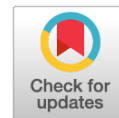


УДК 621.039.52.034.6

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_69

Научный обзор



Анализ применения комплексной математической модели к проектированию ЯЭУ с ЖМТ

А.А. Горбачев, А.А. Иванов

Санкт-Петербургское морское бюро машиностроения «Малахит», Санкт-Петербург, Россия

АННОТАЦИЯ

В настоящей статье рассматриваются вопросы создания и отработки алгоритмов управления ядерной энергетической установкой с использованием комплексных математических моделей, которые позволяют исследовать работу ядерной энергетической установки в различных динамических режимах, особенно на режимах пуска и расхолаживания, учитывая изменение агрегатного состояния жидкометаллического теплоносителя.

Цель работы состояла в обзоре опыта эксплуатации ядерных энергетических установок с жидкометаллическим теплоносителем и оценка применения комплексных математических моделей.

Проведен анализ литературы и интернет-ресурсов по выбранной теме.

В результате выполненных в последние годы исследовательских и научных работ подготовлена научно-техническая база для создания нового поколения ядерных энергетических установок с жидкометаллическим теплоносителем на инновационных решениях, обладающих повышенной ядерной и радиационной безопасностью, надежностью, улучшенными массогабаритными и эксплуатационными характеристиками. Для опережающей отработки ядерной энергетической установки и проведения комплексных испытаний и исследований до начала их серийного производства необходимо создавать комплексные математические модели. Каждый эксперимент с ядерной энергетической установки сначала отрабатывается на компьютерной модели. Это позволяет безопасно и с малыми затратами исследовать поведение реактора на различных режимах, включая аварийные, для последующей отработки алгоритмов управления.

Ключевые слова: ядерная энергетическая установка; жидкометаллический теплоноситель; математическое моделирование.

Как цитировать

Горбачев А.А., Иванов А.А. Анализ применения комплексной математической модели к проектированию ЯЭУ с ЖМТ // Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2025. Т. 4, № 1. С. 69–74. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_69

DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_69

Review

Analysis of using complex mathematical models to design nuclear power plants with liquid metal coolant

Aleksandr A. Gorbachev, Aleksandr A. Ivanov

Saint Petersburg Marine Engineering Bureau «Malachite», Saint Petersburg, Russia

ABSTRACT

This article examines the development of control algorithms for nuclear power plants using complex mathematical models that allow for studying the operation of a nuclear power plant in various dynamic modes, especially during start-up and cooldown. The models are based on the change in the physical state of the liquid metal coolant.

The article reviews the operating experience of nuclear power plants with liquid metal coolant and the application of complex mathematical models. Analysis of papers and online resources on the topic. Recent research has been used as a science and technology base for the development of a new generation of nuclear power plants with liquid metal coolant based on innovative solutions with increased nuclear and radiation safety, reliability, and improved weight, dimensional and operational parameters. To develop a nuclear power plant ahead of schedule and conduct comprehensive tests and research before its large-scale production, it is required to develop comprehensive mathematical models. Every experiment with a nuclear power plant is first tested on a computer model. This allows for safe and low-cost research of the reactor's behavior in various modes, including emergency, for further development of control algorithms.

Keywords: nuclear power plant; liquid metal coolant; mathematical simulation.

To cite this article

Gorbachev AA, Ivanov AA. Analysis of using complex mathematical models to design nuclear power plants with liquid metal coolant. *Transactions of the Saint Petersburg State Marine Technical University*. 2025;4(1):69–74. DOI: https://doi.org/10.52899/24141437_2025_01_69

Received: 10.01.2025

Accepted: 15.02.2025

Published online: 25.03.2025

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в мире наблюдается растущий интерес к ядерным энергетическим установкам (ЯЭУ) с жидкометаллическим теплоносителем (ЖМТ). Следует отметить, что реактор на быстрых нейтронах со свинцово-висмутовым теплоносителем (СВТ) признан одной из шести перспективных реакторных технологий, предлагаемых в рамках международного проекта «Generation-IV International Forum» (GIF) в качестве основы ядерной энергетики будущего. Программа «Generation-IV», впоследствии преобразованная в крупный международный проект GIF, создана в 2000 г. с целью организации международного сотрудничества по разработке перспективных ядерных энергетических систем и установок четвертого поколения. В составе участников проекта GIF Аргентина, Канада, Франция, Япония, Республика Корея, ЮАР, Великобритания, США, Китай и Россия.

В нашей стране после вывода из эксплуатации последней АПЛ проекта 705К в 1997 г. не осталось действующих ЯЭУ с СВТ. Разрабатывавшиеся в конце восьмидесятых годов прошлого века проекты ЯЭУ с ЖМТ на практике реализованы не были.

На сегодняшний день в России вновь активно ведутся работы по реализации проектов ЯЭУ с данным типом теплоносителя. Реализуются проекты таких энергетических реакторов с СВТ, как СВБР-100, БРЕСТ-ОД-300 [1].

Целесообразность использования эвтектического сплава свинец-висмут (РЬ ~44 %, Вн ~56 %) в качестве теплоносителя обусловлена его физико-химическими и термодинамическими свойствами, позволяющими в наиболее полной степени удовлетворить требованиям, предъявляемым к паропроизводящим установкам (ППУ)

в составе транспортных ЯЭУ. Особенно это касается массогабаритных характеристик, маневренности и безопасности [2].

Невысокая температура плавления СВТ (~125 °С) обеспечивает возможность ремонта оборудования и перегрузки топлива без дренирования, при поддержании его в жидком состоянии при температуре 160–180 °С за счет работы системы обогрева теплоносителя.

Решение об использовании транспортных ЯЭУ с ЖМТ может быть принято по результатам конкурсного проектирования установок с различными типами ЯЭУ с учетом испытаний и эксплуатации наземных стендов-прототипов.

Научно-технический задел, накопленный при освоении ЯЭУ с ЖМТ для АПЛ, позволил создать базу для разработки инновационной реакторной свинцово-висмутовой технологии, удовлетворяющей требованиям к реакторам XXI в. [2].

ПРОБЛЕМА «ЗАМОРАЖИВАНИЯ — РАЗМОРАЖИВАНИЯ» ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

В 1958 г. первая отечественная ЯЭУ с ЖМТ (стенд «27/ВТ») была выведена на энергетический режим работы. Стенд «27/ВТ» представлял собой наземный прототип ППУ АПЛ проекта 645 [3, 4]. По результатам эксплуатации стенда «27/ВТ» в 1959 г. на Северном машиностроительном предприятии состоялась закладка первой и единственной АПЛ проекта 645 «К-27», изображенной на рис. 1 [3].

При эксплуатации АПЛ проекта 645 важной практической проблемой явилось обоснование возможности многократного «замораживания — размораживания» СВТ, что могло потребоваться при длительных выводах АПЛ из эксплуатации. Исключению повреждения ППУ



Рис. 1. Атомная подводная лодка проекта 645 (URL: <http://atominfo.ru>, публикация «ОКБ ГИДРОПРЕСС отмечает 70-летний юбилей»).
Fig. 1. Nuclear submarine Project 645 (URL: <http://atominfo.ru>, see GIDROPPRESS Research Facility Celebrates Its 70th Anniversary).

при переходе СВТ из жидкого в твердое состояние и дальнейшем его охлаждении до температуры окружающей среды способствуют небольшая усадка СВТ при затвердевании и достаточно высокая пластичность при низкой прочности в твердом состоянии. Для безопасного «размораживания» ППУ был отработан специальный регламент температурно-временного режима разогрева, проверенный на крупномасштабных моделях и ППУ правого борта АПЛ проекта 645 после ее длительного пребывания в «замороженном» состоянии. Однако этот режим не был внедрен в практику в связи с принятым в середине 90-х гг. решением о прекращении дальнейшей эксплуатации АПЛ этого типа [2].

На первом этапе освоения ППУ с ЖМТ была применена паровая система обогрева РУ, что в итоге привело к существенным сложностям при монтаже и эксплуатации установки, снижало ее надежность и делало практически невозможным ввод в действие ЯЗУ после затвердевания теплоносителя в трубопроводах.

Нужно сказать, что свойство СВТ затвердевать при 125 °С в некоторых случаях играло и положительную роль. Например, при хранении отработанного «замороженного» СВТ формируется дополнительный защитный барьер на пути выхода радиоактивности в окружающую среду.

В дальнейшем опыт, полученный при эксплуатации АПЛ «К-27», был использован при создании АПЛ следующего поколения. Для отработки и испытаний ППУ был построен наземный стенд-прототип «КМ-1» и семь АПЛ с ППУ с СВТ по проектам 705 и 705К [1], одна из которых изображена на рис. 2.

Основным недостатком ЯЗУ с ЖМТ следующего поколения явилось наличие сложного и громоздкого берегового комплекса, в который должны были входить специальная котельная для поддержания сплава ЖМТ в жидком состоянии и электроподстанция,

обеспечивающая корабль электропитанием с нестандартными электротехническими характеристиками (по частоте и напряжению).

Теплообмен в жидких металлах имеет свои особенности, в значительной степени обусловленные их высокой теплопроводностью и, соответственно, низким значением числа Прандтля. При низких значениях числа Прандтля понятие теплового пограничного слоя, который в данном случае распространяется до центра канала, теряет смысл. При изучении теплообмена жидких металлов, прежде всего, в области теплоотдающей поверхности следует учитывать поведение примесного состава жидкометаллического теплоносителя у поверхностей его циркуляции для номинального режима и при отклонениях от режима нормальной эксплуатации, а также осуществлять контроль за его состоянием [4].

Таким образом, оптимальному решению вопросов создания и отработки алгоритмов разогрева и охлаждения СВТ, с учетом особенностей гидродинамики и теплообмена в жидкометаллических теплоносителях, должно способствовать создание комплексных математических моделей, которые позволили бы исследовать работу ЯЗУ с ЖМТ в различных динамических режимах, особенно на режимах пуска и расхолаживания, учитывая изменение агрегатного состояния СВТ.

Также стоит отметить, что использование электрической системы обогрева теплоносителя вместо паровой значительно снизит требования, предъявляемые к береговым системам обеспечения.

Таким образом, для опережающей отработки транспортных ЯЗУ и проведения комплексных испытаний и исследований до начала их серийного производства необходимо создавать комплексные математические модели. Каждый эксперимент с ЯЗУ сначала должен быть отработан на компьютерной модели. Это позволит безопасно



Рис. 2. Атомная подводная лодка проекта 705К (URL: <http://atominfo.ru>, публикация «ОКБ ГИДРОПРЕСС отмечает 70-летний юбилей»).

Fig. 2. Nuclear submarine Project 705K (URL: <http://atominfo.ru>, see GIDROPRESS Research Facility Celebrates Its 70th Anniversary).

и с малыми затратами исследовать поведение СВТ на таких режимах, как пуск и расхолаживание, для последующей отработки алгоритмов «замораживания — размораживания» теплоносителя.

Созданная теплогидравлическая математическая модель должна использоваться для последующей разработки и отладки алгоритмов управления в составе системы управления.

ПРИМЕНЕНИЕ КОМПЛЕКСНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ И ОТЛАДКЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЯЭУ

В процессе создания комплексных систем управления технических средств транспортных ЯЭУ следует учитывать опыт разработки цифровых систем последних заказов и, в частности, необходимость сокращения сроков стендовых, швартовых и ходовых испытаний за счет уменьшения объема доработок функционального программного обеспечения (ФПО), непосредственно реализующего алгоритмы управления в штатной аппаратуре. В настоящее время, когда программное обеспечение системы управления проходит отладку и настройку на испытательном стенде или работающем объекте, издержки тестовой эксплуатации считаются неизбежными.

Наиболее рациональное решение постулируемых проблем — использование технологий, которые, с одной стороны, должны быть совместимы с существующими и не приводить к их кардинальному изменению, а с другой — обеспечить повышение качества алгоритмов и ФПО [5]. Основное направление повышения качества — это автоматизация всего комплекса работ по созданию ФПО с отработкой алгоритмов управления на комплексных математических моделях объекта до поставки аппаратуры системы обогрева СВТ на заказ.

Комплект аппаратуры функционирует во взаимодействии с имитатором объекта управления, в качестве которого используется математическая модель, созданная с помощью различных инструментально-программных средств. Соответственно, повышение качества ПО приведет к значительному уменьшению объема отладочных работ при подготовке и проведении межведомственных и приемосдаточных испытаний.

Существенное повышение качества алгоритмов управления и контроля может быть достигнуто на основе автоматизации работ по созданию ПО с отработкой алгоритмов на комплексных динамических математических моделях объекта до поставки аппаратуры системы управления на заказ, а впоследствии — при внесении модификаций и корректировок в ПО. Целесообразность такого подхода была отмечена академиком В.А. Василенко более

двадцати лет назад в работах по сквозной интеграции технологии создания систем управления ЯЭУ, и с тех пор такие предприятия, как ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова», АО «Концерн «НПО Аврора», АО «ОКБМ Африкантов» и АО «СПМБМ «Малахит», ведут работы в данном направлении.

Математические модели помогают понять процессы, устанавливая качественные и количественные характеристики их состояний и предсказать динамику интересующих в данных процессах характеристик. Это, в свою очередь, неизбежно связано с необходимостью исследования допустимости различных режимов работы, оценки, отработки алгоритмов управления и прогнозирования технического состояния. При этом особого внимания требует моделирование потенциально опасных переходных режимов, таких как пуск и расхолаживание ЯЭУ, и процессов, связанных с нарушением нормальных условий эксплуатации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных в последние годы комплексов НИР и ОКР подготовлена научно-техническая база для создания нового поколения автоматизированных РУ с ЖМТ на инновационных решениях, обладающих повышенной ядерной и радиационной безопасностью, надежностью, улучшенными массогабаритными и эксплуатационными характеристиками. Разработанные технические решения направлены на устранение недостатков РУ с ЖМТ, выявленных при их эксплуатации в составе выведенных из строя АПЛ.

Для опережающей отработки ЯЭУ и проведения комплексных испытаний и исследований до начала их серийного производства необходимо создавать комплексные математические модели. Каждый эксперимент с ЯЭУ сначала отрабатывается на компьютерной модели. Это позволяет безопасно и с малыми затратами исследовать поведение реактора на различных режимах, включая аварийные, для последующей отработки алгоритмов управления.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией. Личный вклад каждого автора: А.А. Горбачев — сбор, анализ и обработка материала, написание текста статьи; А.А. Иванов — редактирование статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. All authors made a substantial contribution to the conception of the study, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the article, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the study. Personal contribution of each author:

A.A. Gorbachev, collection, analysis and processing of material, writing the text of the article; A.A. Ivanov, article editing.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федорович Е.Д., Курдюков И.И. Аналитический обзор опыта эксплуатации и современных разработок ядерных энергетических установок средней и малой мощности с жидкометаллическим теплоносителем. Часть 2 // Технологии обеспечения жизненного цикла ЯЭУ. 2020. № 3. С. 9–31. EDN: RHOORV
2. Тошинский Г.И. Атомная энергетическая установка с жидкометаллическим теплоносителем для подводных лодок. В кн.: Роль российской науки в создании отечественного подводного флота / под ред. А.А. Саркисова. Москва: Наука, 2008. С. 600–613.
3. Тошинский Г.И. Первый в мире реактор с теплоносителем свинец-висмут стенд 27/ВТ. Как всё начиналось. В кн.: V Между-

народная конференция: «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях» (ТЖМТ-2018). Обнинск: ГНЦ РФ-ФЭИ, 2019. С. 8–57.

4. Сорокин А.П., Кузина Ю.А. Физическое моделирование гидродинамики и теплообмена в быстрых реакторах с жидкометаллическим теплоносителем // Атомная энергия. 2020. Т. 128, № 5. С. 259–268. EDN: IJNICG

5. Замуков В.В., Курдюков И.И., Разуваев Е.Н. Внедрение сквозной технологии разработки алгоритмов управления сложными техническими системами объектов ВМФ // Судостроение. 2012. № 2. С. 34–39. EDN: OZCTCH

REFERENCES

1. Fedorovich ED, Kurdyukov II. Analytical review of operating experience and modern developments of medium and small power liquid metal cooled nuclear reactors. Part 2 (modern developments). *Nuclear propulsion reactor plants. Life cycle management technologies*. 2020;(3):9–31. EDN: RHOORV
2. Toshinsky GI. Nuclear power plant with liquid-metal coolant for submarines. In: Sarkisov AA, editor. *The role of russian science in the creation of domestic submarine fleet*. Moscow: Nauka; 2008. P. 600–613. (In Russ.)
3. Toshinsky GI. The world's first reactor with lead-bismuth coolant Stand 27/VT. How it all began. In: *V International conferences*

"Heavy liquid-metal coolants in nuclear technologies" (TZhMT-2018). Obninsk: SSC RF-FEI; 2019. P. 8–57. (In Russ.)

4. Sorokin AP, Kuzina YA. Physical modeling of hydrodynamics and heat transfer in liquid-metal cooled fast reactors. *Atomic Energy*. 2020;128(5):259–268. EDN: IJNICG

5. Zamukov VV, Kurdyukov II, Razuvaev EN. Implementation of through technology of developing algorithms for control of naval objects complicated technical systems. *Shipbuilding*. 2012;(2):34–39. EDN: OZCTCH

ОБ АВТОРАХ

***Александр Александрович Горбачев**, инженер-конструктор 1-й категории; адрес: Россия, 196135, Санкт-Петербург, ул. Фрунзе, д. 18; e-mail: Dark1messiah@mail.ru

Александр Александрович Иванов, инженер-конструктор 1-й категории; e-mail: Alekzander-ivanov@yandex.ru

AUTHORS' INFO

***Aleksandr A. Gorbachev**, design engineer, 1st category; address: 18 Frunze street, 196135, Saint Petersburg, Russia; e-mail: Dark1messiah@mail.ru

Aleksandr A. Ivanov, design engineer, 1st category; e-mail: Alekzander-ivanov@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author