

*Е.Э. Китанина, Э.Л. Китанин, Ю.С. Коврыжкина, А.Г. Фёдоров*

Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Россия

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОБОДНОЙ И СМЕШАННОЙ КОНВЕКЦИИ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ПЕНАЛОВ С ОТРАБОТАВШИМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ В СУХИХ ХРАНИЛИЩАХ КАМЕРНОГО ТИПА

### АННОТАЦИЯ

Приводятся результаты численного моделирования течения и теплообмена воздуха в ячейке камеры хранения отработавшего ядерного топлива. Рассмотрены свободная конвекция в зазоре между пеналом и гнездом хранения и смешанная конвекция на внешней поверхности гнезда. Задача решалась в сопряженной постановке с учетом теплопроводности стенок пенала и гнезда, а также теплового излучения. Основным результатом работы является полученное распределение теплового потока на внешней поверхности гнезда, которое в дальнейшем может быть использовано при моделировании теплообмена в камере. Кроме того, расчёты позволят оценить температурное состояние железобетонных строительных конструкций хранилища, которые должны обеспечивать его работоспособность в течение длительного времени.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Сборки тепловыделяющих элементов отработавшего ядерного топлива реакторов типа РБМК после 10–20-летнего хранения в бассейне помещаются в специальные капсулы, которые, в свою очередь, размещаются в пеналах для хранения в сухих хранилищах камерного типа.

При разработке проекта такого хранилища одним из важнейших условий является обеспечение допустимой температуры хранения топлива при охлаждении гнезд хранения за счет естественной циркуляции воздуха в хранилище. При заданном тепловыделении и геометрии сборки температура топлива определяется термическим сопротивлением внутри гнезда хранения и термическим сопротивлением на границе гнезда хранения, то есть коэффициентом теплоотдачи от внешней поверхности гнезда к охлаждающему воздуху. Кроме того, для достоверного расчета максимального значения температуры поверхности гнезда необходимо учитывать реальное распределение теплового потока по высоте пенала.

При расчетах термического сопротивления внутри гнезда хранения необходимо учитывать сложный характер теплообмена внутри пенала и гнезда хранения (теплопроводность твердых элементов конструкции и радиационный теплообмен между ними, а также свободную конвекцию в зазорах).

Еще одной особенностью рассматриваемой проблемы является сложный характер течения, формирующегося с наружной стороны гнезда хранения. Это течение следует рассматривать как смешанную конвекцию, вынужденная составляющая которой

определяется охлаждающим воздухом, поступающим из подводящих труб, а свободноконвективная – локальным влиянием силы плавучести.

В настоящей работе представлены результаты численного моделирования течения и теплообмена при охлаждении пеналов с отработавшим ядерным топливом, выполненного с помощью коммерческой системы FLUENT.

### 2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

#### 2.1. Область интегрирования

На рис. 1 показаны продольное сечение гнезда хранения, а также предполагаемая схема течений, возникающих внутри полости. Наружный диаметр пенала  $d_1 = 630$  мм, внутренний диаметр гнезда  $d_2 = 700$  мм, высота пеналов  $h_1 = 8$  м, а высота гнезда  $h_2 = 9$  м. Таким образом, между пеналом и гнездом имеется заполненная воздухом осесимметричная полость.

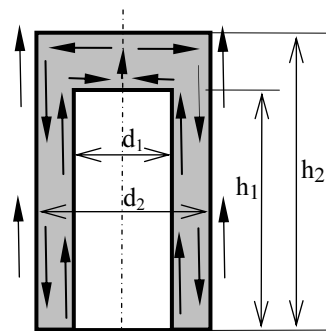


Рис. 1. Геометрия пенала и гнезда. Приблизительная схема течения воздуха в полости между пеналом и гнездом и снаружи гнезда

Тепловой поток, подводимый изнутри пенала по радиусу, проходит через стенку пенала, воздушную прослойку, вызывая в ней свободноконвективное течение и стенку гнезда, от которой отводится охлаждающим воздухом.

Гнезда с пеналами расположены в камере с шагом  $S = 1$  м, между ними находятся трубы ( $d = 309$  мм), через которые в камеру поступает охлаждающий воздух (см. рис. 2). Чёткое структурирование камеры, а также наличие вертикальных перегородок ( $h = 8$  м), разбивающих камеру на отсеки, приводят к тому, что не только внутри полости между пеналами и гнездом, но и в каждой отдельной ячейке камеры течение будет близким к симметричному.

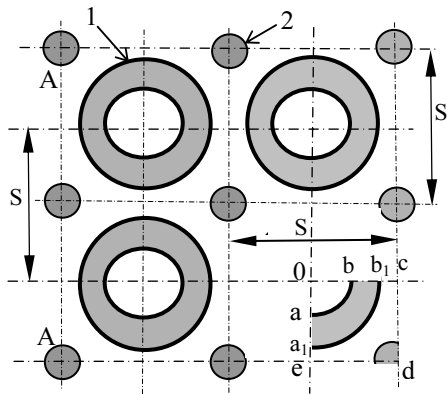


Рис. 2. Схема расположения гнёзд (1) и труб для подвода охлаждающего воздуха (2) в камере

В настоящей работе в силу малости скоростей не учитывается поперечный поток воздуха в верхней части ячейки, который будет формироваться в реальной камере хранения. Вместо этого принимается, что охлаждающий воздух вытекает из ячейки через верхнюю щель. В принятой постановке геометрия ячейки обладает симметрией относительно двух осей, проходящих через центр подводящего отверстия. Как следствие, можно сформулировать расчетную задачу для одной четверти ячейки  $abb_1cdea_1$ , наложив соответствующие условия симметрии течения.

Отметим, что число Релея для течения в полости  $aa_1b_1b$ , рассчитанное по ширине зазора в её узкой части, составляет величину порядка  $10^6$ . Однако для верхней части полости ( $a_1a_0bb_1a_1$ ) число Релея значительно выше – порядка  $10^{12}$ . Поэтому необходимо учитывать турбулизирующее влияние потока, поступающего из верхней части полости, на течение в кольцевом зазоре. Для потока, отводящего тепло с наружной поверхности гнезда (горизонтальное сечение области интегрирования  $a_1b_1cde$ ), число Релея значительно больше, оно имеет порядок  $10^{15}$ , т.е. наружное течение носит явно выраженный турбулентный характер. Турбулизации внешнего течения способствует также сложный характер обтекания гнезда струёй воздуха, вытекающей из подводящих труб.

## 2.2. Система уравнений

Основной целью расчёта является исследование распределения теплового потока на наружной поверхности гнезда при заданном распределении его на внутренней поверхности пенала. Это распределение определяется характером течения в полости, во внешнем потоке, а также теплопроводностью стенок пенала и гнезда. Любая неравномерность течения вдоль поверхности пенала и гнезда может привести к неравномерности распределения теплового потока на наружной поверхности гнезда. Но достаточно высокая теплопроводность металла, из которого выполнены пеналы и гнездо (сталь 10ХСНД,  $\lambda = 40 \text{ Вт/(м·К)}$ ), должна сглаживать воз-

никающие неравномерности. Для учёта влияния всех этих факторов необходимо рассматривать сопряжённую задачу.

Следует отметить, что уровень температур и скорости течения в полости и во внешнем потоке таковы, что интенсивности конвективного и радиационного теплообмена соизмеримы, поэтому не учитывать излучение недопустимо.

Таким образом, система уравнений, описывающая процесс передачи тепла от внутренней поверхности пенала к потоку воздуха, обтекающему гнездо снаружи, включает в себя:

- уравнение теплопроводности (для стенок пенала и гнезда);
- осреднённые по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (для течения в полости и в ячейке);
- модель турбулентности (для течения в полости и в ячейке);
- уравнение энергии (для течения в полости и в ячейке);
- уравнение радиационного теплообмена (для полости и ячейки).

Задача решалась в стационарной постановке. При решении использовалась одно-параметрическая «низкорейнольдсовая» модель турбулентности Спаларта-Алмараса (анализ различных моделей турбулентности применительно к задачам подобного рода представлен в [2]).

Для описания радиационного теплообмена применялась модель дискретных ординат [3], позволяющая использовать условия симметрии.

Решение задачи в такой постановке выполнялось с использованием коммерческого пакета FLUENT [3].

## 2.3. Расчетная сетка и граничные условия

На рис. 3 (а, б) представлены общий вид области интегрирования и поперечное сечение в верхней части расчетной сетки.

Общая размерность сетки – 630000 ячеек, из них 120000 ячеек относятся к полости между пеналом и гнездом, около 10000 ячеек – к стенкам пенала и гнезда, а остальные 500000 ячеек содержит сетка для расчёта течения и теплообмена в камере. Необходимость хорошего разрешения структуры течения вблизи стенки гнезда, в щели между пеналом и гнездом и вблизи входного отверстия обусловила соответствующие сгущения сетки.

В расчетах задавались следующие граничные условия. На вертикальных плоских поверхностях ставились условия симметрии (равенство нулю потоков всех физических величин через эти границы), на цилиндрических поверхностях гнезда и пенала, дне камеры (за исключением входного отверстия) и верхней крышке – условия прилипания.

На внутренней стенке пенала согласно формуле, полученной в [1], задавался равномерный по полярному углу тепловой поток:

$$q_0(z) = \langle q \rangle \left[ (k_z - 1) \frac{\pi}{\pi - 2} \cos\left(\frac{\pi}{2l_{\text{act}}}(z - z_i)\right) + \frac{\pi - 2k_z}{\pi - 2} \right].$$

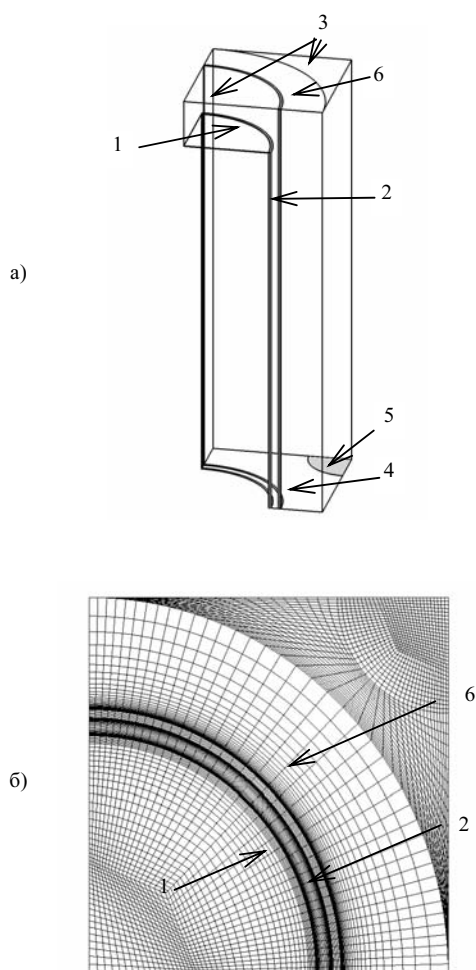


Рис. 3. Общий вид области интегрирования (а) и поперечное сечение верхней части сетки (б): 1 – стенка пенала, 2 – стенка гнезда, 3 – верхняя крышка, 4 – нижняя стенка, 5 – выходное сечение подводящей трубы, 6 – выходная щель

Здесь  $\langle q \rangle = 226.23 \text{ Вт/м}^2$  – среднее значение теплового потока,  $k_z = q_{\max}/\langle q \rangle = 1.4$  – коэффициент неравномерности распределения теплового потока,  $l_{\text{act}} = 3.46 \text{ м}$  – длина активной зоны. Распределение  $q_0$  по высоте с учетом особенностей сборки (в гнездо помещают два пенала, причем второй переворачивают) показано на рис. 4.

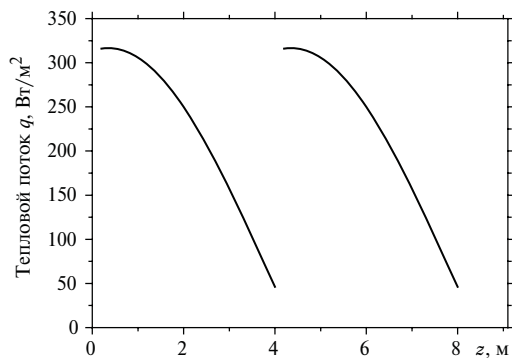


Рис. 4. Распределение теплового потока по внутренней поверхности пеналов

На границах раздела пенал – полость, полость – гнездо и гнездо – внешний поток были поставлены граничные условия четвертого рода. Температура воздуха на входе в камеру принималась равной  $t_0 = 39^\circ\text{C}$ , что соответствует наиболее неблагоприятным погодным условиям в районе хранилища, расход воздуха на трубу задавался равным  $G_1 = 0.063 \text{ кг/с}$ .

Расчеты проводились на 6-процессорном кластере кафедры гидроаэродинамики СПбГПУ.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ

Основным результатом, который будет использован в дальнейших расчётах, является распределение теплового потока на внешней поверхности гнезда. Среди влияющих на него факторов наиболее значимыми, по предварительным оценкам, должны быть: распределение скоростей в ячейке (снаружи гнезда), распределение скоростей внутри полости и радиационный теплообмен.

Поле скорости в камере формируется под влиянием струи воздуха, поступающего из подводящей трубы, и свободноконвективного течения вблизи поверхности гнезда. В нижней части ячейки наблюдается сильное циркуляционное течение, в верхней части формируется очень слабое обратное течение. На большей части высоты ячейки вблизи центральной оси вертикальная скорость потока близка к нулю, так что течение сосредоточено только вблизи поверхности нагрева. Причем профили скорости свидетельствуют о турбулентном режиме течения в свободно-конвективном пристенном слое на большей части поверхности гнезда. Максимум скорости вертикального течения вблизи поверхности гнезда составляет порядка  $0.5 \text{ м/с}$ .

Особенно сложный пространственный характер течения наблюдается в нижней части ячейки (рис. 5, а).

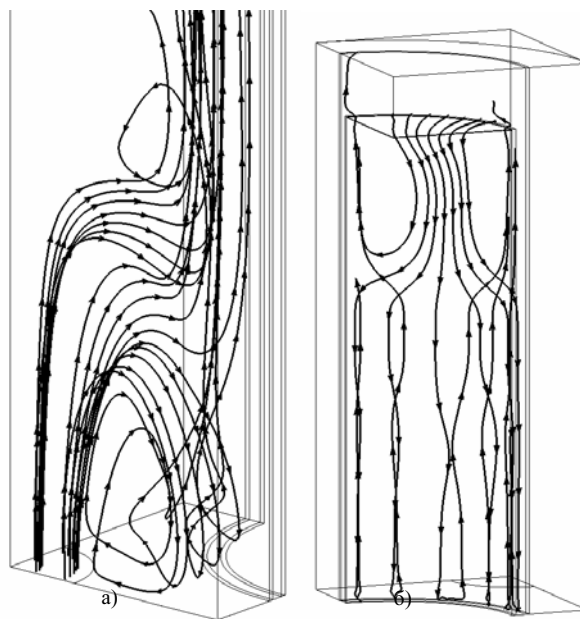


Рис. 5. Линии тока в камере (а) и в кольцевом зазоре между пеналом и гнездом (б)

Судя по рисунку, длина зоны выраженного струйного течения составляет величину около пяти-шести диаметров впускной трубы, что в несколько раз меньше величин, характерных для свободной струи. Сокращение дальности струи обусловлено наличием зоны интенсивных обратных токов. Видно, что все линии тока, выходящие с периферии подводящей трубы, или сразу прижимаются к обогреваемой стенке гнезда или же отклоняются к углам расчетной области, проходя через зону циркуляции и затем продолжают вблизи стенки. Линии тока, начинающиеся в центре трубы, также подходят к стенке, но дальше от входа, после второй циркуляционной зоны.

Течение в щели между пеналом и гнездом иллюстрируется при помощи линий тока на рис. 5, б. Как видно из рисунка, в верхней, центральной по углу, части щели выделяется зона опускного течения, которое распадается на циркуляционные контуры в нижней половине щели. Формирование такого течения обусловлено свободной конвекцией в цилиндрической полости, расположенной над пеналом. В расчётах, выполнявшихся ранее для модели без цилиндрической полости, была получена однородная по полярному углу картина течения в щели.

На рис. 6 показаны поля температуры стенки пенала (рис. 6, а), наружной стенки гнезда хранения (рис. 6, б) и распределение теплового потока на стенке гнезда (рис. 6, в). Температура стенки гнезда достигает максимального значения в зоне верхнего пенала и составляет  $117^{\circ}\text{C}$ . Локальный минимум температуры вызван увеличением теплоотдачи в области натека струи на стенку. Перепад температур между наружными стенками пенала и гнезда достигает  $23^{\circ}\text{C}$ .

На рис. 6, в отчётливо видны периодические структуры с более высокими и более низкими значениями теплового потока, соответствующие зонам максимального тепловыделения (см. рис. 4). Неравномерность распределения по полярному углу является следствием сильного влияния радиационного теплового потока. Слабое влияние отмеченной неоднородности теплового потока на распределение температуры объясняется высокой теплопроводностью стенки.

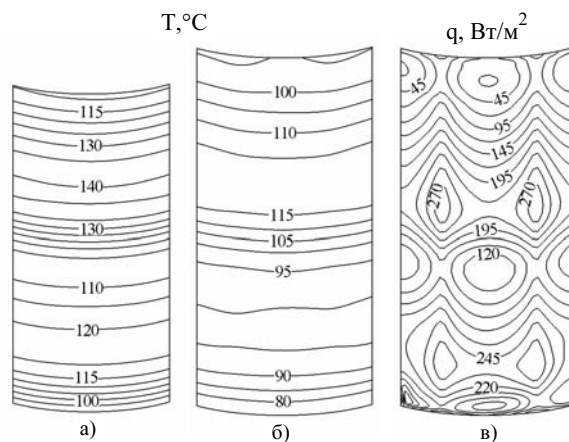


Рис. 6. Распределение температуры по поверхности пенала (а), гнезда (б) и распределение теплового потока по поверхности гнезда (в)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью коммерческого пакета FLUENT выполнено численное моделирование течения и теплообмена в ячейке камеры хранения отработавшего ядерного топлива.

Рассмотрены особенности свободно-конвективного течения в зазоре между пеналом и гнездом и течения в камере, вызванного смешанной конвекцией. Получено распределение теплового потока на внешней стенке гнезда хранения. Данные результаты могут использоваться в дальнейшем при расчетах течения и теплообмена в камере.

*Авторы выражают благодарность за сотрудничество проф. Е.М. Смирнову, проф. В.В. Рису и доценту Д.К. Зайцеву.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Исходные** требования на выполнение расчётных и экспериментальных исследований процессов охлаждения облучённого ядерного топлива. ВНИПИЭТ, 2002. 21 с.
2. **Смешанная** конвекция в вертикальной обогреваемой трубе: расчет и сопоставление с экспериментом / Н.Г. Иванов, Э.Л. Китанин, М.Е. Лебедев, В.В. Рис, А.Г. Федоров // Тр. 3-й Российской национальной конференции по теплообмену. М.: Изд-во МЭИ, 2002. Т. 3. С. 79-82.
3. **FLUENT**. User's Guide. 1998.