ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И АТОМНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК **621.039.5** DOI **10.46960/1816-210X_2025_2_50**
EDN **CJQXJP**

ВАЛИДАЦИЯ РАСЧЕТНОЙ МОДЕЛИ ТОПЛИВНОГО КОМПАКТА ПРОГРАММЫ РАСНАР-ГАЗ ДЛЯ РАСЧЕТА ДИНАМИКИ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ С ГАЗОВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

В.А. Болнов
ORCID: **0009-0007-0260-3453** e-mail: **bolnov@okbm.nnov.ru**
АО «ОКБМ Африкантов»
Нижний Новгород, Россия

Е.В. Богданова
ORCID: **0009-0001-5550-7365** e-mail: **bogdanova@okbm.nnov.ru**
АО «ОКБМ Африкантов»
Нижний Новгород, Россия

С.А. Малкин
ORCID: **0009-0005-9834-2926** e-mail: **malkin@okbm.nnov.ru**
АО «ОКБМ Африкантов»
Нижний Новгород, Россия

Д.М. Гришин
ORCID: **0009-0000-3322-4818** e-mail: **grishin_dm@okbm.nnov.ru**
АО «ОКБМ Африкантов»
Нижний Новгород, Россия

Проведена валидация расчетной модели топливного компакта (ТК) программы для ЭВМ РАСНАР-ГАЗ, предназначенной для расчета нестационарных режимов в ядерных энергетических установках (ЯЭУ) с газовым теплоносителем. Для этого использованы экспериментальные данные реакторных испытаний шаровых твэлов высокотемпературного газового реактора (ВТГР) при импульсном режиме работы импульсного графитового реактора (ИГР). Показано, что возможно применение расчетной модели ТК в виде гомогенной смеси с эквивалентными параметрами теплоемкости, теплопроводности и плотности к гетерогенной структуре диспергированных в графитовой матрице частиц топливной композиции, формирующих ТК. В применяемой модели нестационарное уравнение теплопроводности твэла описывалось в цилиндрической геометрии. Валидация показала, что программа РАСНАР-ГАЗ с достаточной для инженерных расчетов точностью описывает изменение температур как в центре, так и снаружи ТК, а отклонения не превышают значений, указанных в аттестационном паспорте.

Ключевые слова: валидация, топливный компакт, шаровой твэл, РАСНАР-ГАЗ, гелий, гомогенная смесь, графитовая матрица, теплоемкость, теплопроводность, цилиндрическая геометрия, переходный процесс, динамика, расчетная модель.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Болнов, В.А. Валидация расчетной модели топливного компакта программы РАСНАР-ГАЗ для расчета динамики реакторной установки с газовым теплоносителем / В.А. Болнов, Е.В. Богданова, С.А. Малкин, Д.М. Гришин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2025. № 2. С. 50-58.
DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_50 EDN: CJQXJP

© Болнов В.А., Богданова Е.В., Малкин С.А., Гришин Д.М., 2025

VALIDATION OF THE RASNAR-GAS FUEL COMPACT COMPUTATIONAL MODEL FOR CALCULATING THE DYNAMICS OF REACTOR UNIT WITH GAS COOLANT

V.A. Bolnov
ORCID: **0009-0007-0260-3453** e-mail: **bolnov@okbm.nnov.ru**
I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering
Nizhny Novgorod, Russia

E.V. Bogdanova
ORCID: **0009-0001-5550-7365** e-mail: **bogdanova@okbm.nnov.ru**
I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering
Nizhny Novgorod, Russia

S.A. Malkin
ORCID: **0009-0005-9834-2926** e-mail: **malkin@okbm.nnov.ru**
I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering
Nizhny Novgorod, Russia

D.M. Grishin
ORCID: **0009-0000-3322-4818** e-mail: **grishin_dm@okbm.nnov.ru**
I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering
Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The article is devoted to the validation of a fuel compact computational model of the RASNAR-GAZ computer program. This program is designed to calculate non-stationary modes in nuclear power plants with a gas coolant. Experimental data from reactor tests of spherical fuel element of a high-temperature gas-cooled reactor (HTGR) in the pulsed mode of operation of a pulsed graphite reactor are used for this purpose. It is shown that it is possible to apply the computational model of the fuel compact in the form of a homogeneous mixture with equivalent parameters of heat capacity, thermal conductivity and density to the heterogeneous structure of fuel composition particles dispersed in a graphite matrix, forming fuel compacts. The non-stationary equation of thermal conductivity of a fuel element in the model used was described in cylindrical geometry. The validation showed that the RASNAR-GAZ program describes temperature changes both in the center and outside of the fuel compact with sufficient accuracy for engineering calculations, and the deviations do not exceed the values specified in the certification passport.

***Key words*:** validation, fuel compact, spherical fuel element, RASNAR GAS, helium, homogeneous mixture, graphite matrix, heat capacity, thermal conductivity, cylindrical geometry, transient process, dynamics, computational model.

FOR CITATION: V.A. Bolnov, E.V. Bogdanova, S.A. Malkin, D.M. Grishin. Validation of the RASNAR-GAS fuel compact computational model for calculating the dynamics of reactor unit with gas coolant**.** Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseev. 2025. № 2. Pp. 50-58. DOI: 10.46960/1816-210X_2025_2_50 EDN: CJQXJP

В рамках Инвестиционной программы АО «Концерн Росэнергоатом» реализуется комплексный проект по разработке технологических решений для создания атомной энерготехнологической станции с высокотемпературным газоохлаждаемым реактором и химико-технологической частью для производства водорода и водородсодержащих продуктов. В АО «ОКБМ Африкантов» разработана программа для ЭВМ РАСНАР-ГАЗ, предназначенная для расчета нестационарных режимов ядерных энергетических установках с газовым теплоносителем и обоснования безопасности. В соответствии с нормативной документацией, она должна быть аттестована в НТЦ ЯРБ, а используемые в ней математические и расчетные модели верифицированы и валидированы на экспериментальных данных. Работа по валидации расчетного кода РАСНАР-ГАЗ осуществляется в рамках НИОКР,

проводимых АО «ОКБМ Африкантов» по заказу АО «Концерн Росэнергоатом». Представленные в настоящей статье результаты являются продолжением работ по валидации расчетного кода РАСНАР-ГАЗ [1].

Одним из основных процессов, требующих обязательной верификации и валидации, является теплопередача в твэлах. Она имеет непосредственное отношение к безопасности, поскольку характеризует состояние твэлов, по которому формируются ее критерии (целостность, отсутствие плавления топлива). Теплопередача в твэлах определяется мощностью и распределением энерговыделений по объему активной зоны, величиной газового зазора и температурой теплоносителя. Значение и динамика изменения температуры твэлов также определяет величину эффекта реактивности, а, следовательно, влияет на изменение нейтронной мощности. Конструктивно активные зоны газоохлаждаемых реакторов условно можно разделить на два типа. В первом из них микротвэлы (керны) прессуются в цилиндрических графитовых топливных компактах высотой 0,05 м и диаметром 0,0125 м. Топливные компакты (ТК) затем размещаются в шестигранных графитовых блоках с каналами под топливо, а также каналами для прохода теплоносителя и стержней управления и защиты. Из этих блоков набирается активная зона, которую называют призматической. Конструкцию второго типа активной зоны называют просто «шаровая засыпка». В этом варианте активной зоны микротвэлы размещаются в графитовых шарах диаметром 0,06 м.

В данной статье приводятся результаты валидации расчетной модели ТК, моделируемого в виде цилиндра с эквивалентными параметрами теплоемкости, теплопроводности и плотности.

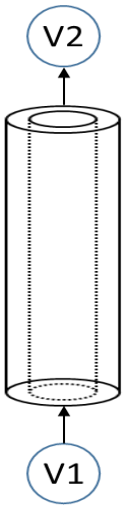

Рис. 1. Гидравлическая схема расчетного канала, моделирующего твэл с оболочкой, контактирующей с теплоносителем внешней цилиндрической поверхностью:
V1 – объем, в котором задается температура на входе;
V2 – объем, в котором задается давление на выходе

Fig. 1. Hydraulic diagram of the design channel simulating a fuel element with a shell in contact with the coolant with its outer cylindrical surface:
V1 – volume in which the inlet temperature is set; V2 – volume in which the outlet pressure is set

Для валидации распределения температуры в расчетной модели использовались экспериментальные данные, полученные в ходе проведения реакторных испытаний шаровых твэлов при импульсном нагружении на установке ИГР [2]. Реактор ИГР работает в импульсном режиме с большим интегральным потоком нейтронов. Средняя плотность потока нейтронов в импульсе от $4 \cdot 10^{15}$ до $8 \cdot 10^{15}$ нейтр/(см^2·с) [3]. Реактивность вводится мгновенно, скачок реактивности определяет начальный период разгона, амплитуду и форму вспышки,

формирующую трапециевидный профиль энерговыделения во времени. Энерговыделение происходит равномерно по всему объему топлива в сердечнике шаровых твэлов.

Испытания проводились на пяти шаровых графитовых изделиях монолитного и сборного типа диаметром 0,06 м, помещенных в герметичную ампулу. Схема ампулы приведена на рис. 2. Ампула с твэлами прошла три реакторных испытания в импульсном режиме. Шар № 5 не имел топлива и был выточен из графита. Остальные образцы представляли собой макеты шаровых твэлов в виде сердечника с диспергированными в нем микротвэлами в виде мелких частиц диаметром 0,001-0,0011 м и графитовой оболочки. Сердечник получали прессованием смеси порошка графита с микротвэлами. Два шаровых твэла № 2 и № 4 первого типа были сборными из сердечника диаметром 0,035 м и оболочки толщиной 0,0125 м, выточенной из графита. Твэлы второго типа № 1 и № 3 были сформированы путем совместного прессования сердечника и оболочки по технологии изготовления монолитных изделий. Они имели больший диаметр 0,044 м, и меньшую толщину оболочки – 0,008 м. Содержание урана в твэлах первого типа – 0,0015 кг, второго типа – 0,001 кг, общая масса сердечника твэлов первого типа – 0,038 кг, второго типа – 0,076 кг. Концентрация n для твэлов первого типа – $9{,}6\cdot10^7$ част/м^3, для второго – $3{,}2\cdot10^7$ част/м^3. Твэлы первого типа, по сравнению со вторым, имели большую концентрацию топливных частиц и увеличенное энерговыделение в единице объема.

В качестве экспериментальных данных для валидации использовались показания термопар, установленных на твэле № 2 первого типа и в твэле № 3 второго типа. Места установки термопар ВР-5/20 [4] показаны на рис. 2. Измерялась температура топливной композиции в сердечнике (T_2, T_4) и на поверхности оболочки твэла (T_1, T_3).

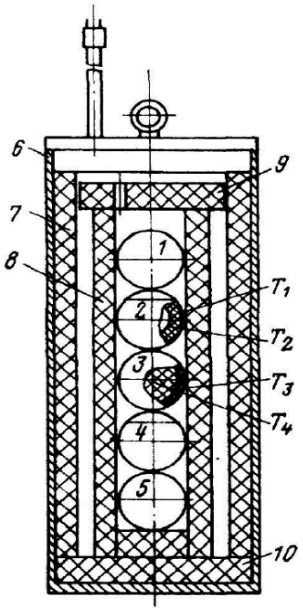

Рис. 2. Схема ампулы для проведения испытаний [2]:
1, 3 – твэлы второго типа, монолитные; 2, 4 – твэлы первого типа сборные; шар 5 из графита; 6 – стенка ампулы; 7, 8 – графитовые стаканы; 9, 10 – графитовые подстаканники и крышка; T_1, T_2, T_3, T_4 – места установки термопар

Fig. 2. Diagram of the ampoule for testing [2]:
1, 3 – fuel elements of the second type, monolithic; 2, 4 – fuel elements of the first type, prefabricated; ball 5 made of graphite; 6 – ampoule wall; 7, 8 – graphite cups; 9, 10 – graphite cup holders and lid; T_1, T_2, T_3, T_4 – thermocouple installation locations

Для моделирования режимов в программе РАСНАР-ГАЗ использовалась расчетная схема (рис. 1). На входе в расчетный канал задавалась температура теплоносителя во время-

зависимом объеме V1, соответствующая температуре оболочки по показаниям термопар T_1 и T_3 для двух типов твэлов в начальный момент времени (рис. 2). На выходе из расчетного канала в объеме V2 задается давление, соответствующее рабочему давлению в ампуле с твэлами. На внешней поверхности цилиндрической оболочки выполняется граничное условие третьего рода:

$$-\lambda_{\text{гр}}\frac{\partial T}{\partial r} = \alpha(T_{\text{ст}} - T_{\text{ж}})$$

где $\lambda_{гр}$ – коэффициент теплопроводности для графитовой оболочки; α – коэффициент теплоотдачи от графита к гелию; $T_{ст}$ – температура внешней поверхности графитовой оболочки; $T_{ж}$ – температура гелия в приграничном слое.

Каждый тип шарового твэла моделировался цилиндром с объемом топливной композиции, равным объему сердечника, и графитовой оболочкой в виде концентрического цилиндрического слоя. Модельный цилиндр представлялся в виде гомогенной смеси с эквивалентными параметрами теплоемкости, теплопроводности и плотности гетерогенной структуры диспергированных в графитовой матрице частиц топливной композиции. По высоте цилиндр разбивался на расчетные участки, а по радиусу − на три слоя: сердечник с топливом, графитовую оболочку и теплоноситель.

Для образцов топливного компакта первого и второго типов толщина цилиндрической оболочки выбиралась равной толщине графитового сферического слоя и составляла 0,0125 м и 0,008 м для первого и второго типов соответственно. Высота цилиндра топливного компакта в модели задавалась, исходя из равенства объемов шарового и цилиндрического топливных сердечников для обеспечения одинаковой выделяемой мощности в единице объема. Так, радиус цилиндрического сердечника принимался равным радиусу шарового сердечника: 0,0175 м для первого типа и 0,022 м – для второго, а эквивалентная высота составила 0,0233 м для первого типа и 0,0293 м – для второго. Для корректного учета теплообмена коэффициент теплоотдачи снижен, так как при одинаковом объеме площадь поверхности теплообмена оболочки с теплоносителем у цилиндра больше, чем у шара. Параметр $k{\cdot}F$ сохраняется. Расчетная схема показана на рис. 3.

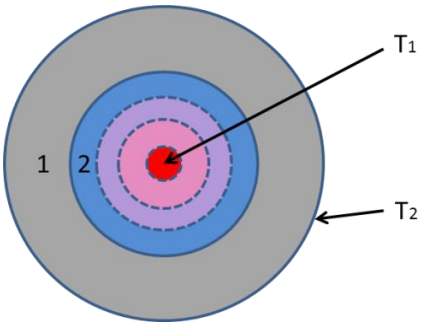

Рис. 3. Расчетная схема твэла:
1 – оболочка из графита с толщиной, эквивалентной шаровому твэлу;
2 – сердечник с топливом (топливная композиция), разбитый на расчетные узлы по радиусу;
T_1 – место установки датчика для измерения температуры в центре твэла;
T_2 – место установки датчика для измерения температуры на границе графитовой оболочки

Fig. 3. Computational model of the fuel element:
1 – graphite shell with a thickness equivalent to a spherical fuel element;
2 – core with fuel (fuel composition) divided into calculation units along the radius;
T_1 – location of the sensor for measuring temperature in the center of the fuel element;
T_2 – location of the sensor for measuring temperature at the boundary of the graphite shell

Для оболочки из графита плотность принималась одинаковой для обоих образцов и соответствует средней по температурному диапазону плотности графита 1740 кг/м^3. Расчетное значение эквивалентной плотности для твэлов первого типа больше, чем для второго типа, что объясняется большей концентрации топливных частиц в сердечнике первого типа. Теплоемкость графитовой оболочки учитывает температурную зависимость и изменяется в диапазоне 0,4-2,1 кДж/(кг·К). Коэффициент теплопроводности для графитовой оболочки 0,25 кВт/(м·К) для обоих образцов. Теплоемкость сердечника твэла изменяется в диапазоне 2,0-2,9 кДж/(кг·К) и близка к теплоемкости графита, поскольку основной объем сердечника приходится на графитовую матрицу. Коэффициент теплопроводности для топливной смеси принимался в соответствии с [4].

Максимальная мощность для твэла № 2 составила 20,4 кВт. Мощность твэла возрастала от нуля до максимума за первые 5 сек, поддерживалась постоянной в течение следующих 45 сек и снижалась до нуля за последующие 20 сек – режим 1.

Максимальная мощность для твэла № 3 составила 22,1 кВт с ростом от нуля до максимума за первые 7 сек, с поддержанием постоянной мощности в течение следующих 23 сек и сбросом до нуля за последующие 10 сек – режим 2.

На рис. 4-5 показано изменение температуры от времени в центре модельного цилиндра и на внешней границе оболочки.

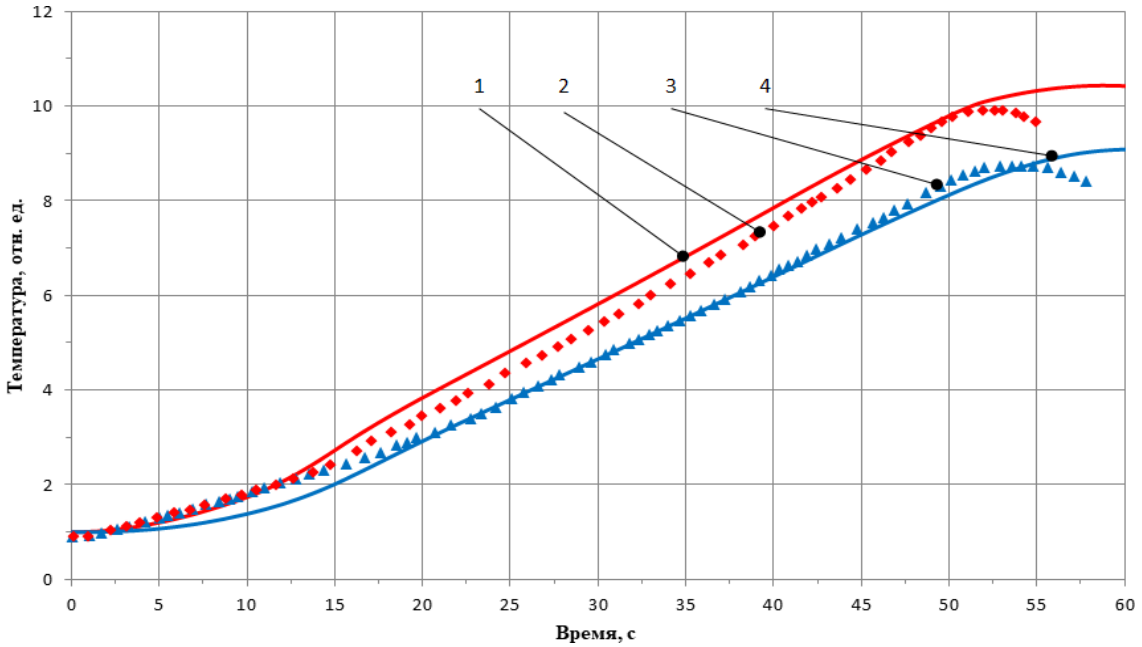

Рис. 4. Температура для первого типа образцов твэлов:
1 – температура в центре цилиндра, расчет; 2 – температура в центре твэла, эксперимент; 3 – температура на внешней границе оболочки, эксперимент; 4 – температура на внешней границе оболочки, расчет

Fig. 4. Temperature for the first type of fuel element samples:
1 – temperature in the center of the cylinder, calculation; 2 – temperature in the center of the fuel element, experiment; 3 – temperature at the outer boundary of the shell, experiment; 4 – temperature at the outer boundary of the shell, calculation

Отклонение расчетных значений от экспериментальных рассчитывалось по формуле:

$$\varepsilon = \frac{|T_{i\,exp} - T_{i\,calc}|_{max}}{T_{max} - T_{min}} \cdot 100\ \%$$

где $T_{i\ exp}$ – i-точка экспериментальных данных, в которой достигается максимальное отклонение от расчетного значения температуры в данный момент времени; $T_{i\ calc}$ – i-точка расчетных данных, в которой достигается максимальное отклонение от экспериментального значения температуры в данный момент времени; T_{max} – максимальное значение температуры во всем диапазоне изменения экспериментального параметра; T_{min} – минимальное значение температуры во всем диапазоне изменения экспериментального параметра.

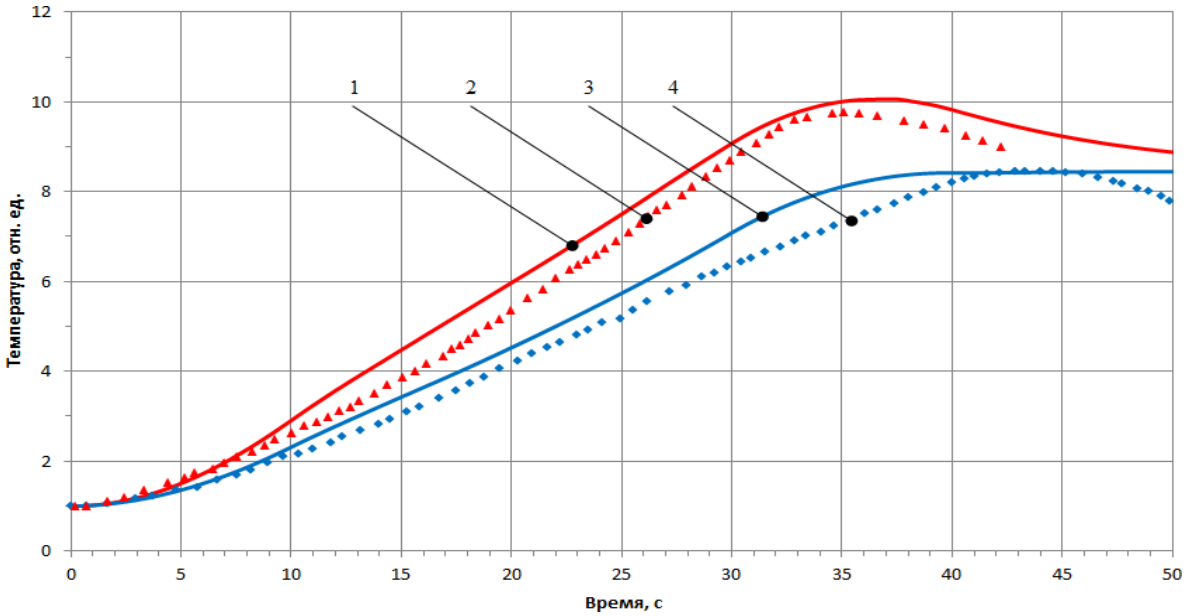

Рис. 5. Температура для второго типа образцов твэлов:
1 – температура в центре цилиндра, расчет; 2 – температура в центре твэла, эксперимент; 3 – температура на внешней границе оболочки, расчет; 4 – температура на внешней границе оболочки, эксперимент

Fig. 5. Temperature for the second type of fuel element samples:
1 – temperature in the center of the cylinder, calculation; 2 – temperature in the center of the fuel element, experiment; 3 – temperature at the outer boundary of the shell, calculation; 4 – temperature at the outer boundary of the shell, experiment

Для эксперимента с первым и вторым типами твэлов относительное отклонение температуры в центре твэла № 3 составляет 8,6 %, и 6,1 % для твэла № 2. Для температуры на внешней границе оболочки относительные отклонения равны 5,2 % для твэла № 3 и 6,3 % для твэла № 2 соответственно. Данные отклонения не превышают 20 % – значения максимального относительного отклонения результатов расчетов по программе для ЭВМ РАСНАР-ГАЗ, заявленного в аттестационном паспорте для температуры топливной матрицы и графита.

Для оценки неопределенностей полученных результатов расчета дополнительно были проведены многовариантные исследования (по методу Уилкса) с варьированием параметров, влияющих на температуру топливных компактов. Всего было принято 100 численных экспериментов, в которых менялись такие параметры, как мощность тепловыделений, размеры моделируемого цилиндра, а также теплофизические свойства.

Из этих расчетных вариантов были получены максимальные и минимальные выборочные значения температур в центре топлива и на внешней границе оболочки, являющиеся оценкой верхней и нижней границ диапазона неопределенности расчета. Результаты показали, что экспериментальные данные лежат в границах трубки неопределенности (рис. 6-7).

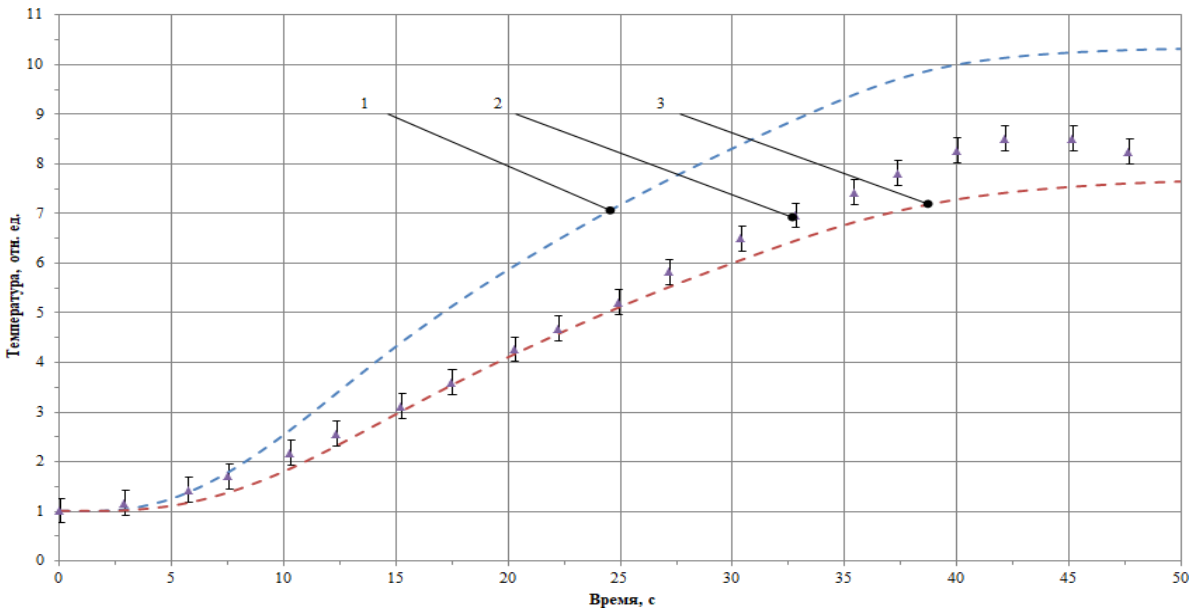

Рис. 6. Оценка значений температур, с учетом неопределенностей параметров:
1 – оценка верхней границы температуры на внешней границе оболочки, расчет;
2 – температура на внешней границе оболочки, эксперимент;
3 – оценка нижней границы температуры на внешней границе оболочки, расчет

Fig. 6. Estimation of temperature values with parameter uncertainties
1 – estimation of the upper boundary of temperature at the outer boundary of the shell, calculation;
2 – temperature at the outer boundary of the shell, experiment;
3 – estimation of the lower boundary of temperature at the outer boundary of the shell, calculation

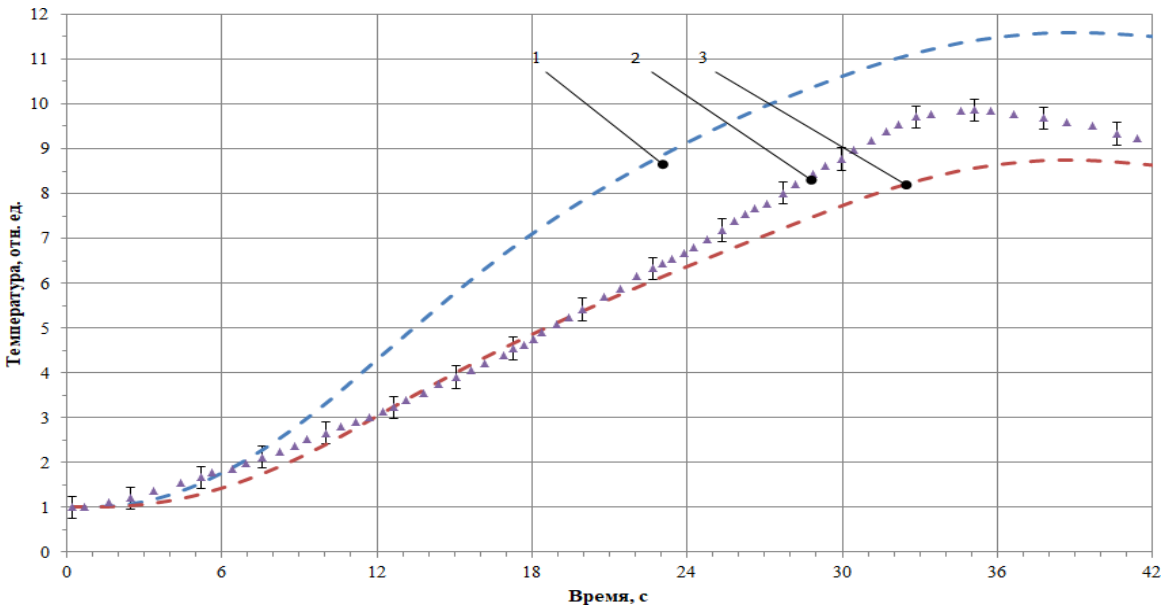

Рис. 7. Оценка значений температур, с учетом неопределенностей параметров:
1 – оценка верхней границы температуры в центре ТК, расчет;
2 – температура в центре ТК, эксперимент;
3 – оценка нижней границы температуры в центре ТК, расчет

Fig. 7. Estimation of temperature values, with parameter uncertainties:
1 – estimate of the upper limit of temperature in the center of the fuel compact, calculation;
2 – temperature in the center of the fuel compact, experiment;
3 – estimate of the lower limit of temperature in the center of the fuel compact, calculation

Заключение

Валидирована модель топлива для РУ ВТГР в программе для ЭВМ РАСНАР-ГАЗ, описывающая динамику температур в шаровых твэлах двух типов, характеризуемых соответствующими геометрическими параметрами и теплообменными свойствами в рамках цилиндрической модели.

Выполнено сравнение результатов расчета температурных состояний с экспериментальными данными в режимах импульсного нагружения твэлов. Расчеты показали хорошее соответствие с экспериментальными данными с отклонениями, не превышающими 20 % от динамического диапазона изменения температур в эксперименте.

Работа по валидации расчетного кода РАСНАР-ГАЗ осуществляется в рамках НИОКР, проводимых АО «ОКБМ Африкантов» по заказу АО «Концерн Росэнергоатом».

Библиографический список

1. **Богданова, Е.В.** Результаты валидации математической модели парогенератора программы РАСНАР-ГАЗ для расчета динамики реакторной установки с газовым теплоносителем / Е.В. Богданова, В.А. Болнов, С.С. Григорьев, А.С. Емелина, С.А. Малкин, А.С. Ушатиков // Атомная энергия. 2024. Т. 137. № 1-2.
2. **Еремеев, В.С.** Методика реакторных испытаний шаровых твэлов ВТГР при импульсном нагружении / В.С. Еремеев, А.С. Черников, В.Я. Иванов [и др.] // Атомная энергия. 1991. Т. 71. Вып. 3. С. 221-226.
3. **Еремеев, В.С.** Повреждаемость шаровых твэлов ВТГР при кратковременном высоко-температурном воздействии в условиях реактора ИГР / В.С. Еремеев, А.С. Черников, С.П. Кравцов [и др.] // Атомная энергия. 1992. Т. 72 Вып. 3. С. 298-301.
4. **Черников, А.С**. Топливо и твэлы ВТГР // Атомная энергия. 1988. Т. 65. Вып. 1. С. 32-38.

Дата поступления
в редакцию: 28.03.2025

Дата принятия
к публикации: 07.05.2025