

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-4-55-64>

УДК 621.039.4:536.2:004.94

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЛУЧАТЕЛЬНОЙ КАПСУЛЫ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА Mo-99 В РЕАКТОРЕ ВВР-К

А. Ч. Ашибаев^{*}, Д. С. Сайранбаев, А. А. Шаймерденов

РГП «Институт ядерной физики» Агентства Республики Казахстан по атомной энергии, Алматы, Казахстан

** E-mail для контактов: ashibayev@inp.kz*

В настоящей работе представлены результаты теплофизического анализа конструкции облучательной капсулы, предназначенной для повышения удельной активности ^{99}Mo в исследовательском реакторе ВВР-К. Численное моделирование было проведено в программном комплексе ANSYS Fluent 2021 R2 для трёх предложенных конфигураций активной зоны. Показано, что разработанная конструкция облучательного устройства обеспечивает надёжный тепловой режим при максимальной температуре порошка триоксида молибдена, равной 152,6 °C, и температуре теплоносителя, не превышающей 50,1 °C. Результаты подтверждают безопасность эксплуатации облучательного устройства на реакторе ВВР-К как в бериллиевой ловушке в центре активной зоны, так и в штатной высокопоточной ячейке.

Ключевые слова: исследовательский реактор, молибден-99, облучательное устройство, тепловой режим, теплофизическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

Более 80% ядерно-диагностических процедур в мире основаны на применении метастабильного изотопа технеция-99m ($^{99\text{m}}\text{Tc}$), обладающего рядом преимуществ по сравнению с другими радионуклидами, используемыми в производстве радиоактивных фармацевтических препаратов [1]. Метастабильное состояние технеция образуется с абсолютной интенсивностью 89% в результате β^- -распада молибдена-99 и имеет период полураспада, равный 6,01 часам. На исследовательских реакторах получение ^{99}Mo осуществляется преимущественно двумя методами: осколочным и нейтронно-активационным. Второй метод реализуется, начиная с 1998 года, на базе исследовательского реактора ВВР-К путём облучения 10 г порошка триоксида молибдена MoO_3 в штатной облучательной капсуле, которая находится в центральной облучательной позиции одного из центральных облучательных каналов (ОК) активной зоны (АЗ) реактора ВВР-К. Конечная удельная активность Mo-99, получаемая в вышеописанных условиях, равна $(2,3 \pm 0,3)$ КИ/г [2]. Одним из эффективных методов увеличения удельной активности ^{99}Mo является увеличение доли эпитетловых нейтронов в общем нейтронном спектре, поскольку сечение реакции $^{98}\text{Mo}(\text{n},\gamma)^{99}\text{Mo}$ возрастает с 0,13 барн для тепловых нейтронов до 6,7 барн при облучении молибденовой мишени эпитетловыми нейтронами [3]. Практически данный метод реализуется путём разработки конструкции облучательного устройства (ОУ) и/или модернизации компоновки АЗ. Подобные работы были выполнены, к примеру, на исследовательских реакторах ИРТ-Т и IEA-R1 [4, 5], которые находятся в городах Томск (Россия) и Сан-Паулу (Бразилия) соответственно. В обоих случаях было предложено установить в центре АЗ бериллиевый замедлитель, внутри которого размещается молибденовая мишень. Подобное нововведение позволяет, в случае реактора ИРТ-Т повысить удельную активность ^{99}Mo с 1 КИ/г для штатного облучения до 3,4 КИ/г, а в случае реактора IEA-R1 с 1,1 КИ/г до

1,2 КИ/г. Малый прирост в 2% во втором случае объясняется малой толщиной бериллия и окружающими его тепловыделяющими сборками с преимущественно быстрым потоком нейтронов, что указывает на необходимость разработки конструкции ОУ совместно с изменением конфигураций АЗ реактора ВВР-К. В ходе анализа литературного обзора и проведения нейтронно-физических расчётов [6] было разработано ОУ, представленное на рисунке 1, и рассмотрены две модифицированные конфигурации АЗ реактора ВВР-К, представленные на рисунке 2.

В соответствии с вышеизложенным, цель настоящей работы заключается в исследовании теплофизических условий эксплуатации разработанного ОУ в различных конфигурациях АЗ исследовательского реактора ВВР-К. Это позволит оценить допустимые температурные режимы и подтвердить возможность безопасной эксплуатации ОУ.

МЕТОДЫ

Теплофизический расчёт в данной работе был проведён в программном комплексе ANSYS Fluent 2021 R2, который предназначен для численного решения дифференциальных уравнений тепло- и массопереноса, гидродинамики и многокомпонентных течений. ANSYS Fluent основан на методе конечных объёмов, суть которого заключается в разбиении расчётной модели на совокупность контрольных объёмов. Для каждого из них формируется система алгебраических уравнений, решая которую можно определить различные параметры системы. Численное моделирование теплообмена в ANSYS Fluent основано на решении уравнения энергии, которое включает в себя механизмы теплопроводности, конвективного теплообмена и лучистого теплообмена. Теплопроводность учитывает перенос тепла внутри тел за счёт молекулярной диффузии, конвекция – перенос тепла за счёт движения жидкости, а теплообмен излучением подразумевает испускание нагретыми телами фотонного излучения.

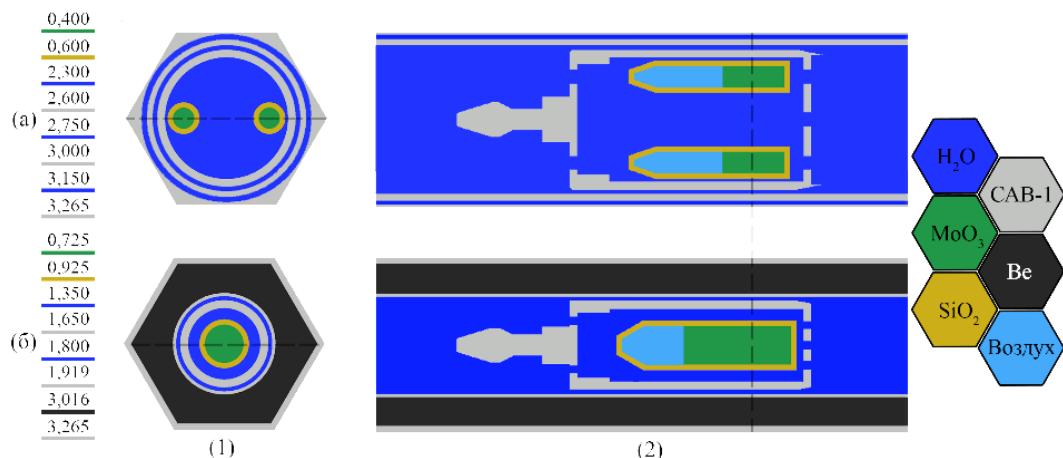


Рисунок 1. Горизонтальные (1) и вертикальные (2) разрезы штатной облучательной капсулы (а) и ОУ (б). Перечень чисел обозначает радиусы окружностей (для шестиугольников – радиусы вписанных окружностей), измеренные от центра соответствующих моделей (за исключением образцов в штатном пенале). Все значения приведены в сантиметрах. Пунктирные линии каждой из плоскостей разрезов указывают на соответствующие плоскости перпендикулярных разрезов

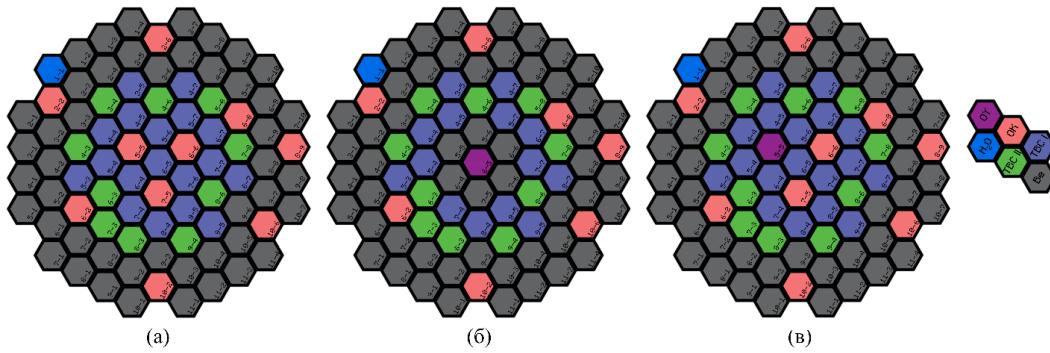


Рисунок 2. Стандартная (а), модернизированная с бериллиевой ловушкой вокруг ОУ в ячейке 6-5 (б) и модернизированная А3 с ОУ в ячейке 5-5 (в)

Теплофизическое моделирование выполнялось в три этапа: тестовом, верификационном и основном. В рамках тестового этапа был проведён теплофизический расчёт эталонной модели колена трубопровода, представленного в официальном руководстве ANSYS Fluent [7] и показанного на рисунке 3. Модель описывает трёхмерное турбулентное течение и теплообмен в смесительном участке трубопровода. С целью снижения вычислительной нагрузки расчётная модель была усечена по плоскости симметрии, так как течение симметрично относительно центральной оси. Геометрия модели включает две области впуска (velocity inlet) и одну область выпуска (pressure outlet) жидкости, в качестве которой выступает вода. Первый впускной участок соответствует основному, относительно холодному, потоку с температурой 20 °C и скоростью 40 см/с по оси y. Вторая область впуска, расположенная на изгибе трубы, соответствует относительно горячему потоку с температурой 40 °C и скоростью 120 см/с по оси y. Манометрическое давление в выпускной области было принято равным нулю. Стенки трубопровода моделировались как адиабатические и непроницаемые

(no-slip wall). Для моделирования турбулентного течения жидкости была применена стандартная модель турбулентности k-ε с использованием усовершенствованного метода учёта пристенного слоя (enhanced wall treatment, EWT).

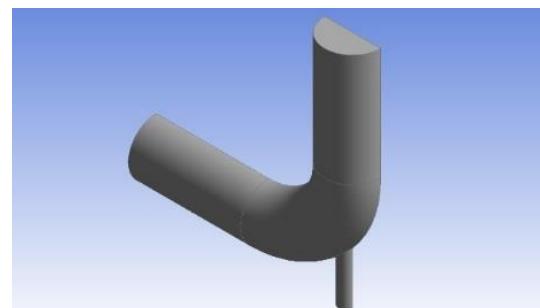


Рисунок 3. Изометрический вид модели колена трубопровода из официального руководства ANSYS Fluent [7]

На втором, верификационном этапе был выполнен теплофизический анализ облучательной капсулы, представленной на рисунке 4. Рассматриваемая модель описывает конструкцию облучательного ка-

РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЛУЧАТЕЛЬНОЙ КАПСУЛЫ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА Mo-99 В РЕАКТОРЕ ВВР-К

нала, внутри которого размещена модифицированная штатная капсула. Её конструктивное отличие от стандартной заключается в изменённом расположении отверстий, предназначенных для циркуляции теплоносителя первого контура реактора ВВР-К. В верхней части алюминиевой капсулы предусмотрены три отверстия, организованные в форму равностороннего треугольника. В нижней части капсулы расположено одно центральное отверстие. Специфическая конфигурация отверстий обусловлена расположением содержимого капсулы: в капсулу размещаются три алюминиевые субкапсулы, ориентированные аналогично верхним отверстиям капсулы в треугольной форме, но с угловым смещением 60° относительно центра облучательного канала.

Две субкапсулы содержат по 10, сложенных друг на друга, пластин бериллида титана Be_{12}Ti , каждая из которых имеет размер $8,5 \times 8 \times 1,5$ мм. Третья субкапсула заполнена металлическим бериллием в виде пэбблов общей массой 5 г и высотой засыпки 15 мм. Все субкапсулы герметизированы в атмосфере аргона при атмосферном давлении. Расчёт энерговыделения в материалах осуществлялся для конфигурации с размещением ОУ в первой позиции ячейки 5-5 реактора ВВР-К [8]. Значения энерговыделения компонентов верификационной модели представлены в таблице 1.

Скорость теплоносителя в области впуска была принята равной 0,1 см/с, что обусловлено особенностями геометрии алюминиевой капсулы. В связи с этим было использовано приближение Буссинеска с заданием коэффициента теплового расширения, соответствующего нормальным условиям и взятого из базы данных Fluent. В рамках численного расчёта вышеописанной модели были рассмотрены два режима течения теплоносителя: ламинарный и турбулентный. Последний был описан с использованием реализуемой модели турбулентности $k-\varepsilon$.

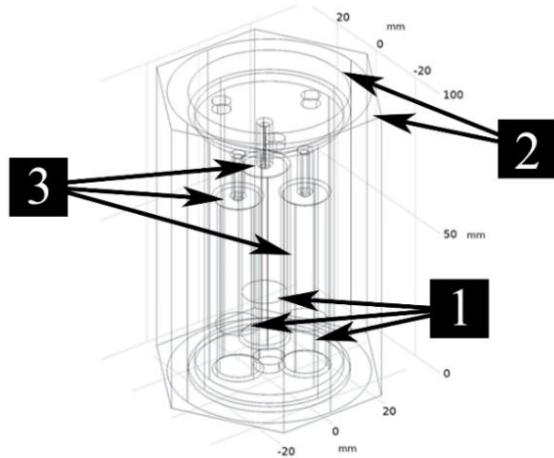


Рисунок 4. Трёхмерная модель модифицированной штатной капсулы (2) с тремя алюминиевыми субкапсулами (3), с образцами Be_{12}Ti и Be (1) в программном комплексе COMSOL Multiphysics [8]

Таблица 1. Энерговыделения компонентов верификационной модели [8]

Компонента	Энерговыделение, Вт	Удельное энерговыделение, Вт/г
Облучательная капсула	118,8	1,65
Алюминиевая субкапсула с Be	15,1	1,55
Образцы Be	6,3	1,26
Алюминиевая субкапсула с Be_{12}Ti (1)	15,4	1,58
Образцы Be_{12}Ti (1)	3,0	1,28
Алюминиевая субкапсула с Be_{12}Ti (2)	15,4	1,58
Образцы Be_{12}Ti (2)	3,0	1,29

Геометрическая сетка модели была сформирована с размером элемента 0,05 см. С включённой аддитивной регулировкой размеров общее количество элементов составило 28203204. Максимальные коэффициенты вытянутости и искривлённости составили 11,09 и 0,85 соответственно, минимальное ортогональное качество было равно 0,15. Указанные характеристики сетки являются наиболее информативными критериями оценки качества сетки. На основе вышеизложенных значений можно сделать вывод, что все значения находятся в пределах рекомендованных диапазонов, приведённых в руководстве ANSYS Fluent [7], при этом относительно большая вытянутость элементов объясняется вытянутостью модели вдоль оси z .

Во время основного этапа были построены трёхмерные модели штатного облучательного канала и ОУ, изображённые на рисунке 5. С целью снижения вычислительных затрат расчётная модель была усечена по высоте: область расчёта включает сегмент, охватывающий +3 см от головки капсулы вверх и -3 см от его нижнего основания. Теплоотвод в модели реализуется за счёт циркуляции теплоносителя первого контура, который в виде fluid-объекта обтекает капсулу, а также внутреннюю и внешнюю конструкции облучательного канала. В горизонтальном сечении модель охватывает одну ячейку А3 реактора. Принятое геометрическое допущение обосновано минимальным теплообменом между ячейками А3 вследствие эффективной термической экранировки, обеспечивающей постоянным потоком воды за счёт главных циркуляционных насосов реактора ВВР-К.

Сеточная модель для ОУ, как и в случае с моделью с бериллидом титана, имеет размер элемента, равный 0,05 см. Общее количество элементов составило 34205291 и 17100360 для штатного облучательного канала и ОУ соответственно. Приблизительно двукратная разница связана с включённой аддитивной регулировкой и, соответственно, самими геометриями моделей. Максимальные коэффициенты искривлённости, равные 21,90 для штатного облучательного канала и 40,74 для ОУ, объясняются вытянутостью вдоль оси z рассматриваемых моделей. Максимальные значения коэффициентов искривлённости (0,86 и 0,85) и минимальные значения ортого-

нальных качеств (0,14 и 0,15) соответствуют рекомендованным диапазонам, приведённым в руководстве ANSYS Fluent.

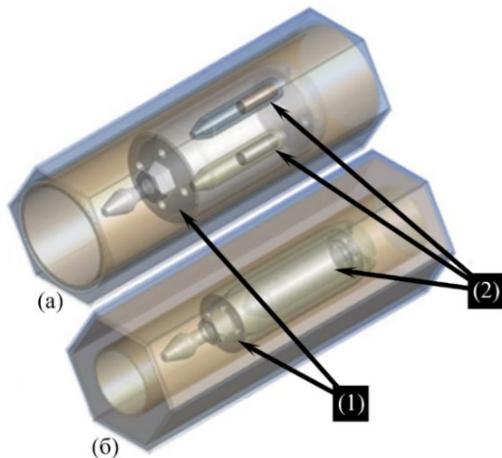


Рисунок 5. Трёхмерные модели штатного облучательного канала (а) и ОУ (б) в программе ANSYS DesignModeler, усечённые в рамках одной ячейки А3 исследовательского реактора ВВР-К и высоте ± 3 см от головки капсулы и её нижней части. (1) – капсулы из сплава CAB-1, (2) – кварцевые ампулы с образцами MoO₃

Как уже говорилось ранее, в случае рассмотрения охлаждения компонентов А3 на реакторе ВВР-К основной перенос тепла осуществляется принудительной конвекцией, вызванной работой главных циркуляционных насосов, которые обеспечивают расход теплоносителя первого контура около $680 \text{ м}^3/\text{ч}$, для штатной конфигурации А3. Для определения средней скорости воды было рассчитано гидравлическое сечение А3 реактора с учётом комплексных геометрий его компонентов. Средняя принятая скорость воды составила приблизительно $48,4 \text{ см}/\text{с}$. Соответствующее значение числа Рейнольдса в несколько раз превышает критическое значение критерия подобия для гладких труб (~ 2300) и равняется около 22000, что свидетельствует об установленном турбулентном режиме течения.

Для описания поведения воды была применена реализуемая модель турбулентности $k-\epsilon$ ($k-\epsilon$ Realizable), обладающая рядом преимуществ по сравнению с классической моделью $k-\epsilon$ и другими турбулентными моделями. В частности, она использует переменную турбулентную вязкость и модифицированное уравнение переноса для скорости диссипации энергии ϵ и обеспечивает корректный расчёт в сложных геометриях, включая вихревые и вторичные образования, при умеренных вычислительных затратах.

Вклад естественной конвекции в теплообмен был оценён на основе отношения числа Грасгофа Gr к квадрату числа Рейнольдса Re. При полученном значении данного соотношения около 0,41 (для полной длины канала) и с учётом незначительного температурного перепада в модели (в отсутствие рециркуляции) можно считать влияние естественной конвекции

пренебрежимо малым. Таким образом, теплоноситель в модели представляет собой несжимаемую жидкость с плотностью при нормальных условиях. Доля лучистого теплообмена в рассматриваемой модели оценивалась на основе максимальной температуры порошка триоксида молибдена $200 \text{ }^{\circ}\text{C}$, полученной в ходе предварительных расчётов. Согласно закону Стефана-Больцмана, удельное энерговыделение молибденовой мишени составляет $4,73 \cdot 10^{-9} \text{ Вт}/\text{г}$, что более чем в 10^9 раз меньше удельного энерговыделения за счёт облучения мишени на реакторе. Следовательно, лучистым теплообменом в рассматриваемой задаче можно пренебречь. Для оценки вязкого нагревания, возникающего вследствие внутреннего трения жидкости, использовался безразмерный критерий Бринкмана. Полученное значение критерия (порядка 10^{-9}) свидетельствует о пренебрежимо малом вкладе данного механизма в общий теплообмен.

Моделирование пограничного слоя при турбулентном течении осуществлялось с применением метода усовершенствованного метода учёта пристенного слоя (EWT), который обеспечивает аддитивный выбор между настенными функциями (при $y^+ > 30$) и полным численным разрешением ламинарного подслоя (при $y^+ < 1$). В интервале $1 < y^+ < 30$ реализуется плавный переход между этими режимами. Таким образом достигается устойчивость расчёта при сохранении приемлемой плотности сетки в пристенных областях.

Начальная температура теплоносителя на входе в расчётную область была принята равной $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$ в соответствии с отчётом анализа и безопасности исследовательского реактора ВВР-К. При скорости потока $48,4 \text{ см}/\text{с}$, температура обратного потока воды на выходе была принята за $50 \text{ }^{\circ}\text{C}$ – максимально допустимое значение согласно экспериментально измеренным данным, что соответствует разности температур на входе и выходе $\Delta T = 10 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Манометрическое давление на выходе было принято равным 0 Па, однако учёт гидростатического и гидродинамического давлений был учтён путём включения силы притяжения в методике. Внешние поверхности твёрдых тел считались адиабатическими, а боковая граница модели жидкости имитировала межъячеичный теплоноситель с температурой $40 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Проведённые предварительные расчёты показали, что температура воды не достигает точки кипения, а температура твёрдых компонентов (за исключением воздуха) остаётся ниже температур плавления, что позволяет исключить фазовые переходы и упростить проводимое численное моделирование.

Расчётные значения энерговыделений, полученные с использованием MCNP 6.2 [9], приведены в таблице 2. Максимальная относительная погрешность, выраженная в виде удвоенного стандартного отклонения, не превышает 5%, что соответствует 95%-ной доверительной вероятности и допускает использование данных в ANSYS Fluent.

**РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЛУЧАТЕЛЬНОЙ КАПСУЛЫ,
ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА Mo-99 В РЕАКТОРЕ ВВР-К**

Таблица 2. Расчётные значения энерговыделения с учётом стандартного отклонения (2σ) для трёх конфигураций А3 всех компонентов штатного ОК и ОУ

Конфигурация А3	Компонента	Энерговыделение		2σ
		Вт	Вт/г	
Штатная	Порошок MoO ₃ (правый)	23,8	4,76	0,06
	Кварцевая ампула SiO ₂ (правая)	41,2	5,10	
	Порошок MoO ₃ (левый)	23,0	4,61	
	Кварцевая ампула SiO ₂ (левый)	39,7	4,91	
	Капсула из САВ-1	539,5	3,03	
	Внутренняя часть ОК из САВ-1	757,3	3,14	
	Внешняя часть ОК из САВ-1	1198,2	3,89	
С бериллиевой ловушкой	Порошок MoO ₃	40,7	4,07	0,06
	Кварцевая ампула SiO ₂	38,7	2,50	
	Капсула из САВ-1	232,6	2,29	
	Внутренняя часть ОУ из САВ-1	164,7	2,22	
	Внешняя часть ОУ из САВ-1	649,5	2,24	
	Бериллиевая засыпка	942,3	2,15	
С ОУ в ячейке 5-5	Порошок MoO ₃	42,2	4,22	0,06
	Кварцевая ампула SiO ₂	52,3	3,38	
	Капсула из САВ-1	306,6	3,01	
	Внутренняя часть ОУ из САВ-1	219,4	2,95	
	Внешняя часть ОУ из САВ-1	918,2	3,17	
	Бериллиевая засыпка	1476,5	3,37	

Особое внимание было уделено оценке неопределённости численного моделирования. Комплексная погрешность включает вклад: (1) сеточной дискретизации; (2) модельных допущений; (3) численной сходимости; (4) неопределённости входных данных. Сеточная погрешность оценивалась сравнением с результатами, полученными на более грубой сетке (около 6÷7 млн элементов для каналов и ОУ соответственно). Разность средних и максимальных температур образцов MoO₃ в расчётах составила не более 4,3%. Численная сходимость обеспечивалась достижением резидуальной ошибки 10^{-3} для уравнений скорости, энергии турбулентности и импульса, и 10^{-6} – для энергии. Ошибка входных данных минимизировалась за счёт использования усреднённых (экспериментально подтверждённых) значений температуры и скорости потока, а также выбора граничных условий, моделирующих наихудший сценарий (обратный поток и так далее). Погрешность упрощений была оценена ранее через критерии подобия. Отдельно стоит отметить вклад упрощения, что бериллиевая засыпка моделировалась как гомогенный материал с физическими свойствами металлического бериллия. Совокупная относительная неопределённость численного решения оценивается в пределах $\pm 10\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение численных результатов с эталонными полями температуры и скорости, взятыми из руководства ANSYS Fluent, представлено на рисунке 6. Максимальная температура в расчётной модели составила 40,1 °C и наблюдалась вблизи входа горячей воды в систему. Максимальная скорость (136,3 см/с) была зафиксирована в зоне смешения двух потоков. На основе рисунка 6 можно заключить, что результаты, полученные в ходе численных вычислений, практически совпадают с эталонными данными из руководства ANSYS Fluent.

На рисунке 7 приведены температурные поля, полученные в ANSYS Fluent для обоих режимов, а также эталонное поле температур в [8], рассчитанное в программном комплексе COMSOL Multiphysics. Максимальные температуры в системе составили 82,2 °C при ламинарном и 79,3 °C при турбулентном течениях, при этом расчёчная температура в COMSOL Multiphysics не превысила 85 °C. Данные значения, а также близость температурных профилей для ламинарного режима течения в ANSYS Fluent и COMSOL Multiphysics, подтверждают корректность применяемой методики в ANSYS Fluent. Важно отметить, что температурные поля для трёх конфигураций представлены с использованием различных шкал цветовой легенды, соответствующих индивидуальным диапазонам температур в каждом случае. В связи с этим прямое сравнение насыщенности окраски между изображениями различных вариантов некорректно и анализ следует проводить на основе приведённых числовых значений.

Поля компоненты скорости по оси z для обоих режимов течения приведены на рисунке 8. Анализ полученных данных показал, что при принятой скорости теплоносителя 0,1 см/с доминирующим механизмом теплопередачи является вынужденная конвекция, что и объясняет близость температурных полей для двух режимов течения теплоносителя. При ламинарном течении наблюдается протяжённый след жидкости, входящей через верхнее отверстие капсулы, что свидетельствует о меньшем перемешивании входящих потоков воды в алюминиевую капсулу. В турбулентном режиме, напротив, происходит образование обратного течения, связанного с вытеснением нагретой жидкости. Следствием этого является локальный нагрев жидкости, который можно увидеть на рисунке 7. Локальные изменения направления течения жидкости представлены на горизонтальных разрезах полей компоненты скорости по оси z на рисунке 9. Отрицательное значение скорости соответствует основному потоку, направленному вниз, положительное – встречному течению.

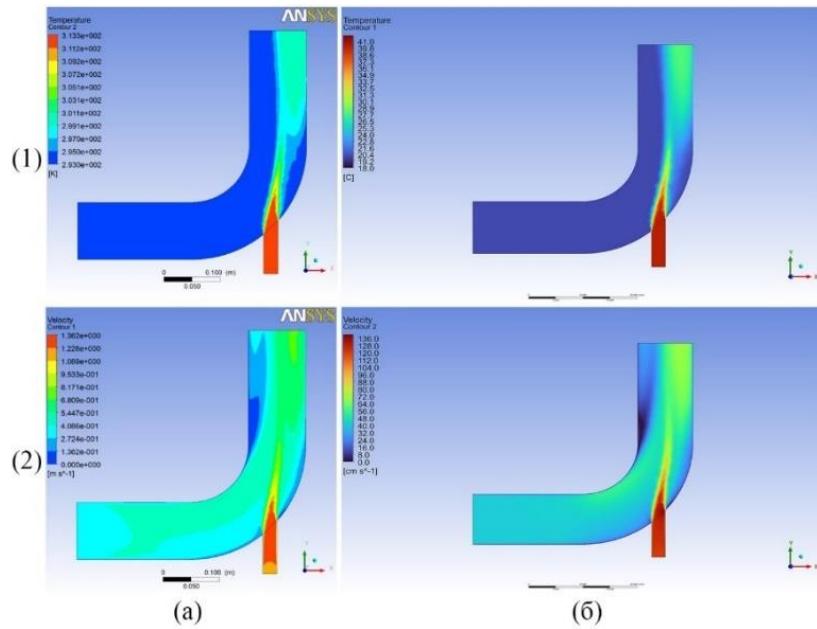


Рисунок 6. Сравнение эталонных результатов из руководства ANSYS Fluent: с результатами численного моделирования (а) и теплофизических расчётов (б) модели колена трубопровода температурного поля (1) и поля скоростей (2) на плоскости симметрии [7]

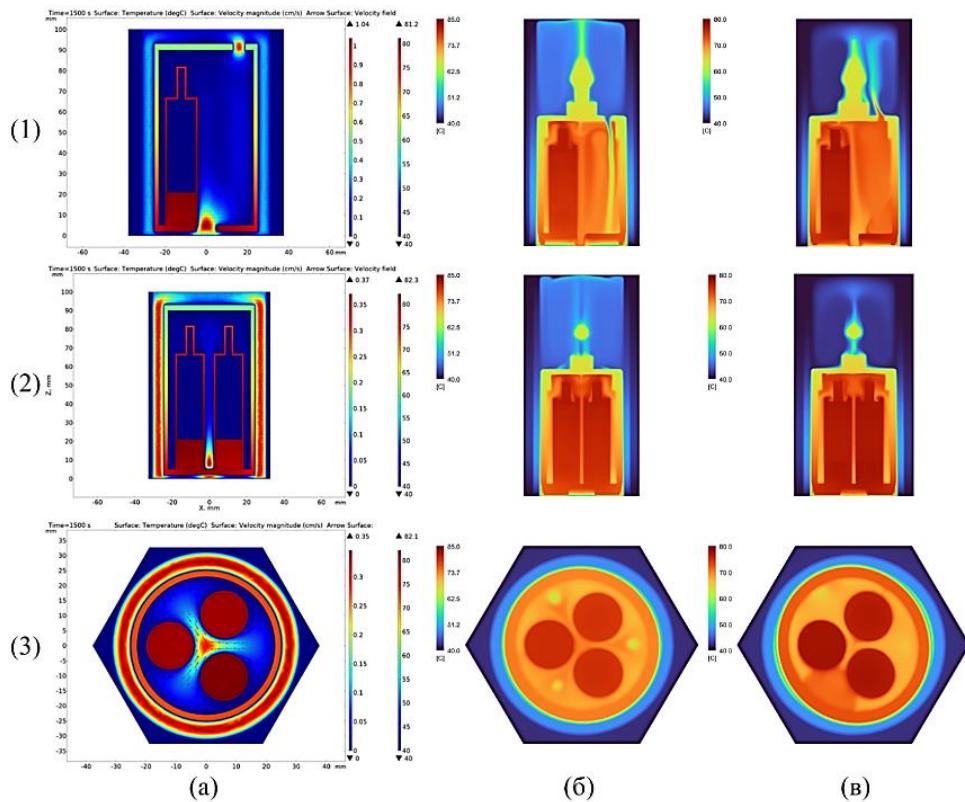


Рисунок 7. Температурные поля для расчётной модели: в COMSOL Multiphysics (а) [8], в ANSYS Fluent с ламинарным режимом течения (б) и в ANSYS Fluent с турбулентным режимом течения (в) для вертикальных разрезов (1) и (2) и горизонтального разреза (3)

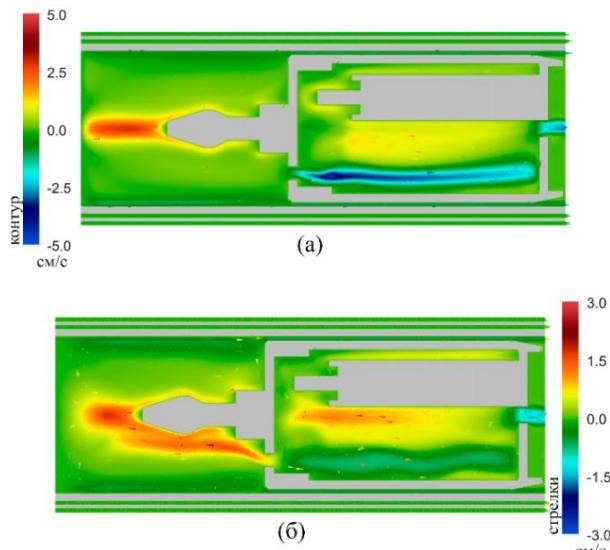


Рисунок 8. Вертикальные поля скоростей для моделирования ламинарного (а) и турбулентного (б) режимов, сечения по плоскости XZ с $Y = 0$ см

Согласно рисунку 9, рециркуляция теплоносителя в верхней части капсулы для турбулентного режима наблюдается только через одно из трёх доступных отверстий. В оставшихся двух движение жидкости сохраняет отрицательное направление вдоль оси z , что указывает на комплексную рециркуляцию в верхней части капсулы. Средняя скорость воды в кольцевом зазоре между внутренней поверхностью облучательного канала и внешней стенкой капсулы составляет около 1 см/с, что совпадает с результатами, полученными в эталонной модели COMSOL Multiphysics.

На основе анализа скоростных и температурных полей можно заключить, что формирующиеся вихревые структуры над и внутри капсулы обусловлены ламинарной рециркуляцией, поскольку они наблюдаются в обоих режимах течения. Локальные возмущения не оказывают значимого влияния на температурные характеристики модели, что свидетельствует о

корректности применяемой методики с учётом ламинарного режима течения и принятой скорости воды теплоносителя первого контура. Тем не менее, для более корректного описания гидродинамики с учётом турбулентных завихрений и вторичных течений на основном этапе расчётов использовалась реализуемая турбулентная модель k - ϵ .

В результате численного моделирования были получены температурные поля для штатного облучательного канала и ОУ, представленные на рисунке 10, причём для второго была визуализирована конфигурация с ОУ в высокопоточном канале без бериллиевой ловушки, поскольку температура образцов в ней на $5 \div 7$ °C выше относительно конфигурации с бериллиевой ловушкой. Объясняется это различными спектрами нейтронов: в непосредственной близости к тепловыделяющим сборкам доля быстрых нейтронов больше, а тепловых и эпипротоновых – меньше, что приводит к большему разогреву ОУ.

Для визуального определения температуры воды на стенах кварцевой ампулы в легенде с цветовым распределением температур был выделен белым интервал температур $100 \div 110$ °C. На основе визуализации температурных полей можно сделать заключение, что нагрев воды при прохождении через капсулу незначителен – максимальная температура теплоносителя составила 50,1 °C для всех трёх конфигураций. К тому же, данная температура была достигнута на границе выхода воды из модели, что связано с рециркуляцией под капсулой и последующим образованием обратного потока с заданной температурой 50 °C, которая была задана в качестве граничного условия. Максимальные температуры составили: 179,2 °C для штатного облучательного канала, 145,5 °C для ОУ в бериллиевой ловушке и 152,6 °C для высокопоточного канала. Стоит также отметить, что максимальные температуры бериллиевой засыпки в конфигурациях с бериллиевой ловушкой и с ОУ в высокопоточном канале составили 45,6 и 48,1 °C соответственно.

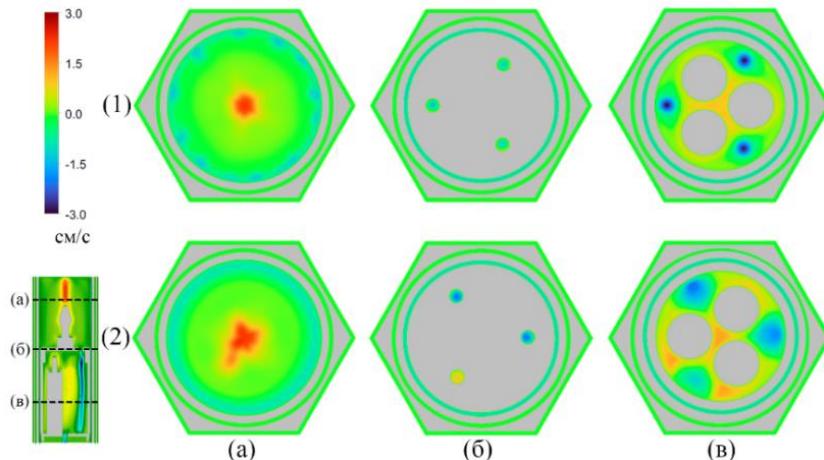


Рисунок 9. Горизонтальные поля скоростей для ламинарного (1) и турбулентного (2) режимов течения на высотах: 136 см (а), 86 см (б) и 36 см (в), которые показаны пунктиром на вертикальном разрезе под легендой

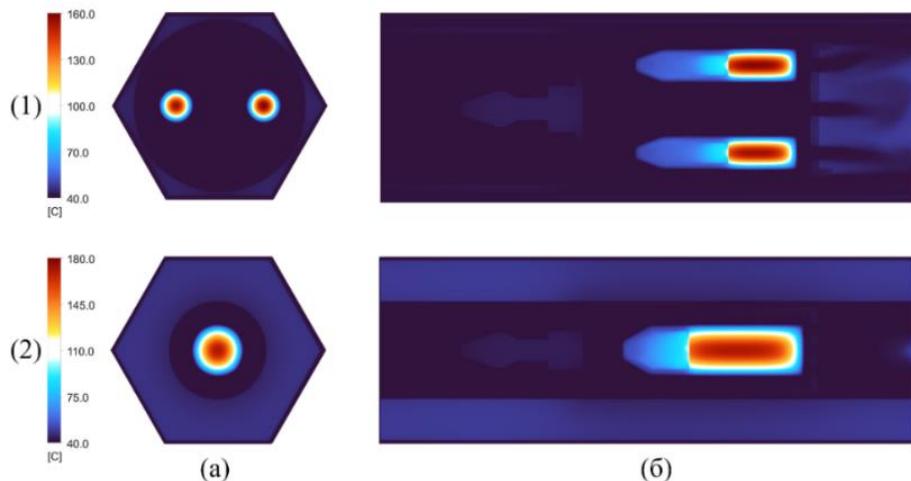


Рисунок 10. Горизонтальные (а) и вертикальные (б) распределения температур для штатного облучательного канала (1) и ОУ в высокопоточной ячейке (2)

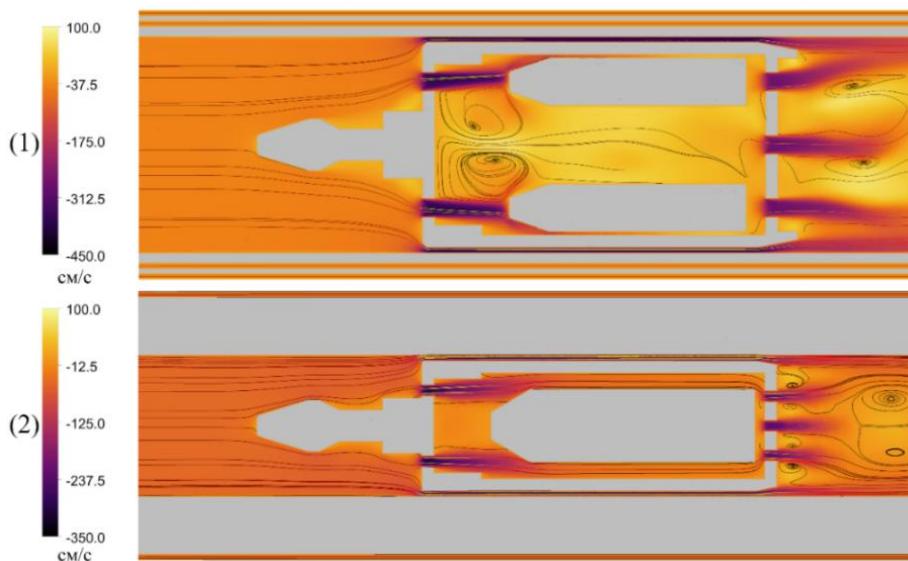


Рисунок 11. Вертикальные поля компоненты скорости вдоль направления течения для штатного облучательного канала (1) и ОУ в высокопоточной ячейке (2)

Распределения компоненты скорости по оси z для двух конфигураций представлены на рисунке 11. Здесь, в отличие от верификационной модели с берилидом титана Be_{12}Ti , обратные потоки через отверстия в капсуле не наблюдаются, что обусловлено более высокой скоростью теплоносителя. В штатной конфигурации, из-за специфики расположения кварцевых ампул, турбулентные завихрения образуются в центрально-верхней области капсулы. Это приводит к образованию локальных восходящих потоков в центральной области капсулы. Аналогичные завихрения формируются под капсулой, особенно в областях, где отсутствует прямой отток воды из нижних отверстий капсулы. Максимальная скорость жидкости, равная 499,3 см/с для штатного облучательного канала, была зафиксирована в кольцевом зазоре между внутренней конструкцией канала из САВ-1 и капсулой.

Кроме того, за счёт специфической формы головки капсулы, направляющей поток теплоносителя в отверстия, наблюдается частичное смещение потока в область между кварцевыми ампулами и внутренней стенкой капсулы. В конструкции алюминиевой капсулы в ОУ подобный эффект отсутствует, поскольку отверстия имеют меньший диаметр, чем в штатной капсуле и расположены ближе к центру капсулы. Вследствие этого максимальная скорость теплоносителя в конфигурации с ОУ составила 417,1 см/с. Также отмечено, что при наличии лишь одной радиальной области для прохождения потока теплоносителя через капсулу крупномасштабные турбулентные завихрения внутри капсулы не формируются, однако сохраняются под ней. Всё это, в совокупности, подтверждает корректность выбранного отступа в 3 см от основания капсулы для стабилизации потока воды из зазора канал-капсула и из отверстий капсулы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённый в ANSYS Fluent теплофизический анализ ОУ показал, что максимальная температура в системе достигается в геометрическом центре порошка триоксида молибдена и составляет 152,6 °C. Температура теплоносителя, при этом, не превышает 50,1 °C, что подтверждает отсутствие фазовых переходов в системе и, следовательно, безопасность эксплуатации ОУ в условиях исследовательского реактора ВВР-К. Потенциальны аварийные температурные режимы в ОУ не выявлены.

Полученные расчётные результаты могут быть использованы для проведения экспериментальных исследований на реакторе ВВР-К по определению удельной активности ⁹⁹Mo в составе ОУ. При этом могут быть рассмотрены и иные конфигурации с размещением ОУ, например, в периферийных каналах, поскольку в настоящем исследовании рассматривался наиболее энергонапряжённый сценарий – расположение ОУ в высокопоточном канале с размещением алюминиевой капсулы в центральную облучательную позицию. Таким образом, полученные данные обеспечивают надёжную верификационную основу для дальнейших экспериментальных и прикладных исследований.

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Li J., Xie R., Li B., Chen L., Shen W., Zhao Y., Gui Q., Chen L., Xu B., Chen X., Guan J., Chen L., Yang K., Chai Z., Wang S. Tumor Imaging by a ^{99m}TcO₄⁻-Labeled Cationic Polymeric Network // CCS Chemistry. – 2024. – Vol. 6, No. 8. – P. 1868–1875.
2. Technology for Production of Portable Tc-99m Gel Generators Using Neutron Activated Natural Molybdenum [Электронный ресурс]. – URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/SupplementaryMaterials/TRS478CD/Kazakhstan.pdf> (дата обращения: 07.04.2025).
3. Non-HEU Production Technologies for Molybdenum-99 and Technetium-99m [Электронный ресурс]. – URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1589_web.pdf (дата обращения: 06.04.2025).
4. Ryabchikov A., Skuridin V., Nesterov E., Chibisov E., Golovkov V. Obtaining molybdenum-99 in the IRT-T research reactor using resonance neutrons // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2004. – Vol. 213. – P. 364–368.
5. Feasibility Studies of Producing ⁹⁹Mo by Captura in the IEA-R1 Research Reactor [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.rertr.anl.gov/Mo99-98/RConcilio.pdf> (дата обращения: 11.04.2025).
6. Ашибаев А.Ч. Оптимизация условий облучения на реакторе ВВР-К для повышения удельной активности Mo-99 // Сборник тезисов Международной научной конференции студентов и молодых учёных «ФАРАБИ ӨЛЕМІ», Секция «Теплофизика и теоретическая теплотехника». – 2025. – С. 114–115. [Ashibayev A.Ch. Optimization of Irradiation Conditions at the WWR-K Reactor to Increase the Specific Activity of Mo-99 // Proceedings (Abstracts) of the International Scientific Conference of Students and Young Scientists “FARABI ALEMI”, Section “Thermophysics and Theoretical Heat Engineering”. – 2025. – P. 114–115 (In Russ.)]
7. ANSYS Fluent Workbench Tutorial Guide 2021 R2 [Электронный ресурс]. – URL: https://dl.cfdexperts.net/cfd_resources/Ansys_Documentation/Fluent/Ansys_Fluent_Workbench_Tutorial_Guide_2021_R2.pdf (дата обращения: 27.04.2025).
8. Sairanbayev D. S., Shaimerdenov A. A., Akhanov A. M., Silnyagin P. P., Gizatulin Sh. Kh., Shakirov B. B., Udarstsev S. B. Thermophysical analysis of the irradiation experiment of titanium beryllide samples in the WWR-K reactor // Recent Contributions to Physics. – 2023. – Vol. 84, No. 1. – P. 65–71.
9. MCNP Version 6.2 Release Notes [Электронный ресурс]. – URL: https://mcnp.lanl.gov/pdf_files/TechReport_2018_LANL_LA-UR-18-20808_WernerBullEtAl.pdf (дата обращения: 21.04.2025).

ССР-Қ РЕАКТОРЫНДА Mo-99 ӨНДІРУГЕ АРНАЛҒАН СӘУЛЕЛЕНДІРУ КАПСУЛАСЫНЫң ЖЫЛУФИЗИКАЛЫҚ МОДЕЛІН ӘЗІРЛЕУ ЖӘНЕ ТАЛДАУ

А. Ч. Ашибаев^{*}, Д. С. Сайранбаев, А. А. Шаймерденов

КР Атом энергиясы жөніндегі агенттікінің «Ядролық физика институты» РМК, Алматы, Қазақстан

** Байланыс үшін e-mail: ashibayev@inp.kz*

⁹⁹Mo-ның меншікті белсенділігін арттыруға арналған сәулелендіру капсуласының конструкциясына жылуфизикалық талдау нәтижелері ұсынылған. Есептеу ANSYS Fluent 2021 R2 бағдарламалық кешенінде белсенді аймақтың үш түрлі конфигурациясы үшін, соның ішінде стандартты сәулелендіру капсуласы үшін жүргізілді. Молибден триоксиді ұнтағының максималды температурасы 152,6 °C, ал жылу тасығыштың температурасы 50,1 °C-тан аспайтыны көрсетілді. Бұл деректер әзірленген сәулелендіру құрылғысының ССР-Қ зерттеу реакторында түрлі конфигурацияларда қауіпсіз пайдаланылуын раставиды.

Түйін сөздер: зерттеу реакторы, молибден-99, сәулелендіру құрылғысы, жылу режимі, жылуфизикалық модель.

**DEVELOPMENT AND THERMOPHYSICAL ANALYSIS OF AN IRRADIATION CAPSULE MODEL
FOR Mo-99 PRODUCTION IN THE WWR-K REACTOR**

A. Ch. Ashibayev*, D. S. Sairanbayev, A. A. Shaimerdenov

RSE "Institute of Nuclear Physics" of the Agency of the Republic of Kazakhstan for Atomic Energy, Almaty, Kazakhstan

* E-mail for contacts: ashibayev@inp.kz

The paper presents the results of a thermophysical analysis of an irradiation capsule design intended to increase the specific activity of ^{99}Mo in the WWR-K research reactor. Numerical simulations were performed using the ANSYS Fluent 2021 R2 software package for three configurations of the reactor core, including the standard irradiation capsule. It is demonstrated that the developed irradiation device ensures a reliable thermal regime, with the maximum temperature of molybdenum trioxide powder reaching $152.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ and the coolant temperature not exceeding $50.1\text{ }^{\circ}\text{C}$. The results confirm the safe operation of the irradiation device within various core configurations of the WWR-K reactor.

Keywords: *research reactor, molybdenum-99, irradiation device, thermal regime, thermophysical model.*