \quad (2)$$

Пусть $U \subset \mathbb{C}^N$ – линейное подпространство размерности n . Популярный способ приближения u – осуществить проекцию Галёркина на U , что делается по формулам

$$u \approx u_n = Gf(V)G^*b, \quad G \in \mathbb{C}^{N \times n} = (g_1 \dots g_n), \quad (3)$$