

РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ОХЛАЖДЕНИЯ АКТИВНОЙ ЗОНЫ СТАЦИОНАРНОГО РЕАКТОРА-ОБЛУЧАТЕЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО НА БАЗЕ КРИТИЧЕСКОГО СТЕНДА ИКАР-С

CALCULATION ASSESSMENTS OF COOLING CAPABILITIES OF STATIONARY REACTOR-IRRADIATOR CORE CREATED ON THE BASIS OF CRITICAL FACILITY IKAR-S

С. Л. Турутин, В. Ю. Матвеев
S. L. Turutin, V. Yu. Matyev

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров Нижегородской обл.
Federal Nuclear Center of Russia – All-Russian Research Institute of Experimental Physics

Проведены расчетные оценки возможности охлаждения реактора-облучателя, создаваемого на базе критического стенда ИКАР-С. Охлаждение предложено производить прокачкой воздуха по циркониевым трубам, размещенным в графитовой активной зоне. Проведены расчетные и экспериментальные исследования величины термического сопротивления воздушных зазоров между циркониевыми трубами и окружающим их графитом. Предложенный способ охлаждения обеспечит длительную работу реактора-облучателя на уровне мощности 100 кВт при скорости воздуха в трубах 30 м/с. При этом разогрев элементов активной зоны достигнет примерно 200°C, что допустимо по механической стойкости конструкционных материалов.

Calculation assessments of cooling capabilities of reactor-irradiator created on the basis of critical facility IKAR-S were carried out. Cooling is suggested to be done by air pumping through zirconium tubes placed in graphite core. Calculation and experimental research of air-gap distances heat resistance between zirconium tubes and surrounding graphite were carried out. The suggested cooling approach will ensure long-term operation of reactor-irradiator at a power level of 100 kW and air flow rate in tubes equal to 30 m / s. In this case the core elements will be heated up to approximately 200° C, what is acceptable as to mechanical durability of structural materials.

Создаваемый реактор-облучатель представляет собой ядерно-физический комплекс, создаваемый на базе стенда ИКАР-С [1].

Активная зона реактора с размерами 2,4×2,4×2,4 м имеет ячеистую структуру – графитовую решетку, куда вставлены 9 энерговыделяющих модулей из графита с распределенным в нем урановым топливом [2]. Внешний вид реактора схематично показан на рис. 1. Весь реактор пересечен четырьмя горизонтальными рядами циркониевых труб (по 11 в каждом ряду). Три верхние ряда сквозные (длиной 2,4 м), а нижний ряд состоит из глухих труб (около 0,7 м), не пересекающих полость экспериментального модуля (см. рис. 1). Трубы вставлены в отверстия в графите, диаметром 89 мм ± 0,2 мм. Через эти трубы и предполагается прокачивать воздух для охлаждения реактора.

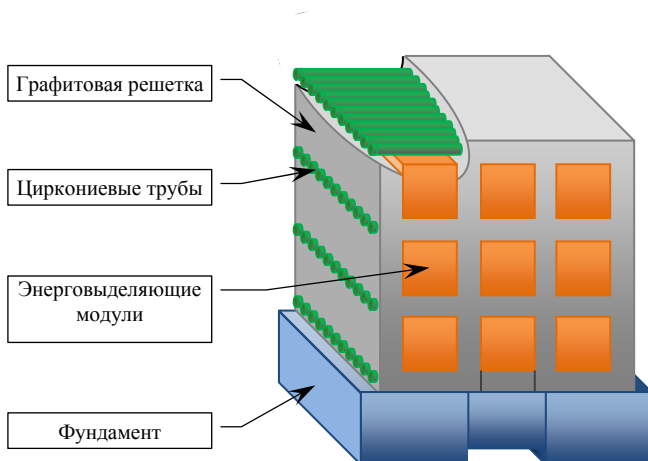


Рис. 1. Структура активной зоны реактора-облучателя с местным вырезом для наглядности

Цель работ состояла в расчетном определении степени разогрева элементов активной зоны охлаждаемого реактора, работающего на постоянном уровне мощности. Построение температурных полей делалось в оригинальном программном пакете методом конечно-разностных величин. Пакет предназначен для численного моделирования взаимодействия свободных поверхностей с потоком газовых сред с учетом тепло- и массопереноса; условие теплового контакта на поверхности задается термическим сопротивлением R_T (термическое сопротивление – это отношение перепада температуры к плотности теплового потока, т. е. величина, обратная коэффициенту теплопередачи [3,5]).

Моделирование теплопереноса в активной зоне реактора

Графитовая кладка активной зоны содержит большое количество технологических воздушных зазоров между ее элементами, не доступных для измерения. Корректно заданная величина термического сопротивления этих зазоров, препятствующих теплопереносу, имеет большое значение для теплового расчета, моделирующего перенос тепла от графита к потоку охлаждающего воздуха.

Особого внимания требует зона контакта графитовой кладки с проложенными в ней циркониевыми трубами с учетом воздушного зазора вокруг них. Физическое моделирование этой зоны на макете позволило получить данные о теплофизических характеристиках конструктивных элементов АЗ реактора-облучателя (эффективный коэффициент теплопередачи, азимутальная неоднородность теплового потока вокруг каналов охлаждения, скорость распространения тепла по графитовой кладке). Эксперименты состояли в измерении температуры графитовой сборки (макета), моделирующей часть активной зоны реактора-облучателя, при ее разогреве горячим воздухом. Схема макета представлена на рис. 2.

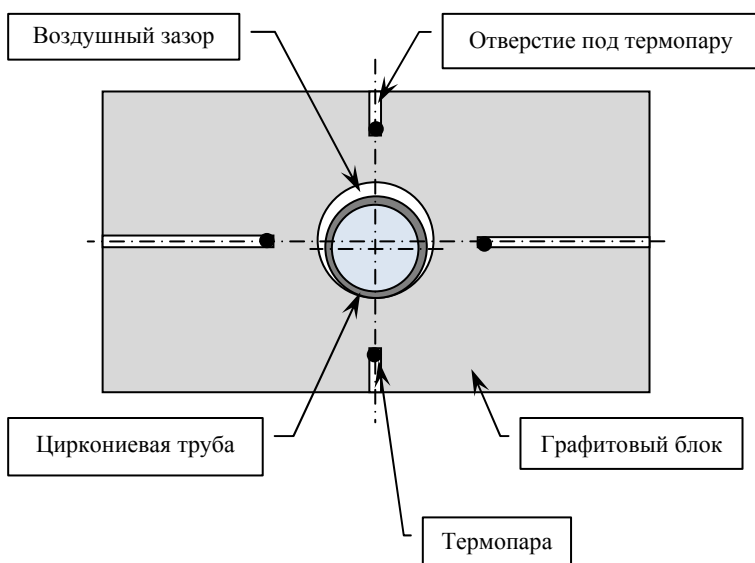


Рис. 2. Схема экспериментального макета

Макет собран из типовых графитовых блоков, использованных в активной зоне, с проложенной в них такой же циркониевой трубой. Хромель-алюмелевые термопары располагались с четырех сторон графитовых блоков и были заглублены в них так, чтобы их точки измерения находились на одинаковом удалении от стенки внутреннего отверстия (15 мм). Горячий воздух, проходя по трубе, разогревает ее стенки, и далее тепло проходит в графит через серповидный воздушный зазор (рис. 2).

На графике разогрева макета (рис. 3) отчетливо прослеживаются стадии разогрева: быстрый разогрев циркониевой трубы (примерно 5 мин) и совместный разогрев графита и трубы (остальное время). На начальном этапе важно, что конвекция с наружных поверхностей еще не играет заметной роли.

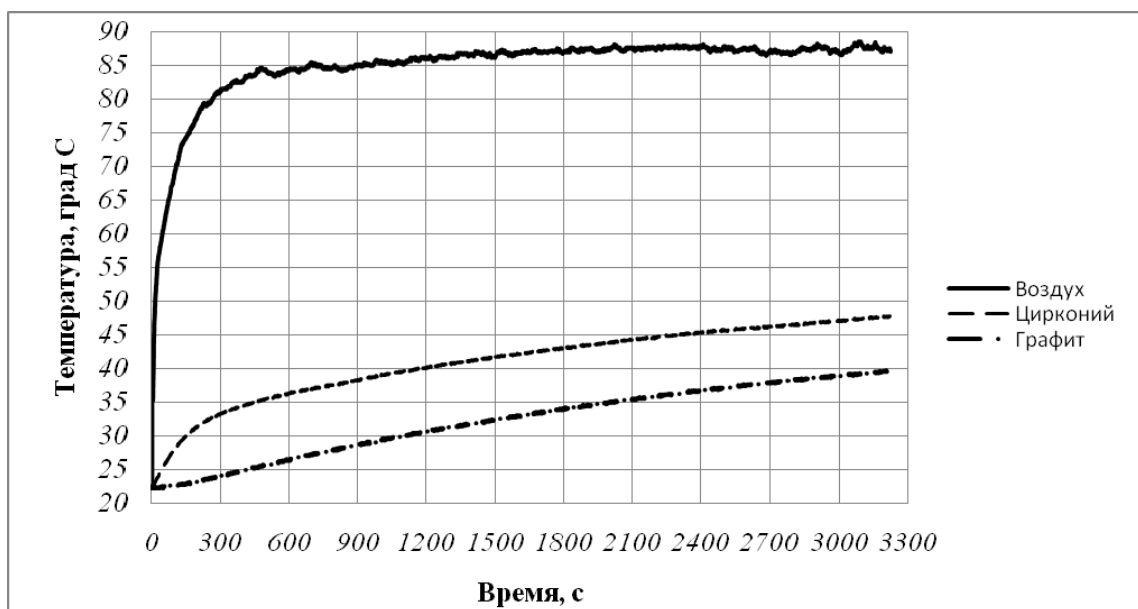


Рис. 3. Измеренная температура при разогреве макета

Эксперименты показали, что:

1. Реальное расположение циркониевой трубы в графитовых блоках по технологическим причинам отличается от показанного на рис. 2 (где труба полностью лежит на графите); азимутальное положение серповидного воздушного зазора может быть различным для разных блоков (зазор может оказаться и сбоку и снизу).

2. Распределение скорости прокачиваемого воздуха по сечению циркониевой трубы не однородно, имеет спиральную структуру, а ядро потока может смещаться от оси. В активной зоне реактора воздушный поток будет иметь те же особенности.

3. На расстоянии 15 мм от стенки внутреннего отверстия температурное поле в графите выравнивается в азимутальном направлении, так что влияние положения циркониевой трубы и серповидного зазора не просматривается. Поэтому средняя по азимуту величина термического сопротивления, рассчитанная по экспериментальным данным для макета, может быть использована как эффективное термическое сопротивление для всей поверхности контакта графита и циркониевых труб.

Численный расчет теплообмена в макете графитовой сборки

В серии трехмерных численных расчетов, моделирующих начальную стадию разогрева макета, были использованы измеренные физические величины. Суть этих расчетов состояла в выборе такого значения термического сопротивления R_T , при котором расчетные параметры разогрева макета совпали с измеренными.

При нулевом термическом сопротивлении расчетная скорость разогрева графита превышает измеренную, а расчетная кривая разогрева циркония располагается ниже экспериментальной зависимости. С ростом термического сопротивления расчетная кривая для графита будет опускаться, а для циркония – подниматься, как показано стрелками на рис. 4 и 5. Совпадение расчетных кривых с экспериментом дает искомую величину R_T . Найденная таким образом величина термического сопротивления не превышает $0,0041 \text{ м}^2\text{К/Вт}$, что соответствует эффективной величине зазора около 0,13 мм. Это значение принято для завершающего численного расчета температурных полей в активной зоне реактора-облучателя.

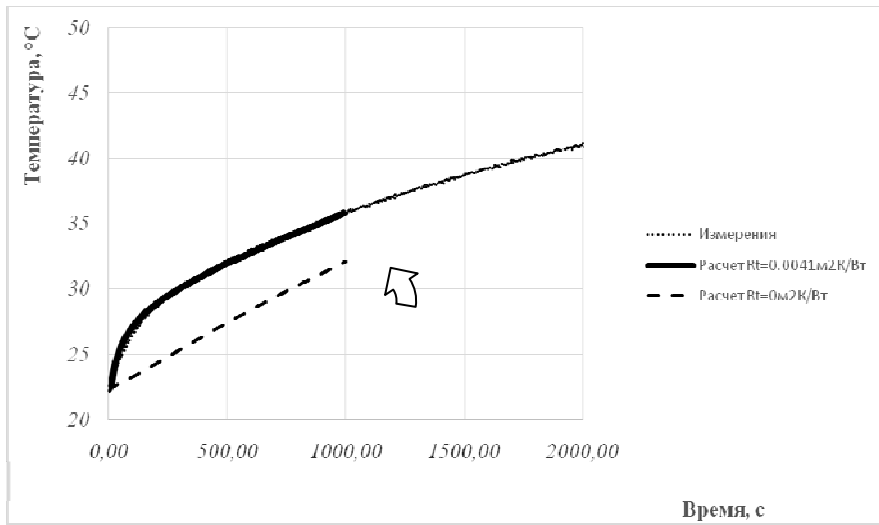


Рис. 4. Расчетные и экспериментальные зависимости разогрева циркония.

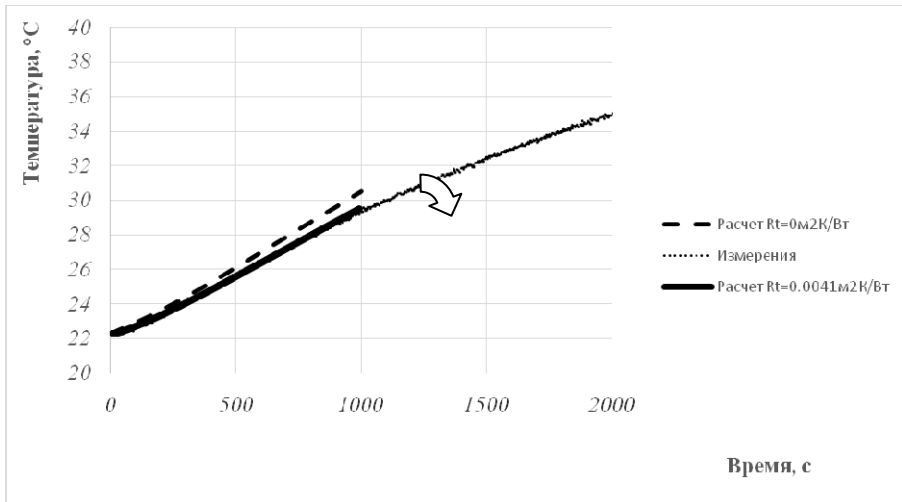


Рис. 5. Расчетные и экспериментальные зависимости разогрева графита.

Для верификации численного расчета была разработана приближенная аналитическая модель теплопереноса в макете. Исходные приближения состоят в следующем.

1) Теплоперенос в циркониевой трубе и в графите имеет в основном поперечный характер; плотность потока тепла определяется скоростью и температурой воздушного потока, а также расстоянием от входа. Продольный теплоперенос имеет вспомогательный характер.

2) Температура трубы и графита практически однородны в поперечном сечении, так что в процессе теплопереноса они (труба и графит) играют роль транзитного теплового буфера.

3) Основное термическое сопротивление создает воздушный зазор; ввиду небольшой величины этого зазора, изменение температуры в зазоре можно полагать линейным, а теплоемкостью воздуха в зазоре можно пренебречь.

Рассмотрим теплообмен в трубе, в рамках этих приближений. Температура циркониевой трубы $T_z(z, t)$ определяется, с одной стороны, конвективным разогревом от протекающего горячего воздуха, с другой стороны – теплоотводом в графит через воздушный зазор, а также продольным теплопереносом по оси z :

$$\rho_Z \cdot C_Z \cdot \delta_Z \cdot \frac{\partial T_Z}{\partial t} = \alpha_1 (T_1 - T_Z) - \frac{\lambda_0}{\delta_0} (T_Z - T_C) - \lambda_Z \cdot \delta_Z \cdot \frac{\partial^2 T_Z}{\partial z^2},$$

где ρ_z – плотность циркония, C_z – теплоемкость циркония, λ_z – коэффициент теплопроводности циркония, λ_0 – коэффициент теплопроводности воздуха в зазоре, δ_z – толщина циркониевой трубы, δ_0 – средняя толщина зазора между трубой и графитом, T_1 – температура воздуха в трубе; T_C – температура графита вокруг трубы; α_1 – коэффициент теплоотдачи от воздуха к трубе. Теплофизические характеристики материалов взяты по справочнику [4].

Аналогично, температура графита $T_C(z, t)$ определяется, с одной стороны, притоком тепла через воздушный зазор, с другой стороны – наружным конвективным теплоотводом в окружающий воздух, а также продольным теплопереносом:

$$\rho_C \cdot C_C \cdot S_C \cdot \frac{\partial T_C}{\partial t} = \frac{\lambda_0}{\delta_0} (T_z - T_C) \cdot \pi D_C - \alpha_0 (T_C - T_0) \cdot \Pi_C - \lambda_C \cdot S_C \cdot \frac{\partial^2 T_C}{\partial z^2},$$

где ρ_C – плотность графита, C_C – теплоемкость графита, λ_C – коэффициент теплопроводности графита, S_C – площадь поперечного сечения графитового блока; D_C – диаметр цилиндрической полости в трубе; Π_C – наружный периметр блока, T_0 – температура окружающего воздуха, α_0 – коэффициент наружного теплообмена с воздухом (свободная конвекция).

Это, конечно, весьма приближенные уравнения. Наружный конвективный поток можно оценить лишь приблизительно, а кондуктивный теплоотвод через опорные конструкции здесь не учитывается. Решение этих уравнений сравнивалось с экспериментальными графиками температуры циркониевой трубы и графита для трех групп термодпар; величина воздушного зазора δ_0 варьировалась с целью лучшего соответствия.

Найденная таким образом эффективная толщины зазора составляет $\delta_{eff} = (0,15 \pm 0,05)$ мм; такому зазору соответствует термическое сопротивление $R_T = \delta_{eff} / \lambda_0 = 0,0057$ м² К /Вт, что находится в удовлетворительном согласии и с результатами численного моделирования экспериментов.

Следует отметить, что в описываемых экспериментах изучался теплоперенос от потока горячего воздуха к холодной графитовой кладке. В реакторе-облучателе тепло, наоборот, будет уноситься от горячего графита холодным потоком воздуха. Однако термическое сопротивление контакта будет одинаковым в обоих случаях.

Численный расчет температурного поля в активной зоне реактора

Можно сделать простую оценку эффективности охлаждения реактора при прокачке воздуха по циркониевым трубам. Число Нуссельта для турбулентного пограничного слоя в трубе как функцию продольной координаты z можно оценить [5] как

$$\text{Nu}_T(z) = 0,029 \text{Re}(z)^{0,8} \text{Pr}^{0,4}, \quad \text{Re}(z) = \frac{Uz}{\nu},$$

где U – скорость прокачки воздуха, ν – его кинематическая вязкость, D – диаметр трубы (89 мм); для скорости $\cong 50$ м/с коэффициент теплоотдачи $\alpha_D \cong 110$ Вт/(м² · К). Для сквозных труб, не занятых приборами (числом $N = 29$) площадь теплообмена (площадь внутренней поверхности труб) составляет $S_0 = 18$ м²; при перепаде температуры между трубой и воздухом $\Delta T = 50$ К, мощность отводимого потока тепла будет $W_0 = \alpha_D \cdot S_0 \cdot \Delta T \cong 100$ кВт, при этом разогрев воздуха на выходе из каналов будет примерно 10 градусов. Таким образом, можно обеспечить теплоотвод при стационарной мощности реактора примерно 100 кВт.

Свободная конвекция со стенок реактора, при коэффициенте теплоотдачи $\alpha_0 \cong 5$ Вт/(м² · К), сможет обеспечить стационарный теплоотвод мощностью примерно 7 кВт, но при этом возникает запредельный (свыше 100 К) перепад температуры в полиэтиленовой защите реактора; внутренняя температура полиэтилена будет слишком высока ($\cong 130^\circ\text{C}$). Перепад же температуры в графите (между рядами труб), для мощности 100 кВт, оценивается примерно как $\Delta T_C \cong 10$ К. Главное термическое сопротивление активной зоны составят воздушные зазоры.

Итак, для детального анализа температурных полей в активной зоне реактора были проведены трехмерные численные расчеты стационарного процесса принудительного охлаждения ак-

тивной зоны реактора, работающего на постоянном уровне мощности 100 кВт с однородным профилем энерговыделения. Контакт конструктивных элементов задан термическим сопротивлением. Теплообмен с окружающей средой не учитывался.

Результаты расчетов представлены на рис. 6 и 7. Из них видно, что большая часть теплоотвода от секций реализуется через нижние (опорные) поверхности, поэтому наиболее термически напряженными участками стали их верхушки.

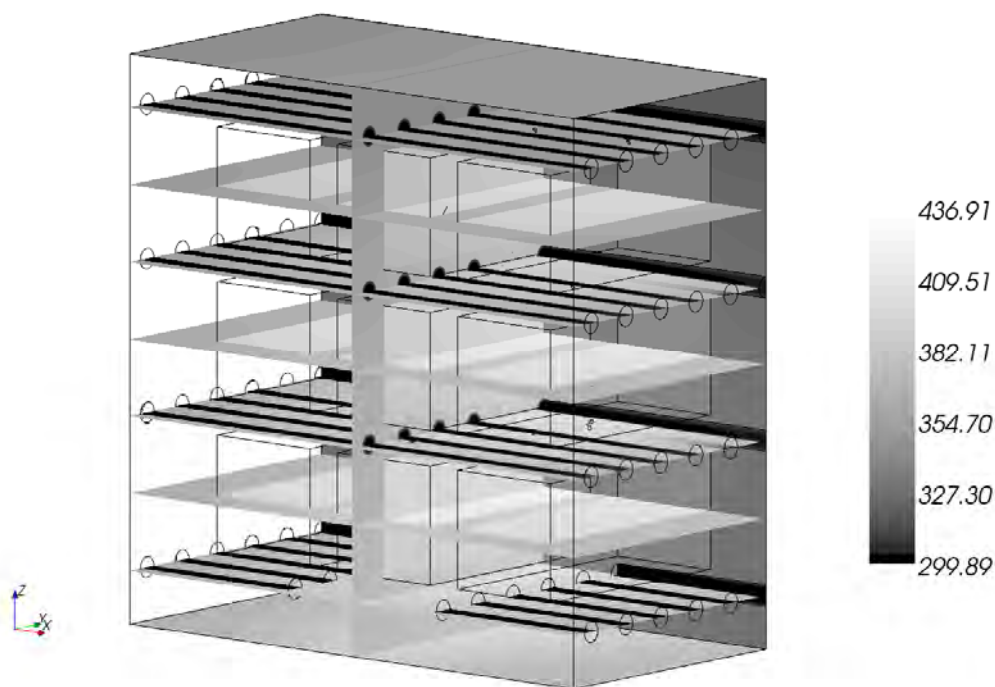


Рис. 6. Поле температур по активной зоне реактора, К.

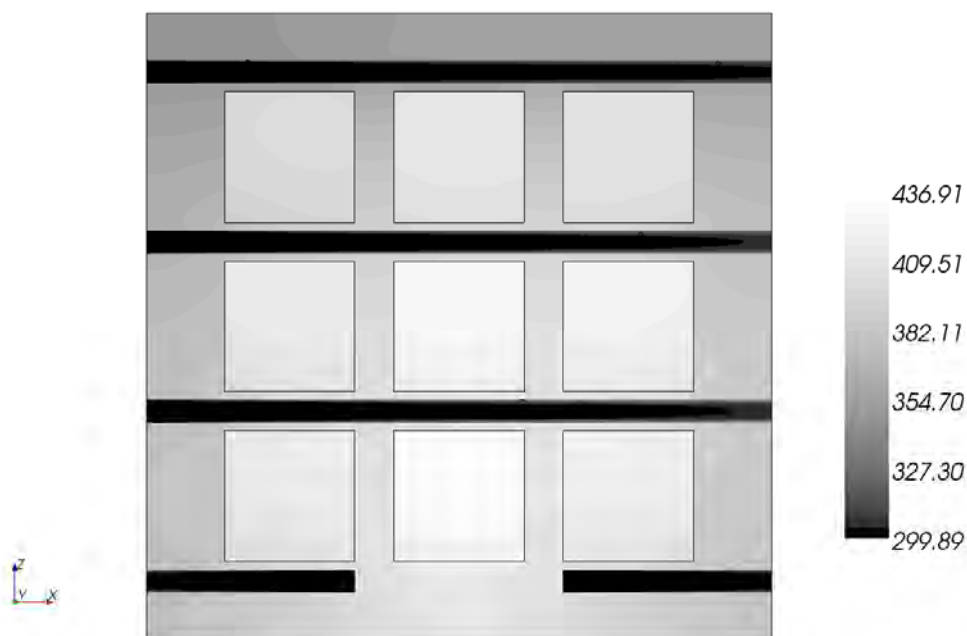


Рис. 7. Поле температуры по вертикальному сечению активной зоны реактора, К

На рис. 8 показано распределение температуры вдоль половины верхней поверхности наиболее горячего энерговыделяющего модуля (среднего нижнего).

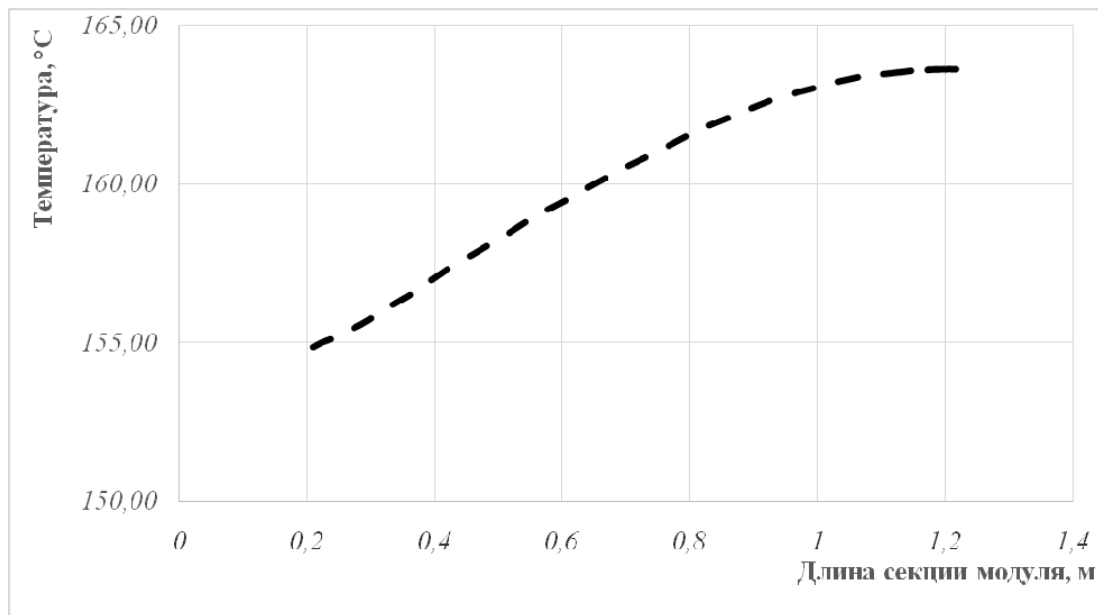


Рис. 8. Температура вдоль верхней поверхности одной из двух секций нижнего среднего энерговыделяющего модуля

Расчетная область состоит из половины активной зоны вследствие ее симметричности относительно вертикальной плоскости. Таким образом, реальный модуль АЗ, состоящий из двух секций, в данном контексте представлен одной его секцией, а расчетные параметры секции зеркально распространяются на весь модуль. Максимум температуры соответствует 163 °С, что является допустимым для всех конструктивных элементов активной зоны реактора.

Выводы

В результате работы получены оценочные расчетные данные о разогреве активной зоны реактора-облучателя, работающего в статическом режиме, и показаны наиболее термически нагруженные области.

Список литературы

1. Воинов А. М., Влох Г. В., Кривоносов В. Н. и др. Стенд критических сборок «Икар-С». Результаты физического пуска // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов. 2007. № 2. С. 29–33.
2. Влох Г. В., Кривоносов В. Н., Попов В. А. и др. Стенд критических сборок «ИКАР-С». Распределение плотности делений // Материалы IV международной конференции «Физика лазеров с ядерной накачкой и импульсные ядерные реакторы» (ЛЯН-ИР-2007), 18–21 сентября 2007 г. Сборник материалов: в 2 т., Т. 2. / Государственная корпорация по атомной энергии «РОСАТОМ», Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского. Обнинск, 2009. С. 499–504.
3. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967.
4. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники. Справочник. Москва: Атомиздат, 1968.
5. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. Москва-Ленинград: Госэнергоиздат, 1962.