

УДК 621.039.743

О. К. Безюков [O. K. Bezyukov]
 П. М. Афанасьев [P. M. Afanasyev]

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ПЕНАЛА
 С ОТРАБОТАВШИМ ЯДЕРНЫМ ТОПЛИВОМ ПРИ ХРАНЕНИИ В СУХОМ
 ХРАНИЛИЩЕ КАМЕРНОГО ТИПА**

**NUMERICAL SIMULATIONS OF SPENT NUCLEAR FUEL STORAGE CASE
 THERMAL STATE FOR A DRY CHAMBER-TYPE STORAGE**

ФГБОУ ВО ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова, г. Санкт-Петербург, Россия,
 E-mail: okb-nayka@yandex.ru

Аннотация. В современном мире ядерная энергетика сильно зависит от замыкающих составляющих ядерного топливного цикла и, в частности, от долговременного хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и возможности его переработки.

Материалы и методы, результаты. В работе изложена методика и результаты теплового расчёта пенала, загруженного ампулами с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) РБМК-1000, моделирование произведено с использованием пакета ANSYS Fluent, произведено численное моделирование непосредственно конвективного теплообмена в межампульном пространстве и при обтекании гнезда хранения. Определена максимальная температура твэлов при различных способах загрузки ОЯТ в пенал. Предложена компоновка ПТ внутри пенала хранения, выдержанного меньший срок по сравнению с номинальной загрузкой. Произведено обоснование тепловой безопасности предложенной загрузки.

Заключение. Была предложена компоновка ПТ внутри пенала хранения для неравномерно распределённого тепловыделения внутри пенала, а в частности: 12 ампул с тепловыделением 62 Вт/ПТ расположены по периферии, а 19 ампул с тепловыделением 49 Вт/ПТ расположены в центре пенала, что не привело к перегреву, причём наиболее нагретым остался пучок, расположенный в центральной ампуле, но максимальная температура снизилась на 2.5 °С и составила 190.8 °С. Разработанная компоновка ПТ внутри пенала хранения соответствует требованиям тепловой безопасности при хранения ОЯТ РБМК-1000 в хранилищах сухого типа.

Ключевые слова: отработавшее ядерное топливо, сухое камерное хранение, тепловой расчет, численное моделирование.

Abstracts. In today's world, nuclear power is highly dependent on the closing components of the nuclear fuel cycle and, in particular, on the long-term storage of spent nuclear fuel (SNF) and the possibility of its processing.

Materials and methods, results. The paper describes the methodology and results of thermal calculation of the canister loaded with ampoules with spent nuclear fuel (SNF) RBMK-1000, modeling was performed using the ANSYS Fluent package, numerical modeling of directly convective heat exchange in the inter-module space and flow around the storage slot was performed. The maximum temperature of fuel rods with different methods of loading SNF into the canister has been determined. The proposed layout of the PT inside the storage case, sustained a shorter period compared to the nominal load. A justification of the thermal safety of the proposed load was made.

Заключение. Нами была предложена компоновка ПТ внутри пенала хранения для неравномерно распределённого тепловыделения внутри пенала, а в частности: 12 ампул с тепловыделением 62 Вт/ПТ расположены по периферии, а 19 ампул с тепловыделением 49 Вт/ПТ расположены в центре пенала, что не привело к перегреву, причём наиболее нагретым остался пучок, расположенный в центральной ампуле, но максимальная температура снизилась на 2.5 °С и составила 190.8 °С. Разработанная компоновка ПТ внутри пенала хранения соответствует требованиям тепловой безопасности при хранения ОЯТ РБМК-1000 в хранилищах сухого типа.

Key words: spent nuclear fuel, dry chamber storage, thermal calculation, numerical simulation.

Введение. В современном мире ядерная энергетика сильно зависит от замыкающих составляющих ядерного топливного цикла и, в частности, от долговременного хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) и возможности его переработки. Хранилища отработавшего ядерного топлива для реакторов РБМК-1000, ВВЭР-440, ВВЭР-1000, БН-600, ЭГП-6 были спроектированы и построены ещё в 1960–70-х годах [1].

В настоящее время для хранения ОЯТ после выдержки в хранилищах “мокрого” типа с целью снижения остаточного тепловыделения предложено использовать сухие хранилища. Особенностью сухого способа хранения ОЯТ является пассивный теплоотвод с использованием в качестве теплоносителя инертных газов и воздуха.

Сборки тепловыделяющих элементов ОЯТ реакторов типа РБМК после 10–20-летнего хранения в бассейне выдержки 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 гнёзд хранения за счет естественной циркуляции воздуха в хранилище. При заданном тепловыделении и геометрии сборки температура топлива определяется теплопереносом внутри гнезда хранения и теплоотдачей на границе гнезда хранения, то есть коэффициентом теплоотдачи от внешней поверхности гнезда к охлаждающему воздуху. Кроме того, для достоверного расчета максимального значения температуры поверхности ампулы топлива, необходимо учитывать реальное распределение теплового потока по высоте пенала. При расчетах теплопереноса внутри гнезда хранения необходимо учитывать сложный характер теплообмена внутри пенала и гнезда хранения (теплопроводность твёрдых элементов конструкции и лучистый теплообмен между ними, а также свободную конвекцию в зазорах). Течение с наружной стороны гнезда хранения следует рассматривать как смешанную конвекцию, вынужденная составляющая которой определяется охлаждающим воздухом, поступающим из подводящих труб.

Сухое хранение ОЯТ. В настоящее время, в России, эксплуатируется 11 блоков с реакторами типа РБМК- 1000 и 11 блоков реакторов ВВЭР-1000, а также 5 ВВЭР-440, 1 БН-600 и 1 БН-800 [2, 3], которые производят около 650 тонн отработавшего ядерного топлива в год [4], с пуском заводов РТ-2 планируемую мощность радиохимических перерабатывающих заводов составит 1900 тонн в год по урану к 2025 году. Большая часть этого топлива не перерабатывается и находится в при реакторных бассейнах выдержки, промежуточных «мокрых» хранилищах на АЭС и централизованном хранилище в здании 1 на ГХК, которые близки к заполнению [5].

По причине того, что возможности радиохимической переработки ОЯТ значительно ниже скорости накопления, то его длительное контролируемое хранение является необходимым условием функционирования атомного топливного цикла. Согласно проекту, который был разработан ГИ ВНИПИЭТ (Санкт-Петербург), в 2005 году были начаты работы по строительству сухого хранилища ОЯТ реакторных установок РБМК-1000 и ВВЭР-1000 на Горно-химическом комбинате (Красноярская обл., г. Железнодорожск). В 2011 году было завершено строительство первого пускового комплекса. Вместимость комплекса составляла 8129 тонн (по диоксиду урана) [5].

Требования ко всем методам сухого хранения ОЯТ [2, 6]:

- обеспечение сохранности ОЯТ в течение не менее 50 лет
- обеспечение температуры на оболочке ТВЭЛ при хранении в среде инертного газа не более 300 °С для топлива РБМК-1000 и 350 °С для топлива ВВЭР-1000;
- обеспечение долговечности строительных конструкций хранилища в течение не менее чем 100 лет;
- обеспечение пассивного способа отвода тепла от хранимого топлива;
- устойчивость хранилища к внешним воздействиям (падению самолета, воздушной ударной волне, летящим предметам, землетрясению, урагану, смерчу);
- обеспечение возможности удобной и быстрой идентификации источника появления радиоактивных загрязнений [7].

Характеристики исследуемого объекта. Исследуемый объект включает в себя пучки твэлов РБМК-1000, расположенные внутри ампул, которые устанавливаются в решетки, находящиеся внутри пеналов, расположенных в два яруса в гнёздах хранения, представляющих из себя стальные трубы, находящиеся в камере хранения.

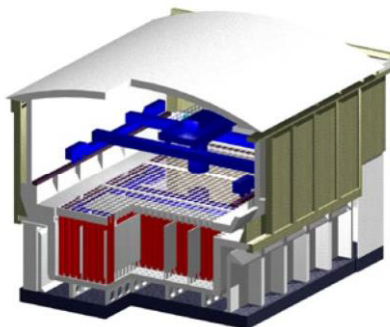


Рис. 1. Разрез камеры хранения

Каждая камера хранения ОЯТ, рис. 1, имеет вытяжные шахты по обеим сторонам, слева и справа, а также входные опускаемые шахты для подачи в подкамерное пространство атмосферного воздуха. Охлаждение гнезд реализуется конвективным течением воздуха вдоль поверхности гнезд хранения. Течение воздуха в камерах хранения сухого хранилища реализуется в результате организованного естественного воздухообмена, при этом движущими силами такого воздухообмена являются гравитационные силы и ветровое давление. Температурный режим элементов хранилища (гнезд хранения, пеналов, ампул с ОЯТ и бетона строительных конструкций здания) зависит от расхода воздуха относительно гнезд, расположенных в камерах хранения ОЯТ.

В отличие от принудительной вентиляции система охлаждения пеналов с ОЯТ в гнездах хранения сухого хранилища является пассивной, что повышает ее надежность и дает экономический выигрыш при эксплуатации.

Камера хранения имеет ширину 22 и высоту 9 м. Перегородки между гнездами хранения начинаются на высоте 3 м от нижней части гнезд хранения и заканчиваются на высоте 11 м. Входные каналы с жалюзийными решетками находятся на высоте 10 м, имеют ширину 1 м. Выходы вытяжных шахт находятся на высоте 30 м и имеют ширину 0.6 м. Высота всего здания сухого хранилища – 30 м, ширина – 30 м.

Каждая камера хранения имеет 242 гнезда для герметичных пеналов с ОТВС РБМК-1000, расположенных в гнезде в два яруса [1].

Согласно проектной документации сухого хранилища камерного типа ХОТ-2[8], размещение ампул с ПТ ОТВС РБМК-1000 должно осуществляться в герметичные 30-местные пеналы хранения. В марте 2015 года по результатам испытаний и расчетов, подтвердивших ядерную и радиационную безопасность изделия, внедрено в эксплуатацию изобретение специалистов ФГУП «ГХК» [9] - 31-местный пенал хранения ОЯТ РБМК-1000 [8]. Технические решения, принятые в новой конструкции пенала, повысили технологичность процесса его изготовления и надежность при эксплуатации (подготовке к хранению). Кроме того, ввод в эксплуатацию 31-местного пенала позволил увеличить вместимость «сухого» хранилища ОЯТ РУ РБМК-1000 при сохранении проектных объемов строительства объекта [8].

Пенал (см. рис. 2 и 3) содержит корпус 1 с плоским днищем 2, к которому присоединен амортизатор 3 и крышка 4. Внутри корпуса 1 установлена решетка 5, состоящая из нескольких дисков 6, закрепленных между собой стойками 7 на определенных расстояниях друг от друга, с отверстиями 8, образующими ячейки для размещения ампул с ПТ [9].

В работе [10] указаны наружный диаметр пенала 630 мм и высота 2-х пеналов 8м, также в работе [1] пенал рассматривается, как стальная труба размером (диаметр и толщина стенки) 630×7 мм, длина пенала 4,1 м, изготовлен из стали марки 10ХСНД.

В каждом пенале размещены по 31 ампулы с ОТВС РБМК-1000. Размер ампул (диаметр и толщина стенки) 92×2 мм, ампулы расположены в треугольной решетке с шагом 96 мм [1]. Пеналы в гнезде размещаются в два яруса друг над другом.

Параметры численной модели. Моделирование было произведено в программном пакете ANSYS FLUENT, в задаче реализуются процессы лучистого теплопереноса, теплопроводности, свободной и вынужденной конвекции, выбрана стандартная $k-\omega$ модель турбулентности, для реализации лучистого теплопереноса используется модель излучения DO, для реализации естественной конвекции используется приближение Бусинеска.

Производится два типа расчетов:

А) Расчёт теплового состояния **гнезда хранения** при смешанной (свободной плюс вынужденной) конвекции в ячейке камеры хранения, включающей в себя пространство между соседними гнездами, зазор между пеналом и гнездом хранения и стенку пенала, на которой задан тепловой поток.

Б) Расчёт теплового состояния **пенала с ОЯТ** с заданным объёмным тепловыделением, включающий в себя зазор между пеналом и гнездом хранения, на внешней поверхности которого задан отводимый тепловой поток. В межампульном пространстве непосредственно моделируется конвективный теплообмен.

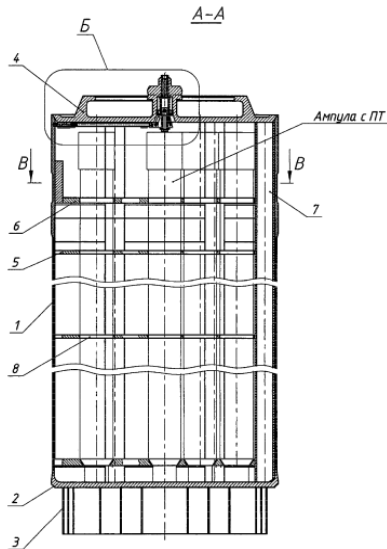


Рис. 2. Продольное сечение пенала [9]

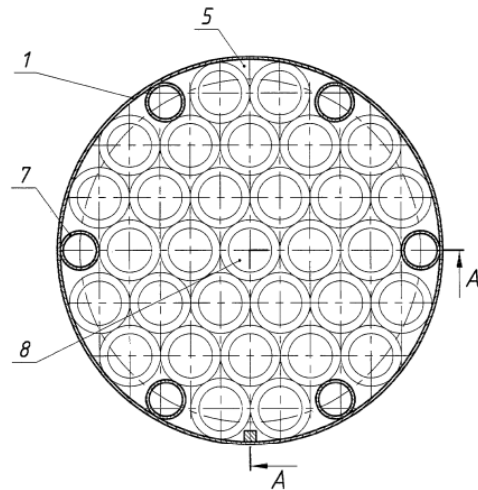


Рис. 3. Поперечное сечение пенала [9]

Тепловое состояние гнезда хранения

Для расчёта теплового состояния гнезда хранения рассматривается область, включающая в себя оболочки пеналов, зазор между пеналами и гнездом, стенку гнезда и пространство между гнездами. Модель гнезда представляет из себя цилиндр диаметром 720 мм с толщиной стенки 7 мм, изготовленный из стали 10ХСНД. Наружный диаметр пенала 630 мм и высота 2-х пеналов 8,2 м [10].

Пенал рассматривается, как стальная труба размером (диаметр и толщина стенки) 630×7 мм, длинна пенала 4,1 м, изготовлен из стали марки 10ХСНД. В каждом пенале размещены по 31 ампулы с ОТВС РБМК-1000 [1]. Пеналы в гнезде размещаются в два яруса друг над другом.

Между гнездами, расположенными с шагом 1000 мм, находятся трубы диаметром 309 мм, через которые в камеру по специальным каналам поступает охлаждающий воздух (см. рис. 4).

Вытяжные каналы равноудалены от центра гнезда хранения и центры вытяжных каналов располагаются в вершинах квадрата со стороной 1000 мм.

В связи с симметричностью расчётной области можно рассматривать сектор моделирования 45°, что позволяет снизить вычислительные затраты, поперечный срез расчётной области представлен на рис. 5.

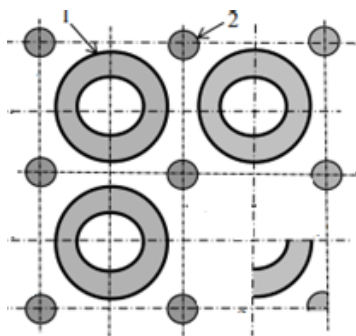


Рис. 4. Схема расположения гнёзд (1) и труб для подвода охлаждающего воздуха (2) в камере [10]

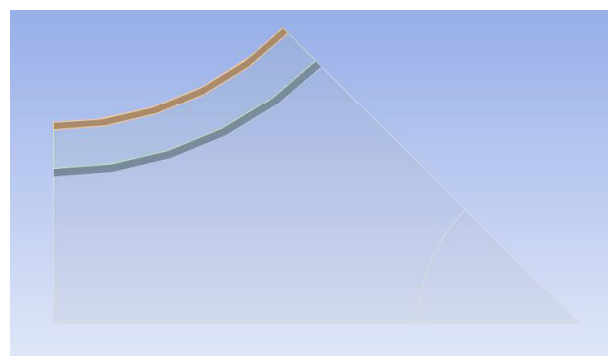


Рис. 5. Поперечный срез расчётной области

Верхняя и нижняя границы расчётной области теплоизолированы и на них заданы условия прилипания. На рис. 5 в правом нижнем углу мы видим сектор вентиляционного отверстия, диаметр которого равен 309 мм, аналогичное отверстие присутствует как и на верхней границе расчётной области, так и на нижней, внизу задано граничное условия отсутствия перепада давления при поступлении воздушного потока в расчётную область, а на верхнем вентиляционном отверстии задан перепад давления равный 12 Па, предполагая нагрев воздуха на 15°К, рассчитывается перепад давления на 20 метров высоты вытяжных каналов [11]:

$$\Delta P = \Delta \rho * h * g, \quad (1)$$

где $\Delta\rho$ – разность плотностей нагретого воздуха и окружающего, h – высота трубы, g – ускорение свободного падения.

Особенностью задачи является неравномерность тепловыделения по высоте, поскольку ТВЭЛы не занимают всю высоту расчётной зоны. Поскольку хранение осуществляется в пеналах, устанавливаемых в два яруса в гнездах хранения (металлических трубах).

Поэтому внутренняя поверхность пеналов разделена на 5 зон по типу граничного условия, снизу вверх: 190 мм теплоизолированная зона, затем зона с удельным тепловым потоком высотой 3640 мм, зона теплоизолированная высотой 410 мм, 3640 мм зона с удельным тепловым потоком и 1120 мм теплоизолированная зона.

Задан удельный тепловой поток, равный тепловому потоку при загрузке ОТВС времени выдержки 10 лет, т.е. остаточное тепловыделение составляет 54 Вт/ПТ, чему соответствует удельный тепловой поток на боковой поверхности пенала 238.4 Вт/м² [12, 13].

Таким образом между зонами с фиксированным удельным тепловым потоком на боковой поверхности пенала находятся теплоизолированные зоны. Посредством задания таких граничных условий учитывается неравномерность тепловыделения.

Структурированная расчётная сетка в стенках гнезда и пенала имеет меньшее разрешение поскольку релаксация профиля температуры в металлах происходит быстрее, чем в воздушных прослойках. Сетка в поперечном сечении представлена на рис. 6, на рис. 7 показано продольное распределение. Общее число расчетных ячеек ~ 6 млн.

С целью лучшего разрешения пограничных слоев вблизи поверхности гнезда построены призматические слои сетки, в открытом пространстве вне гнезда характерный размер элемента расчётной сетки составляет 5 мм.

Расчётная сетка в зазоре построена посредством вытягивания сетки, разбивающей верхнюю границу зазора.

Конвекция в зазоре между пеналом и гнездом не моделируется, а конвективный теплоперенос учитывается посредством задания эффективного коэффициента теплопроводности, равного $0.1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$, рассчитанный по эмпирической формуле для эффективного коэффициента теплопроводности в зазоре [14]:

$$l_{\text{эфф}} = \varepsilon * l_0 \tag{2}$$

$$\varepsilon = B * (Gr * Pr)^m, \tag{3}$$

где $B=0.105$ и $m=1/3$ для $10^3 < Gr * Pr < 10^6$.

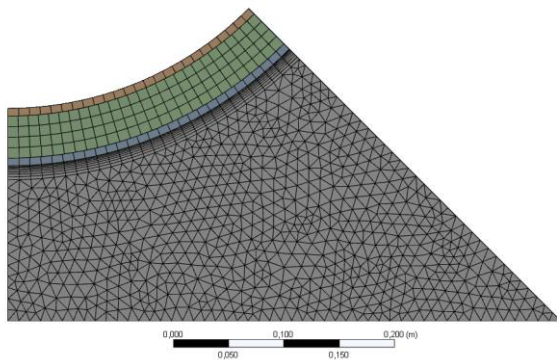


Рис. 6. Поперечное сечение расчётной сетки

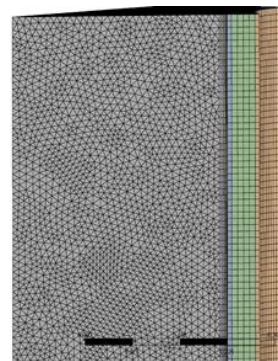


Рис. 7. Продольное сечение части расчётной сетки

Расчёт лучистого теплопереноса производится только между поверхностью, моделирующей внешнюю поверхность пеналов, и внутренней поверхностью гнезда сквозь зазор, поэтому принято достаточным количество углов θ и ϕ равное 4, в работе [15] коэффициент поглощения излучения листовой стали с окалиной равен 0.66, поэтому задаём коэффициенты поглощения излучения моделью пучков твэлов, стенками ампул, пенала и гнезда равным 0.65. Конвекция в пространстве между гнездами рассчитывается с использованием $k-\omega$ модели турбулентности, выталкивающая сила учитывается по модели Буссинеска.

Особенностью решаемой задачи является неравномерное распределение тепловыделения по пеналам, что приводит к неравномерному тепловому потоку через стенки пеналов, а соответственно и стенку гнезда хранения, рис. 8 и 9 иллюстрируют неравномерность профиля температур на стенках пенала и гнезда. Видно, что наиболее нагретым является верхний пенал, соответственно температуры участков гнезда находящихся напротив верхнего пенала выше.

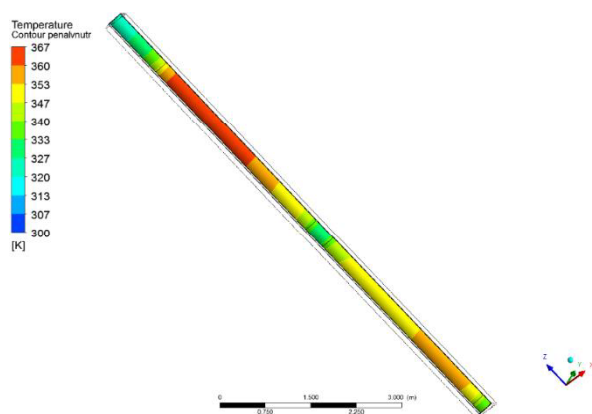


Рис. 8. Распределение температуры на внутренней поверхности пеналов

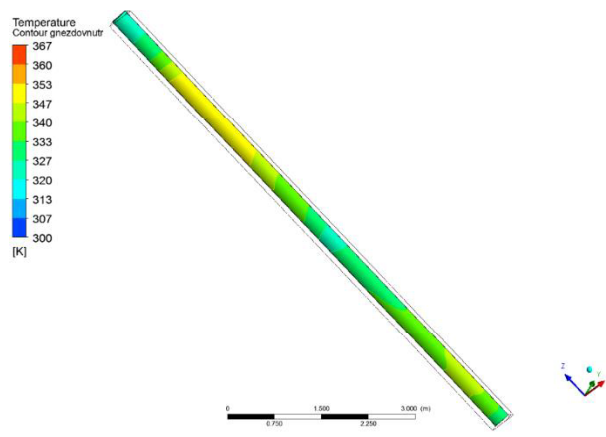


Рис. 9. Распределение температуры на внутренней поверхности гнезда

В табл. 1 представлены средние температуры воздушных масс на входе, выходе и в зазоре.

Таблица 1

Средние температуры		
Средняя температура, К		
Вход	Выход	Зазор
300	310.5	343.7

Из средней температуры на выходе из расчётной области, представленной в таблице 4 видно, что начальное предположение о нагреве охлаждающего воздуха на 15°K не выполняется, поэтому в дальнейших расчетах принят нагрев воздуха 10 °K, соответствующий перепаду давлений на входе и выходе из гнезда 6.1 Па.

Поскольку в нижней части расчётной области существует циркуляционное течение у основания гнезда воздух у гнезда на высоте 0.5 метра прогрет лучше, чем на высоте 1 метр или даже 3 метра.

В табл. 2 и 3 представлены максимальные температуры стенок пеналов и гнезда хранения и средние температуры воздушных масс на входе, выходе и в зазоре.

Таблица 2

Температуры стенки пенала и гнезда	
Максимальная температура, К	
стенки пеналов	стенки гнезда
368.6	354.7

Таблица 3

Средние температуры		
Средняя температура, К		
Вход	Выход	Зазор
300	311.9	342.1

Визуализация линий тока в расчетной области, представлена на рис. 10. В нижней части рассматриваемой области образуется циркуляционное движение.

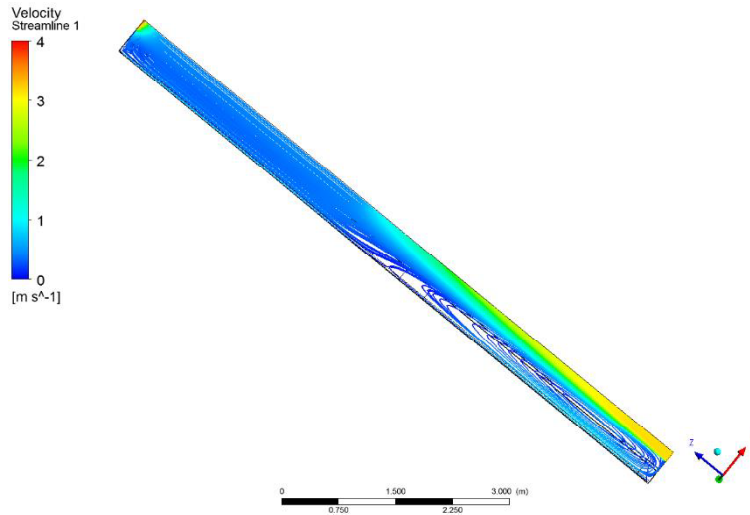


Рис. 10. Линии тока от входа в расчётную область

В табл. 4 полученные в настоящей работе массовые потоки воздуха на входе и выходе.

В работе [11] получен массовый расход воздуха через вытяжные шахты, соответствующий 27 г/с в рассматриваемой задаче.

Таблица 4

Тепловое состояние пучка твэлов

Массовый поток, г/с	
Вход	Выход
34.6	34.6

Рассматривается расчётная область высотой 3800 мм, представленная на рис. 11, которая включает в себя:

- Пучки твэлов.
- Зазоры между пучками твэлов и стенками ампул, в которых они находятся.
- Стенки ампул, моделируемые, как стальные цилиндры диаметром 95 мм с толщиной стенки 2 мм.
- Пространство между ампулами.
- Стенку пенала, моделируемую, как стальной цилиндр диаметром 630 мм и толщиной стенки 7 мм.
- Зазор между гнездом и пеналом.
- Гнездо, моделируемое, как цилиндр диаметром 720 мм и толщиной стенки 7 мм.

С целью сокращения вычислительных затрат, рассматривается симметричный сектор 90°, поперечный срез расчётной области представлен на рис. 12.

Используется модель пучка твэлов, представленная в работе в работе [16], заменяющая ТВС с 18 твэлами на монолитный цилиндр диаметром 55 мм, как показано на рис. 13 и 14.

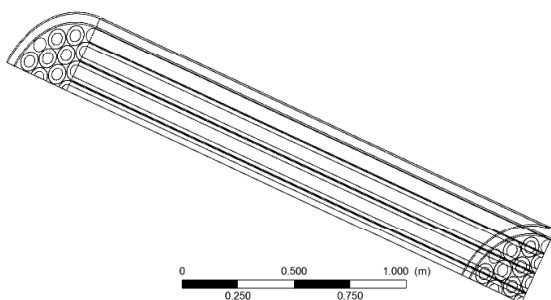


Рис. 11. Расчётная область для определения теплового состояния пучка твэлов

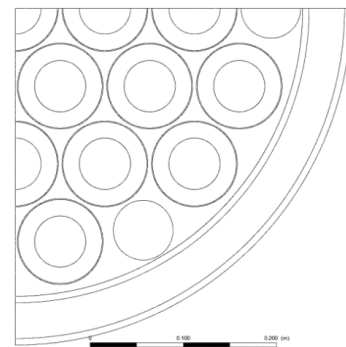


Рис. 12. Поперечный срез расчётной области

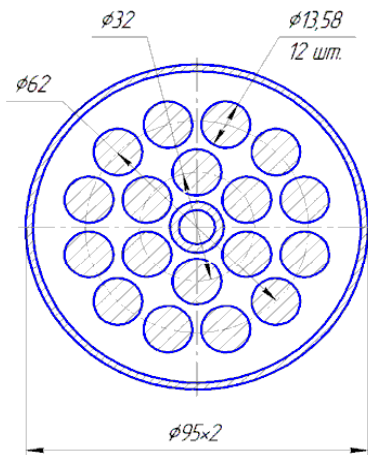


Рис. 13. Ампула с ТВС («эталон»)

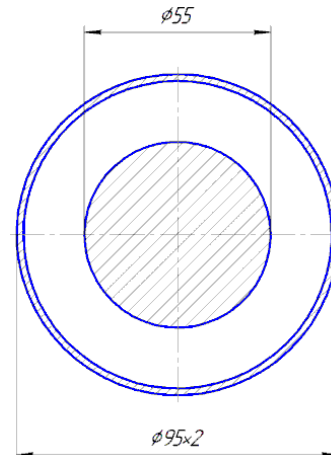


Рис. 14. Тепловой эквивалент ампулы с ТВС («модель»)

В цилиндрах, моделирующих пучки твэлов, задано удельное тепловыделение, равное тепловому потоку при загрузке ОТВС времени выдержки 10 лет, т.е. остаточное энерговыделение одного ПТ составляет 54 Вт, чему соответствует удельное тепловыделение 5760 Вт/м³ [12, 13], что соответствует тепловыделению равному 1653 Вт на один пенал.

Поскольку рассматривается стационарная задача, то выделяемая в пенале тепловая мощность равна отводимой через стенку гнезда:

$$n * q_v * h * \pi * \left(\frac{d_n}{2}\right)^2 = q_{отв} * h * \pi * d_{гнезда}, \quad (4)$$

где q_v – удельно тепловыделение в пучках твэлов, h – высоты расчётной области, d_n – диаметр модели пучка твэлов, $q_{отв}$ – удельный тепловой поток через стенку гнезда, $d_{гнезда}$ – диаметр гнезда.

Таким образом удельный тепловой поток, отводимый через стенку гнезда равен 187.5 Вт/м².

Поскольку заданы только удельное тепловыделение и удельный тепловой поток отводимый через стенку гнезда, то численное решение может сойтись при различных температурах модели пучка твэлов, поскольку в таком случае не зафиксирована температура гнезда хранения, поэтому используется температура стенки гнезда, полученная при численном моделировании теплового состояния гнезда хранения с учётом конвективной теплоотдачи внешнему потоку воздуха.

Таким образом задаётся граничное условие 1-го рода на нижней границе стенки гнезда хранения с температурой стенки, полученной в предыдущем расчёте.

Построена конвергентная сетка с количеством ячеек равным ~ 5 млн. В стенке пенала, зазоре и стенке гнезда построена регулярная сетка, поскольку в межампульном пространстве моделируется конвективное движение гелия, то построена сетка с разрешением 1 мм, со сгущением на стенках ампул до 0.5 мм.

В зазоре между пеналом и гнездом конвекция не моделируется, а конвективный теплоперенос учитывается посредством задания эффективного коэффициента теплопроводности, равного $0.1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$, рассчитанный по эмпирической формуле для эффективного коэффициента теплопроводности в зазоре [14]:

$$l_{эфф} = \varepsilon * l_0 \quad (5)$$

$$\varepsilon = B * (Gr * Pr)^m, \quad (6)$$

где $B=0.105$ и $m=1/3$ для $10^3 < Gr \cdot Pr < 10^6$.

В работе [16] показано, что в зазоре между пучком твэлов и стенкой ампулы число Рэлея $Ra < 10^3$, что означает отсутствие влияния конвекции на тепловую задачу, поэтому в нём задаётся коэффициент теплопроводности равный $0.152 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$, что соответствует гелию. Лучистый теплоперенос рассчитывается посредством модели дискретных ординат, расчёт лучистого теплопереноса производится только между поверхностями: внешняя поверхность пеналов, внутренняя поверхность гнезда, внешняя поверхность пучка твэлов в ампулах, оболочки ам-

пул. Поэтому принято достаточным количество углов θ (theta) и φ (phi) равное 4, поскольку в работе [17] коэффициент поглощения излучения оболочками твэлов равен 0.7, а в работе [15] коэффициент поглощения излучения листовой стали с окалиной равен 0.66, то из консервативных соображений задаём коэффициенты поглощения излучения всех излучающих поверхностей равным 0.65. Конвекция в пространстве между гнездами рассчитывается с использованием k- ω модели турбулентности, выталкивающая сила учитывается согласно модели Бусинеска.

Результаты расчётов теплового состояния пучка твэлов

Пример, полученного температурного поля показан на рис 15. Распределение температуры хоть и носит радиальный характер, но заметны экстремумы температуры в пучках твэлов, поскольку в них присутствует тепловыделение.

Заметно, что в местах нахождения креплений температурный профиль изгибается, поскольку теплопроводность стали значительно выше гелия. По полученным полям температуры видно, что температура растёт соответственно высоте, поскольку к ампулам снизу подходит уже охлаждённый воздух. Максимальная температура достигается в верхней части центрального пучка твэлов, и соответствует 466.3 °К, что не превышает допустимую температуру для хранения твэлов РБМК-1000, составляющую 573 °К.

На рис. 16–17 представлены линии тока, диаграмма на которых показывает модуль скорости. Заметно, что наибольшая скорость движения газа достигается у центрального твэла при подъёмном движении, а опускное движение имеет место у стенки пенала.

Максимальные значения скорости достигаются у центральной ампулы, а соответственно максимальные опускные скорости у стенки пенала.

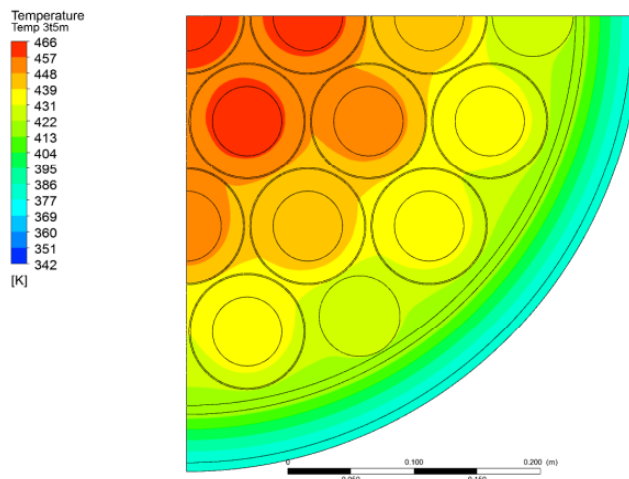


Рис. 15. Распределение температуры в сечении плоскостью XY на высоте 3.5 метра от нижней границы

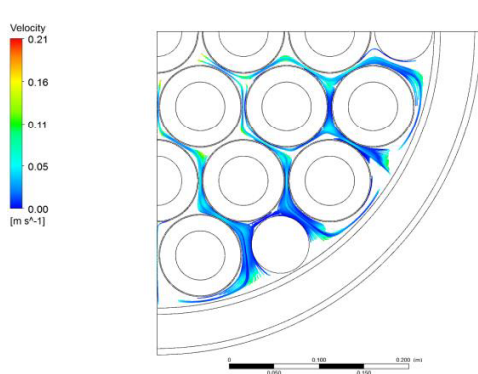


Рис. 16. Лини тока (вид сверху)

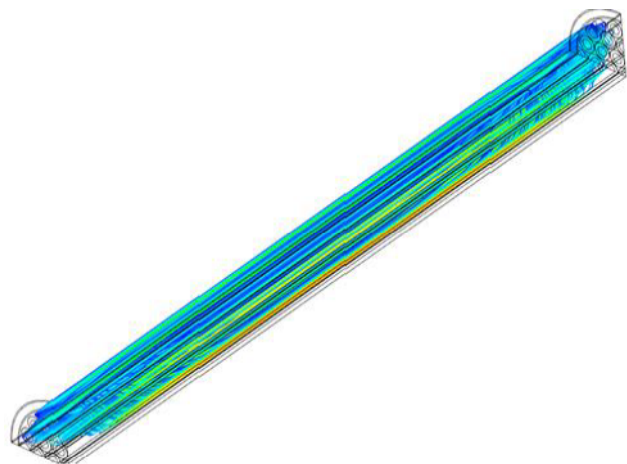


Рис. 17. Лини тока (вид сбоку)

Изменение загрузки

В работе [16] разработана компоновка ПТ в транспортном контейнере ТУК-109, с установкой более тепловыделяющих ПТ около стенки контейнера со снижением тепловыделения у центра. Поэтому следует рассмотреть возможность хранения ПТ меньшей выдержки в пенале хранения при сухом хранении в хранилище камерного типа ХОТ-2. Учитывая соотношение “горячих” ПТ к “холодным” при транспортировке получаем в рассматриваемой задаче 12 “горячих” и 19 “холодных”, как представлено на рис. 18. Рассматриваются ПТ с тепловыделением 62 Вт/ПТ и 49 Вт/ПТ, что соответствует модельному объёмному тепловыделению 6867 Вт/м³ и 5427 Вт/м³, откуда на один пенал приходится 1675 Вт, соответственно, поскольку рассматривается стационарная задача, то выделяемая в пенале тепловая мощность равна отводимой через стенку гнезда:

$$(12 * q_{62} + 19 * q_{49}) * h * \pi * \left(\frac{d_n}{2}\right)^2 = q_{отв} * h * \pi * d_{гнезда}, \quad (9)$$

где q_v – удельно тепловыделение в пучках твэлов, h – высоты расчётной области, d_n – диаметр модели пучка твэлов, $q_{отв}$ – удельный тепловой поток через стенку гнезда, $d_{гнезда}$ – диаметр гнезда.

Таким образом удельный тепловой поток, отводимый через стенку гнезда равен 197.9 Вт/м².

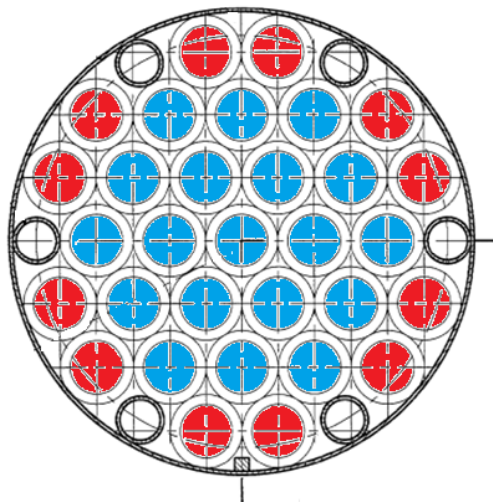


Рис. 18. Распределение “горячих” (красный) и “холодных” (синий) пт по объёму 31 местного пенала

Максимальная температура ОЯТ достигается в верхней части центрального пучка твэлов, и соответствует 463.8 °К, что не превышает допустимую температуру для хранения твэлов РБМК-1000, составляющую 573 °К и при этом ниже на 2.5 °К, чем при равномерном распределении тепловыделений по объёму пенала.

Заключение. Была предложена компоновка ПТ внутри пенала хранения для неравномерно распределённого тепловыделения внутри пенала, а в частности: 12 ампул с тепловыделением 62 Вт/ПТ расположены по периферии, а 19 ампул с тепловыделением 49 Вт/ПТ расположены в центре пенала, что не привело к перегреву, причём наиболее нагретым остался пучок, расположенный в центральной ампуле, но максимальная температура снизилась на 2.5 °С и составила 190.8 °С.

Разработанная компоновка ПТ внутри пенала хранения соответствует требованиям тепловой безопасности при хранения ОЯТ РБМК-1000 в хранилищах сухого типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шаманин И. В., Гаврилов П. М., Беденко С. В., Мартынов В. В. Оптимизация нейтронно-физических характеристик систем хранения отработанного топлива // Известия Томского политехнического университета. 2012. Vol. 320. No. 4.
2. Седнев Д. А. Разработка научно-технических основ акустической идентификации в целях обеспечения режима нераспространения ядерных материалов. Томск: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 2015.
3. ЕЭС России [Электронный ресурс] // Системный оператор Единой энергетической системы: 2017: [сайт]. URL: http://so-ups.ru/index.php?id=tech_disc (дата обращения: 25.05.2017).
4. Скачек М. А. Обращение с отработавшим ядерным топливом и радиоактивными отходами АЭС. Москва: Издательский дом МЭИ, 2007.

5. Михайлович Г. П., Ревенко Ю. А., Меркулов И. А. Горно-химический комбинат – будущий кластер по обращению с ОЯТ // Безопасность Окружающей Среды: Обращение с ОЯТ. 2010. Vol. 1.
6. Калинин В. И. Обоснование метода сухого хранения отработавшего ядерного топлива АЭС с реакторами РБМК-1000 и ВВЭР-1000: Автореф. дис. на соискание учёной степени канд. техн. наук. СПб., 2007. 24 с.
7. Анисимов О. П., Калинин В. И., Шафрова Н. П. Экономика и безопасность длительного хранения ОЯТ. // In: Безопасность ядерных технологий: экономика безопасности и обращение с ИИИ. СПб., 2005.
8. Гаврилов П. М., Сеелев И. Н., Гамза Ю. В., Скурыдина Е. С. Научно-техническая конференция «Команда-2015» // Безопасность и эффективность обращения с оят ру рбmk-1000 на фгуп «ГХК». Санкт-Петербург. 2015. pp. 89-90.
9. Гаврилов П. М., Ревенко Ю. А., Бараков Б. Н., Гамза Ю. В., Федосов Ю. Г., Калинин В. И. Герметичный пенал хранения отработавшего ядерного топлива, 2435239, Nov 27, 2011.
10. Китанина Е. Э., Китанин Э. Л., Коврыжкина Ю. С., Фёдоров А. Г. Численное моделирование свободной и смешанной конвекции при охлаждении пеналов с отработавшим ядерным топливом в сухих хранилищах камерного типа // Труды 4-й РНКТ. 2006. Vol. 3. Свободная конвекция. Тепломассообмен при химических превращениях. P. 121.
11. Крайнов А. Ю., Миньков Л. Л., Сеелев И. Н., Шрагер Э. Р. Численное исследование течения и теплообмена воздуха в камере хранения сухого хранилища оят // Вестник Томского Государственного Университета, No. 47. 2017.
12. Колобашкин В. М., Рубцов П. М., Ружанский П. А., Сидоренко В. Д. Радиационные характеристики облучённого ядерного топлива // Энергоатомиздат, 1983.
13. Стельмах Д. А. П.В.В. Расчёт радиационных характеристик облучённого ядерного топлива реакторов РБМК-1000 и ВВЭР-1000 на основе программного кода ORIGEN-2.1 // Запорожская АЭС.
14. Блинков В. Н., Горбенко Г. А., Костиков А. О. Часть 3. Основы теплопередачи в объектах аэрокосмической техники. // In: Теоретические основы аэрокосмической теплотехники. Конспект лекций. Харьков «ХАИ», 2006.
15. Зигель Р., Хауэлл Д. Теплообмен излучением. М.: Мир, 1975.
16. Кузин В.М. Расчет теплового состояния контейнера при транспортировке отработавшего ядерного топлива: Диссертация на соискание ученой степени магистра. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. СПб., 2016.
17. Астафьева В. О. Моделирование процессов теплообмена и анализ температурного состояния твэлов в период загрузки отработавшего ядерного топлива РБМК в контейнер. Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук, 2006.

REFERENCES

1. Shamanin I. V., Gavrilov P. M., Bedenko S. V., Martynov V. V. Optimizatsiya neitronno-fizicheskikh kharakteristik sistem khraneniya otrabotannogo topliva // Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. 2012. Vol. 320. No. 4.
2. Sednev D. A. Razrabotka nauchno-tekhnicheskikh osnov akusticheskoi identifikatsii v tselyakh obespecheniya rezhima nerasprostraneniya yadernykh materialov. Tomsk: Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk, 2015.
3. EES Rossii [Elektronnyi resurs] // Sistemnyi operator Edinoi energeticheskoi sistemy: 2017: [sait]. URL: http://so-ups.ru/index.php?id=tech_disc (data obrashcheniya: 25.05.2017).
4. Skachek M. A. Obrashchenie s otrabotavim yadernym toplivom i radioaktivnymi otkhodami AES. Moskva: Izdatel'skii dom MEI, 2007.
5. Mikhailovich G. P., Revenko Yu. A., Merkulov I. A. Gorno-khimicheskii kombinat – budushchii klaster po obrashcheniyu s OYaT // Bezopasnost' Okruzhayushchei Sredy: Obrashchenie s OYaT. 2010. Vol. 1.
6. Kalinkin V. I. Obosnovanie metoda sukhogo khraneniya otrabotavshogo yadernogo topliva AES s reaktorami RBMK-1000 i VVER-1000: Avtoref. dis. na soiskanie uchenoi stepeni kand. tekhn. nauk. SPb., 2007. 24 s.
7. Anisimov O. P., Kalinkin V. I., Shafrova N. P. Ekonomika i bezopasnost' dlitel'nogo khraneniya OYaT. // In: Bezopasnost' yadernykh tekhnologii: ekonomika bezopasnosti i obrashchenie s III. SPb. 2005.
8. Gavrilov P.M., Seelev I.N., Gamza Yu.V., Skurydina E.S. Nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Komanda-2015» // Bezopasnost' i Effektivnost' Obrashcheniya S Oyat Ru Rbmk-1000 Na Fgup «GKhK». SPb., 2015. pp. 89-90.
9. Gavrilov P. M., Revenko Yu. A., Barakov B. N., Gamza Yu. V., Fedosov Yu. G., Kalinkin V. I. Germetichnyi penal khraneniya otrabotavshogo yadernogo topliva, 2435239, Nov 27. 2011.
10. Kitanina E. E., Kitanin E. L., Kovryzhkina Yu. C., Fedorov A. G. Chislennoe modelirovanie svobodnoi i smeshannoi konveksii pri okhlazhdenii penalov s otrabotavshim yadernym toplivom v sukhikh khranilishchakh kamernogo tipa // Trudy 4-i RNKT. 2006. Vol. 3. Svobodnaya konveksiya. Teplomassоobmen pri khimicheskikh prevrashcheniyakh. P. 121.
11. Krainov A. Yu., Min'kov L. L., Seelev I. N., Shragер E. R. Chislennoe issledovanie techeniya i teploobmena vozdukha v kamere khraneniya sukhogo khranilishcha oyat // VESTNIK TOMSKOGO GOSUDARSTVENNOGO UNIVERSITETA, No. 47. 2017.
12. Kolobashkin V. M., Rubtsov P. M., Ruzhanskii P. A., Sidorenko V. D. Radiatsionnye kharakteristiki obluchennogo yadernogo topliva // Energoatomizdat, 1983.

13. Stel'makh D. A. P.V.V. Raschet radiatsionnykh kharakteristik obluchennogo yadernogo topliva reaktorov RBMK-1000 i VVER-1000 na osnove programmno koda ORIGEN-2.1 // Zaporozhskaya AES.
14. Blinkov V.N., Gorbenko G.A., Kostikov A.O. Chast' 3. Osnovy teploperedachi v ob"ektakh aerokosmicheskoi tekhniki. // In: Teoreticheskie osnovy aerokosmicheskoi teplotekhniki. Konspekt lektsii. Khar'kov «KhAI», 2006.
15. Zigel' R., Khauell D. Teploobmen izlucheniem. M.: Mir, 1975.
16. Kuzin V. M. Raschet teplovogo sostoyaniya konteynera pri transportirovke otrabotavshogo yadernogo topliva: Dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni magistra. Sankt-Peterburgskii politekhnicheskii universitet Petra Velikogo. SPb., 2016.
17. Astaf'eva V. O. Modelirovanie protsessov teploobmena i analiz temperaturnogo sostoyaniya tvelov v period zagruzki otrabotavshogo yadernogo topliva RBMK v konteyner, Sankt-Peterburgskii gosudarstvennyi politekhnicheskii universitet, dissertatsiya na soiskanie uchenoi stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk, 2006.

ОБ АВТОРАХ

Безюков Олег Константинович, доктор технических наук, профессор кафедры Теории и конструкции судовых двигателей внутреннего сгорания ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова». 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, Тел.: +7 9213228955, E-mail: okb-nayka@yandex.ru, kaf_sdvs@gumrf.ru

Bezyukov Oleg Konstantinovich, Dr. of Technical Sciences, professor of the Department of Theory and Construction of Marine Internal Combustion Engines, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya str, Saint-Petersburg, Russia, 198035. Phone: +7 9213228955, E-mail: okb-nayka@yandex.ru, kaf_sdvs@gumrf.ru

Афанасьев Павел Михайлович, аспирант кафедры Теории и конструкции судовых двигателей внутреннего сгорания. ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова», 198035, г. Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7. Тел.: +7 9217416659, paulafanasiev@gmail.com
Afanasyev Pavel Mikhaylovich, post-graduate student of the Department of Theory and Construction of Marine Internal Combustion Engines, Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping, 5/7, Dvinskaya str, Saint-Petersburg, Russia, 198035. Phone: +7 9217416659, paulafanasiev@gmail.com

Дата поступления в редакцию 10.06.2018