

## Задачи МИФ

### Задача №1 от представителей АО НИФХИ им. Карпова

При эксплуатации АЭС и ИЯУ образуются различные радиоактивные вещества, которые выбрасываются в атмосферу. Наибольший вклад (более 50%) в активность таких выбросов вносят радиоактивные благородные газы (РБГ), например,  $^{133}\text{Xe}$ ,  $^{135}\text{Xe}$  и  $^{85}\text{Kr}$ . Рассмотрите способы снижения активности РБГ или их комбинации и предложите наиболее эффективный.

### Задача №2 от представителей НПО «Тайфун»

Метод конечных разностей позволяет получать решения дифференциальных уравнений в виде некоторых одно- или многомерных массивов. Для уменьшения погрешности аппроксимации и возможного преодоления численной неустойчивости могут быть использованы численные фильтры, сглаживающие осцилляции решения.

Дана начально-краевая задача, описывающая одномерное движение вязкой несжимаемой жидкости

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} = \nu \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$$

$$u(0, t) = a, u(1, t) = b, u(x, 0) = U_0(x)$$

Здесь  $\nu, a, b$  – постоянные.

Рассмотрим фильтр, преобразующий компоненты  $u_i$  некоторого одномерного массива:

$$\bar{u}_i = u_i + \frac{1}{2} s (u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}), 0 \leq s \leq 1$$

Выполнить следующие пункты:

- 1) Написать программу для численного решения данной задачи методом конечных разностей. Получить решение с использованием указанного фильтра (варьируя значение параметра  $s$ ) и без его использования.
- 2) Получить аналитическое решение данной задачи при  $U_0(x) = 0$ . Сравнить с ним численные решения, полученные в 1-ом пункте для того же  $U_0(x)$ .
- 3) Варьируя значение параметра  $s$  в ходе численных экспериментов, исследовать влияние фильтра на устойчивость численного решения.
- 4) Предложить возможные модификации фильтра, улучшающие его свойства.

### Задача №3 от представителей НПО «Тайфун»

Многие эволюционные дифференциальные уравнения, используемые в задачах математической физики, имеют вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = Lu + Nu(1)$$

где  $L$  и  $N$  – дифференциальные операторы с частными производными. При этом оператор  $L$  является линейным и выбирается так, что уравнение:

$$\frac{\partial u^i}{\partial t} = Lu^i(2)$$

при некоторых начальных и граничных условиях может быть решено аналитически. Оператор  $N$  при этом, вообще говоря, нелинейный.

Для повышения точности решения задачи для уравнения (1) предполагается следующий численно-аналитический подход. Решение представляется в виде:

$$u = u^i + u'$$

где  $u^i$  - решение задачи (2), которое может быть получено аналитически (при тех же условиях),  $u'$  - решение задачи с оператором  $N$ :

$$\frac{\partial u'}{\partial t} = Nu'$$

Выполнить следующие пункты:

- 1) Написать программу для реализации применения описанного численно-аналитического подхода к решению задачи Коши, описывающей динамику жидкости со свободной поверхностью

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial h}{\partial x} = 0 \quad \frac{\partial h}{\partial t} + u \frac{\partial h}{\partial x} + (h_0 + h) \frac{\partial u}{\partial x} = 0$$

$$h(x, 0) = \cos(x)u(x, 0) = \sqrt{\frac{g}{h_0}} h(x, 0)g, h_0 = const$$

- 2) Получить численное решение данной задачи методом конечных разностей. Сравнить это решение с численно-аналитическим решением, полученным в предыдущем пункте.
- 3) Предложить возможные общие (не зависящие от конкретных операторов  $L, N$  в задаче (1)) оценки сходимости, аппроксимации и устойчивости описанного численно-аналитического метода.

### Задача №4 из кейс чемпионата АО «ГНЦ РФ — ФЭИ»

**2022**

## **Использование торий — уранового ядерного топлива в реакторе типа ВВЭР — 1000**

Разработка режима работы реактора типа ВВЭР 1000 с топливом U233 в ториевой матрице и сопоставление с традиционным режимом на основе обогащенного природного урана.

Требуется:

- создать модель тепловыделяющей сборки в программном комплексе, осуществляющим расчеты методом Монте-Карло;
- сделать расчет различных видов топлива, подобрать обогащение;
- определить изменения изотопного состава;
- провести анализ полученных результатов.

Результат

- разработана модель ТВС ВВЭР-1000;
- проведены расчеты ЭКР, состава выгруженного топлива, одногрупповых сечений взаимодействия нейтронов с изотопами тория, урана, плутония и малых актинидов;
- проведен сопоставительный анализ полученные данные с традиционным режимом работы.

## **Задача №5 от представителей ИАТЭ НИЯУ МИФИ Пеленгация**

Точное позиционирование управляемых электронных устройств в пространстве является актуальной задачей в современном мире. Для выполнения исследовательской задачи предлагаем прибегнуть к спортивной радиопеленгации. Необходимо составить систему из двух автономных радиоуправляемых машин, с алгоритмом поиска передатчика каждой из машин. Характеристики предлагаемой площадки для эксперимента:

1. Площадка движения роботов размером 4x5 м.
2. Габариты машин не более чем 15x15x15 м.
3. Машины могут как передвигаться по площадке, так и летать в её границах.
4. Скорость машин ограничена 0.5км/ч.
5. Количество передатчиков – 2.

Для победы необходимо касание каждой из машин, каждого передатчика, чем быстрее и оптимальнее будет построено определение в пространстве, тем лучше механизм поиска. Определить наилучший механизм при условии, что роботы могут общаться только между собой.

При решении задачи, может быть, как поставлен эксперимент, так и представлен пример функционирующего кода для описания движения роботов с подробным пояснением.

## **Задача №6 Оптимизация стержневого витога ТВЭЛа РУ АС ММ**

В настоящее время мировые ядерные поставщики электрической энергии совместно с академическими структурами проводят НИОКР, направленные на создание атомных станций малой мощности (АС ММ, в иностранной литературе - SMR's (Small Modular Reactors)). Одним из центральных элементов конструкции реакторной установки (РУ) АС ММ, требующих проработки, являются тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы). Разработка ТВЭЛов с повышенным ресурсом эксплуатации, высокой загрузкой ядерного топлива и маневренностью при переходных режимах является актуальной задачей при создании проектов автономных (необслуживаемых) РУ АС ММ, поскольку эти характеристики напрямую связаны с высокой экономической эффективностью и конкурентоспособностью [1].

Одним из наиболее эффективных способов достижения цели является создание металлических закрученных ТВЭЛов с топливными композициями на основе урана или сплавами на его основе обогащением менее 20 % по изотопу  $^{235}\text{U}$  [2]. Максимальные температуры ТВЭЛов должны быть относительно низкими (до 350 - 400 °С) для обеспечения пределов безопасной эксплуатации РУ АС ММ и снижения интенсивности массообмена. Первый из них обеспечивается высокой теплопроводностью компонентов ТВЭЛов. Второе условие накладывает ограничение из-за твердофазной диффузии компонентов топлива в оболочку и интерметаллических переходов урана, которые приводят к перегреву топлива.

Значительный успех достигнут при использовании ТВЭЛА крестообразного профиля, который уже используется в российском исследовательском реакторе СМ-3 более 50 лет. Козлов А.В. предложил метод оптимизации поперечного сечения крестообразного ТВЭЛА за счет варьирования радиусов выпуклостей и впадин [3]. Однако это исследование ограничено лишь 4-х лопастной формой профиля. НИОКР корпорации Лайтбридж сосредоточены на разработке металлического ТВЭЛА с U-Zr сплавом треугольного и крестообразного поперечного сечений [4]. Сведения о принципе выбора размеров поперечного сечения ТВЭЛА в открытом доступе отсутствуют. Российскими учеными также рассмотрены подходы к созданию оптимального стержневого ТВЭЛА с различной формой профиля (крест, треугольник, «бубновый туз»), однако решения получены лишь для конкретных вариантов и наполнены эмпирическими параметрами [5].

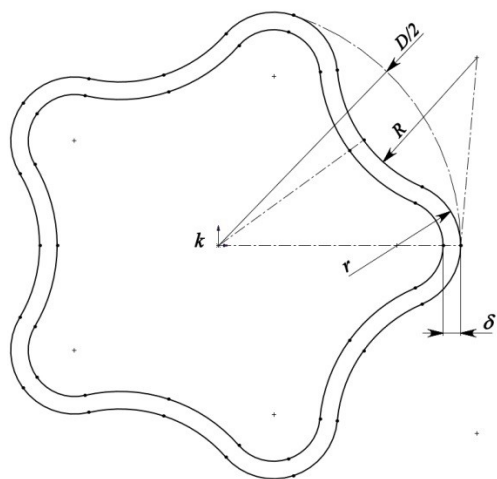


Рисунок – Схема поперечного сечения пятилопастного твэла

Предложите метод оптимизации закрученных стержневых твэлов сложной формы с точки зрения геометрии и тепловых параметров. В первом приближении примите, что параметры теплоносителя на наружной поверхности оболочки для всех вариантов конструкции твэла АС ММ идентичны. Исходными данными для разработки конструкции являются диаметр описанной окружности ( $D$ ), количество лопастей ( $k$ ), радиусы скруглений ( $r$ ) и впадин ( $R$ ), толщина оболочки ( $\delta$ ). Помимо анализа геометрических параметров твэла,

рассмотрите различные материалы топливной композиции (диоксид, дисилицид, мононитрид, карбид и карбонитрид урана –  $UO_2$ ,  $U_3Si_2$ ,  $UN$ ,  $UC$ ,  $U_{0,9}Zr_{0,1}(CN)_{0,5}$  соответственно) и оболочки (циркониевые сплавы, нержавеющие стали).

[1] Daniel T. Ingersoll Mario D. Carelli. Handbook of Small Modular Nuclear Reactors 1st Edition. Woodhead Publishing, 2014

[2] J. Malone, A. Totemeier N.Shapiro, S. Vaidyanathan. Lightbridge Corporation's Advanced Metallic Fuel For Light Water Reactors. Nuclear Technology, v.180, Dec. 2012

[3] Козлов А.В. Разработка усовершенствованного дисперсионного твэла для высокопоточного реактора СМ. Дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. Москва, 2016 г. – 140 с. (in Russian)

[4] J. Malone, A. Totemeier, N. Shapiro, S. Vaidyanathan. Lightbridge Corporation's advanced metallic fuel for light water reactors. Nuclear Technology. v. 180. Dec.2012

[5] Федосеев В.Е., Цыканов В.А., Старков В.А. Совершенствование конструкции крестообразного твэла для повышения его теплотехнических характеристик. Журн. Атомная энергия, т.98, вып.4, 2005.

## **Задача №7 Моделирование теплового и НДС состояний инновационного твэла ВВЭР-1000**

В нормальных условиях эксплуатации (НУЭ) стержневой инновационный твэл легководного реактора ВВЭР-1000 с топливным сердечником из волокон урана в матрице из сплава Э110 омывается турбулентным потоком воды. Волокна одинакового диаметра равномерно распределяются в топливной матрице. При аварии с потерей теплоносителя (ЛОСА) для предотвращения деградиационных процессов и выхода наработанных радиоактивных продуктов деления в активную зону подается

вода из системы аварийного охлаждения зоны (САОЗ), назначение которой – обеспечение необходимого теплоотвода для компенсации мощности остаточного энерговыделения и пароциркониевой реакции.

Исходные параметры геометрии и работы твэла соответствуют наиболее нагруженному твэлу реактора ВВЭР-1000. Количество волокон выбирается таким образом, чтобы ураноемкость предложенного твэла соответствовала твэлу ВВЭР-1000. Обогащение урана изотопом  $^{235}\text{U}$  – 5 %. Диаметр волокон может быть варьируем от 30 до 180 мкм.

Концевыми элементами твэла (газосборник, компенсационная пружина, тоцевые концевики) пренебречь.

1. Предложите подход для моделирования эксплуатационных параметров твэла при НУЭ и аварии ЛОСА.
2. Предложите подход для снижения взаимодействия элементов твэла с окислительными средами.
3. Рассмотрите гетерогенную структуру топливного сердечника твэла и оцените условия, при которых приемлемо проводить замещение на гомогенную структуру.
4. Каким образом будут изменяться характеристики твэла с различной формой топливных частиц (эллипсы, правильные многоугольники)?
5. Оцените тепловые параметры инновационного твэла при НУЭ (максимальную температуру сердечника, тепловой поток на поверхности оболочки)

### **Задача №8 от представителей ИАТЭ НИЯУ МИФИ**

В состав аппаратуры контроля нейтронного потока реактора ВВЭР-1000 входит 64 канала нейтронных измерений (КНИ), каждый из которых состоит из 7 детекторов прямого заряда (ДПЗ), распределённых равномерно по высоте активной зоны (АЗ). Таким образом, состояние АЗ в терминах нейтронного потока описывается матрицей  $64 \times 7$ . Известно, что при снижении размерности с помощью метода главных компонент, каждая из них может быть интерпретирована как одна из характеристик реактора. Например, первая (наибольшая) описывает мощность установки. Остальные – неравномерность распределения поля по высоте и распределение нейтронного потока по высотным уровням. Необходимо определить такую конфигурацию параметров (возможно меньшего их количества), которая бы позволяла однозначно определять факт ввода ОР СУЗ и его расположение (номер).

