

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 621.039.586

ОБОСНОВАНИЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КОДА CONV-3D ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЕСТЕСТВЕННОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ СВИНЦОВО-ВИСМУТОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ГИДРАВЛИЧЕСКОМ КОНТУРЕ

Чуданов В.В., Аксенова А.Е., Первичко В.А. (ИБРАЭ РАН, г. Москва)

e-mail: aks@ibrae.ac.ru

Изучение естественной циркуляции эвтектического свинцово-висмутового сплава под действием разницы его температуры и удельной массы по гидравлическому контуру важно для безопасности реакторных установок. Высокая температура теплоносителя при расхолаживании реактора, а также размеры реакторной установки усложняют измерение скорости течения, касательного напряжения на стенках каналов и температурных полей. Естественную циркуляцию жидкости с малым числом Прандтля необходимо рассчитывать с помощью CFD-кодов, которые дополняют матрицу валидации/верификации и повышают предсказательную способность кодов для реакторных установок с жидкометаллическим теплоносителем.

Тепло- и гидродинамические характеристики ЯЭУ нуждаются в обосновании и анализе в переходных процессах или аварийных ситуациях с помощью системных теплогидродинамических, а также универсальных CFD-кодов [1].

Эксперименты и расчеты естественной циркуляции тяжелых жидкометаллических теплоносителей с помощью CFD-кодов [2—5] представляют интерес с точки зрения безопасности и лучшего понимания тепло- и гидродинамики, анализа конструкции ядерных реакторов с жидкометаллическим теплоносителем. Для тестирования CFD-кодов проводят слепое тестирование с использованием экспериментальных данных, которое позволяет определить уровень достоверности вычислительных инструментов, применяемых для численного анализа. Например, в [4] описывается слепой тест по развитию неустойчивости циркуляции свинцово-висмутового сплава в контуре экспериментальной установки TALL-3D в целях получения данных для трех кодов: автономного, теплогидравлического и вычислительной гидродинамики. Начальные и граничные условия, параметры определены с учетом ограничений моделирования и экспериментальных неопределенностей, численные расчеты сравниваются с экспериментом.

В 2022 г. экспериментальное изучение охлаждения реакторных установок с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем было проведено в ИТ СО РАН на лабораторном стенде, состоящем из соединяющихся в верхней камере четырех петель, имитатора ТВС из семи стержней и четырех теплообменников [6]. Модульная схема стенда позволяет измерять температуру в одной и до четырех замкнутых циркуляционных петлях. Первые эксперименты в одной петле выявили особенности функционирования стенда, в том числе выход на рабочий режим. Экспериментальные данные были использованы для верификации и валидации разрабатываемого расчетного кода.

Важной особенностью экспериментов является применение теплоизоляции. В исследованиях [2—5] используют явным образом обмотку частей стенда теплоизоляционными материалами (рис. 1, а). В стенде ИТ СО РАН (см. рис. 1, б) применялся оригинальный подход, детали которого приводятся в [6]. Учет

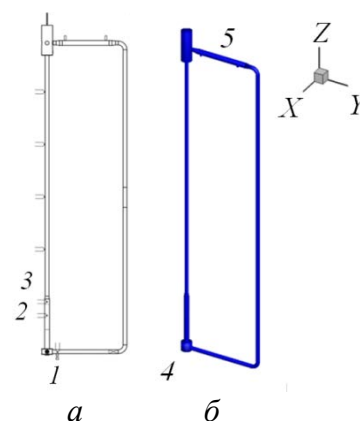


Рис. 1. Геометрия расчетной области: а — расположение термопар в однопетлевой конфигурации экспериментального стенда; б — однопетлевой контур установки ИТ СО РАН [6]: 1, 2, 3 — термопары ТП1, ТП2, ТП3 соответственно; 4, 5 — теплообменник, поддерживающий заданную мощность, и масляный соответственно

теплоизоляции является важным и для численного моделирования естественной циркуляции.

В настоящем научно-техническом сообщении приведены верификационные расчеты, выполненные по расчетной программе «Прецизионный масштабируемый вихреразрешающий CFD-модуль на базе DNS-приближения, ориентированный на петафлопсные (10^{15}) вычислительные ЭВМ. Версия 3.0» [7].

Постановка задачи. Для расчетов был принят трехмерный гидравлический контур высотой 3, шириной 1 м, диаметром 30 мм (см. рис. 1, б). Геометрия была построена с помощью редактора GeometryEditor, за основу взят чертеж ИТ СО РАН.

В качестве теплоносителя был использован близкий по физическим свойствам жидкому свинцу эвтектический свинцово-висмутовый сплав, нагрев которого обеспечивался с использованием ТВС в левом нижнем углу контура [6]. Постоянный расход масляного теплоносителя в теплообменнике 5 при заданной температуре поддерживался насосом (табл. 1). Расход масляного теплоносителя варьировался в диапазоне 70—95 г/с при температуре, изменяющейся в диапазоне 60—110 °С.

Т а б л и ц а 1. Температура и расход масла на входе теплообменника 5

Мощность, кВт	T , °С	Q , г/с
1	106,6	95,37
1,5	93,1	90,5
2	83,7	86,97
2,5	73,7	81,01
3	63,6	73,57

Движение тяжелого жидкометаллического теплоносителя в стенде включает в себя циркуляцию в трубопроводе, ТВС и теплообменнике. Граничные условия теплоизоляции задавались на всех границах расчетной области. В качестве граничных условий в замкнутом гидравлическом контуре приняты условия прилипания и непроницаемости, в качестве начального условия — температура теплоносителя 140 °С.

Были проанализированы результаты экспериментов [6] с мощностью нагревателя из диапазона 1—3 кВт. В этой серии исследований в начале тестов отсутствовала вынужденная циркуляция жидкометаллического теплоносителя и его движение осуществлялось только за счет развития естественной конвекции.

Численное моделирование. Течение тяжелого жидкометаллического теплоносителя в гидравлическом контуре рассчитывали для разной подводимой мощности со свойствами материалов [8]. Всего было

выполнено пять расчетов: 1, 1,5, 2, 2,5 и 3 кВт (табл. 2). Один вариант расчета на кластере из 16 ядер по времени занимал около 10 сут.

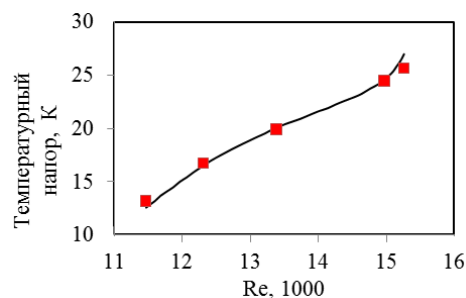
Т а б л и ц а 2. Температурный напор и расход теплоносителя

Мощность, кВт	Температурный напор, К		Расход теплоносителя, л/с	
	Расчет	Эксперимент	Расчет	Эксперимент
1	12,5	13,1	0,06	0,05
1,5	16,7	16,7	0,06	0,06
2	20,2	19,9	0,07	0,06
2,5	23,7	24,4	0,08	0,07
3	26,9	25,6	0,08	0,07

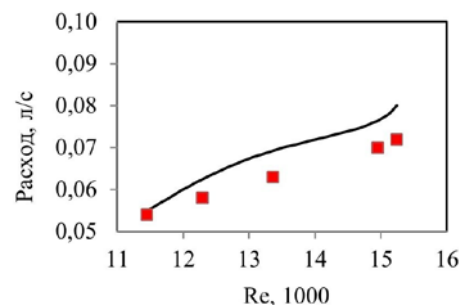
Для каждого расчета приведены температурный напор между термопарами ТП1 и ТП3 [6] и расход теплоносителя. Местоположение средств измерения показано на рис. 1, а. Погрешность измерения температурного напора и расхода не превышает 1%. Тепловой баланс совпадает с погрешностью ~1%.

На рис. 2 видно совпадение температурного напора — отклонение от эксперимента [6] составляет менее 5%. Как видно на рис. 3, совпадение отмечается и для расхода теплоносителя — отклонение от эксперимента [6] составляет менее 11%.

Моделирование выполнялось на сетке размером $513 \times 513 \times 33$ узлов.



Р и с. 2. Эксперимент (■) и результаты расчета (—) температурного напора в зависимости от числа Рейнольдса



Р и с. 3. Эксперимент (■) и результаты расчета (—) расхода теплоносителя в зависимости от числа Рейнольдса

Заключение. Таким образом, CFD-код на основе DNS-подхода может быть применен для моделирования естественной конвекции свинцово-висмутового теплоносителя в циркуляционном контуре при варьировании мощности.

Показано согласие температурного напора и расхода теплоносителя, отклонение от эксперимента составляет менее 5 и 11% соответственно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Девкин А.С., Мелихов О.И., Москалев А.М. и др. Зарубежные теплогидравлические коды улучшенной оценки. Опыт разработки, создание и применение. М., ОЦРК при Минатоме РФ, 2000. 176 с.
2. Moscardini M., Galleni F., Pucciarelli A. e.a. Numerical Analysis of the CIRCE-HERO PLOFA Scenarios. — Appl. Sci., 2020, v. 10, № 20, p. 7358.
3. Mariano T., Galleni F., Pucciarelli A. e.a. Natural and gas enhanced circulation tests in the NACIE heavy liquid metal loop. — In: Proc. 18th Intern. Conf. on Nucl. Engng ICONE'18. China, 17—21 May, 2010, p. 29969.
4. Grishchenko D., Papukchiev A., Liu C. e.a. TALL-3D open and blind benchmark on natural circulation instability. — Nucl. Engng Des., 2020, v. 358, p. 110386.
5. Naphade P., Borgohain A., ThundilKaruppa-Raj R., Maheshwari N. Experimental and CFD study on natural circulation phenomenon in lead bismuth eutectic loop. — Procedia Engng, 2013, v. 64, p. 936—945.
6. Прибатурин Н.А., Чуданов В.В., Аксенова А.Е. и др. Экспериментально-расчетное исследование естественной циркуляции свинцово-висмутового теплоносителя. — Труды НГТУ, 2023, № 4(143), с. 72—81.
7. Чуданов В.В., Аксенова А.Е., Первичко В.А. Расчет параметров свободно-конвективного течения свинцово-висмутового сплава в полости с поперечным градиентом температуры с помощью кода CONV-3D. — Атомная энергия, 2022, т. 132, вып. 4, с. 240—242.
8. Кириллов П.Л. Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике. Т. 3. Теплогидравлические процессы при переходных и нестандартных режимах. Тяжелые аварии. Защитная оболочка. Коды, их возможности, неопределенности. М.: ИздАт, 2014. 688 с.

Поступило в Редакцию 15.06.24

Р е ф е р а т ы

УДК 621.039

А да м о в Е.О., Ка ш и р с к и й А.А. **Быстрые реакторы в сценарных вариантах стратегии развития ядерной энергетики России.** — Атомная энергия, 2024, т. 136, вып. 5—6, с. 179—184.

В настоящее время ведущие конструкторские организации атомной отрасли страны разрабатывают ядерные энергетические установки для удовлетворения почти любого сегмента энергетического рынка. В рамках проектного направления «Прорыв» создается новая технологическая платформа ядерной энергетики на базе АЭС с реакторами большой мощности и замкнутым ядерным топливным циклом. Востребованность быстрых реакторов в России подтверждается разработанной в 2018 г. Стратегией развития ядерной энергетики России до 2050 г. и перспективами на период до 2100 г. и ее версией 2022 г.

Следует отметить, что роль быстрых реакторов в энергосистеме может отличаться в зависимости от поставленных целей и задач в части топливного обеспечения и принятого подхода к обращению с отработавшим топливом и отходами. В статье рассматриваются разные предпосылки, влияющие на параметры быстрых реакторов с учетом этих факторов в контексте стратегического планирования и последних расчетно-аналитических исследований. Рис. 3, список лит. 6 назв.

UDC 621.039

A d a m o v E.O., K a s h i r s k y A.A. (JSC «Proryv», Moscow). **Fast Reactors in Russian Strategic Nuclear Power Development Scenarios.** — Atomic Energy, 2024, v. 136, № 5—6, p. 179—184.

Currently, leading design organizations of the nuclear power industry in Russia are developing a wide range of nuclear power plants to meet virtually any segment of the country's energy market. Within the «Proryv» project direction, a new technological platform for nuclear energy is being created based on nuclear power plants with high-power reactors and a closed nuclear fuel cycle. The demand for nuclear energy in Russia is defined by the «Strategy for the Development of Nuclear Energy in Russia until 2050 and Prospects for the Period up to 2100», which was developed in 2018 and updated in 2022.

It should be noted that the role of fast reactors in the energy system may vary depending on the goals and objectives set in terms of fuel supply and the approach taken to handling SNF and radioactive waste. The report examines various assumptions affecting fast reactor parameters in the context of current industry strategic planning documents and the latest results of computational and analytical research. Fig. 3, ref. 6.

УДК 621.039.5

Т р о я н о в В.М., Ка м а е в А.А. **Становление быстрых реакторов. Роль БН-350.** — Атомная энергия, 2024, т. 136, вып. 5—6, с. 184—193.

Проанализирована история создания и эксплуатации БН-350 с точки зрения решения задач, стоявших на этапе промышленного освоения быстрых реакторов с натриевым теплоносителем. Сформулированы основные задачи, стоявшие перед проектом БН-350. Дано хронологическое описание этапов проектирования, создания, ввода и эксплуатации промышленного БН-350 с характеристикой возникавших проблем и достигнутых результатов.