

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЯДЕРНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ «МИФИ»

ОТЧЕТ
О ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЫ В РАМКАХ ПОДГОТОВКИ ВКР

Выполнил

студент группы С19-103 Мамлеев А.А.

Научный руководитель

кандидат технических наук Куценко К.В.

Оценка:

Москва 2023

1 Введение, актуальность

Естественная конвекция уже довольно продолжительное время исследуется как теоретическими, так и аналитическими методами. С развитием информационных технологий для решений данного класса теплофизических задач стали также активно применять численные методы. В данной работе будет рассмотрена задача оптимизации теплообмена с двух расположенных друг над другом ТВЭЛов путем выбора оптимального расстояния между ними. Данная задача имеет не только большой исследовательский интерес, но и большую практическую значимость. Путем выбора наиболее оптимальной геометрии относительного расположения теплоотдающих поверхностей можно одновременно повысить коэффициент теплоотдачи и увеличить удельное тепловыделение (тепловыделение в единице объема).

2 Постановка задачи

Имеются два горизонтальных ТВЭЛа одинакового диаметра d и мощности, расположенных друг над другом (рис. 1). Необходимо определить, на каком расстоянии s наиболее оптимально располагать верхний ТВЭЛ относительно нижнего для интенсификации теплообмена. Задача рассматривается в двухмерной геометрии. Пространство под нижним ТВЭЛОм не ограничено (бездонный сосуд), пространство справа и слева от ТВЭЛов также не ограничено (бесконечно удаленные стенки), расстояние от верхнего ТВЭЛа до верхней границы h конечно. Изучение влияния данного расстояния на расчетные поля также входит в рассматриваемую задачу.

В численной постановке ширина W и высота H области конечны (рис. 2), их значения выбираются достаточно большими для того, чтобы минимизировать эффекты связанные с ограниченностью области решения задачи.

2.1 Граничные условия

Верхняя граница в физической постановке соответствует свободной поверхности жидкости. Для имитации свободной поверхности жидкости в численной модели выбрано граничное условие *скольжения* для скорости. Выбор граничных условий также усложнен наличием в численной модели отсутствующих в физической постановке границ: нижней и боковых. Граничные условия на этих границах должны сделать границы «прозрачными», «свободными». В таблице 1 приведены граничные условия для скорости, давления и температуры. Отдельно стоит отметить условие давления на верхней границы: на ней выбрано сложное граничное условие — решатель автоматически подбирает величину градиента давления для того, чтобы поток вещества через поверхность был равен нулю.

Таблица 1. Граничные условия

Граница (рис. 2)	Скорость u	Температура T	Давление $p = p_{\text{абс}} - \rho g z$
Поверхности ТВЭЛов	Первое краевое: $u = 0$	Второе краевое: $-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = q_0$	Второе краевое: $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$
Верхняя граница BC	Первое краевое: $u_n = 0$	Первое краевое: $T = T_0$	Второе краевое: $\frac{\partial p}{\partial n} = f(u)$
Нижняя граница AD	Второе краевое: $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$	Второе краевое: $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$	Второе краевое: $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$
Боковые границы AB, CD	Второе краевое: $\frac{\partial u}{\partial n} = 0$	Второе краевое: $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$	Второе краевое: $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$

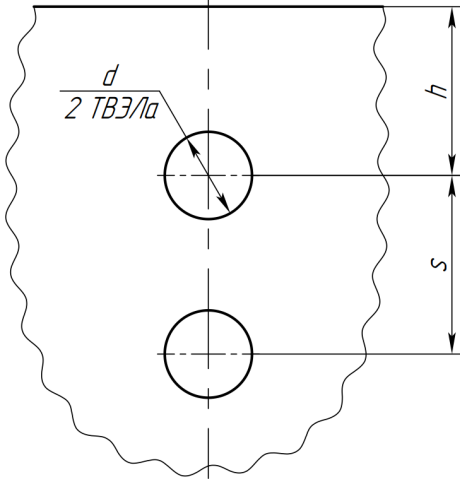


Рис. 1. Геометрия задачи

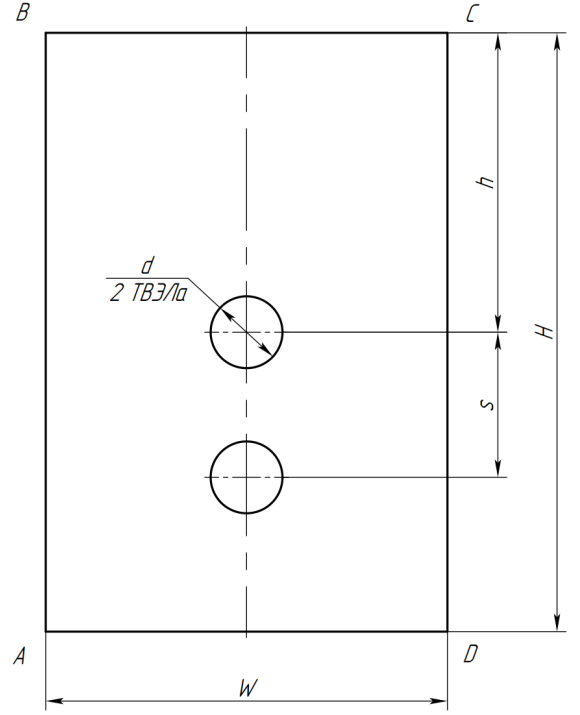


Рис. 2. Геометрия для численного моделирования

3 Методика решения

Предполагается, что помещать верхний ТВЭЛ над нижним следует в той точке, где в отсутствие верхнего ТВЭЛа достигается максимум скорости восходящего потока от нижнего. Для этого решается вспомогательная задача с *одним ТВЭЛом*, в остальном, геометрия и краевые условия остаются прежними. Во вспомогательной задаче исследуется профиль скорости над ТВЭЛом в зависимости от мощности энерговыделения и расстояния от верхней границы, проверяется возможность построения универсального профиля скорости.

В качестве *инструмента* для построения численного решения применяется открытый некоммерческий набор решателей «*CFD OpenFOAM*». Для построения расчетной сетки и просмотра рассчитанных полей применяются также открытые программные продукты: «*SALOME*» и «*ParaView*» соответственно.

3.1 Система уравнений

Задача решается в приближении Буссинеска [1]:

$$\begin{cases} \rho \left(\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} \right) = -\nabla p + \mu \Delta \vec{u} + \rho(T) \vec{g}, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) T = a \Delta T, \\ \nabla \vec{u} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где \vec{u} — скорость течения, T — абсолютная температура, p — давление, μ — динамическая вязкость, a — коэффициент температуропроводности, \vec{g} — ускорение свободного падения.

Для зависимости плотности жидкости от температуры будет применяться линейная

аппроксимация:

$$\rho(T) = \rho_0(1 - \beta\theta), \quad (2)$$

где β — коэффициент объемного расширения, $\theta = T - T_0$ — отклонения температуры от равновесного состояния, ρ_0 — плотность жидкости при равновесной температуре T_0 .

Нас будет интересовать стационарное решение задачи ($\frac{\partial}{\partial t} = 0$), с учетом (2) система уравнений (1) преобразуется к виду:

$$\begin{cases} (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = \frac{\nabla p}{\rho_0} + \nu \Delta \vec{u} - \beta \theta \vec{g}, \\ (\vec{u} \cdot \nabla) \theta = a \Delta \theta, \\ \nabla \vec{u} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где $\nu = \frac{\mu}{\rho_0}$ — кинематическая вязкость. В совокупности с граничными условиями (табл. 1) система уравнений (3) однозначно разрешаемую краевую задачу. Для разрешения данной задачи используется решатель «*buoyantBoussinesqPimpleFoam*» [2].

4 Прodelанная работа

Для параметров задачи $d = 16$ мм, $h = 0.2$ м, $H = 0.3$ м были построены профили скоростей (проекция скорости на вертикальную ось) для плотностей энерговыделения $q = 1, 10, 100$ Вт/м² (рис. 3). Параметры жидкости брались для воды при нормальном атмосферном давлении и температуре 20 °C: $\lambda = 0.60$ Вт/(м · K), $\beta = 1.82 \cdot 10^{-4}$ K⁻¹, $Pr = 7.02$, $\nu = 1.00 \cdot 10^{-6}$ м²/с.

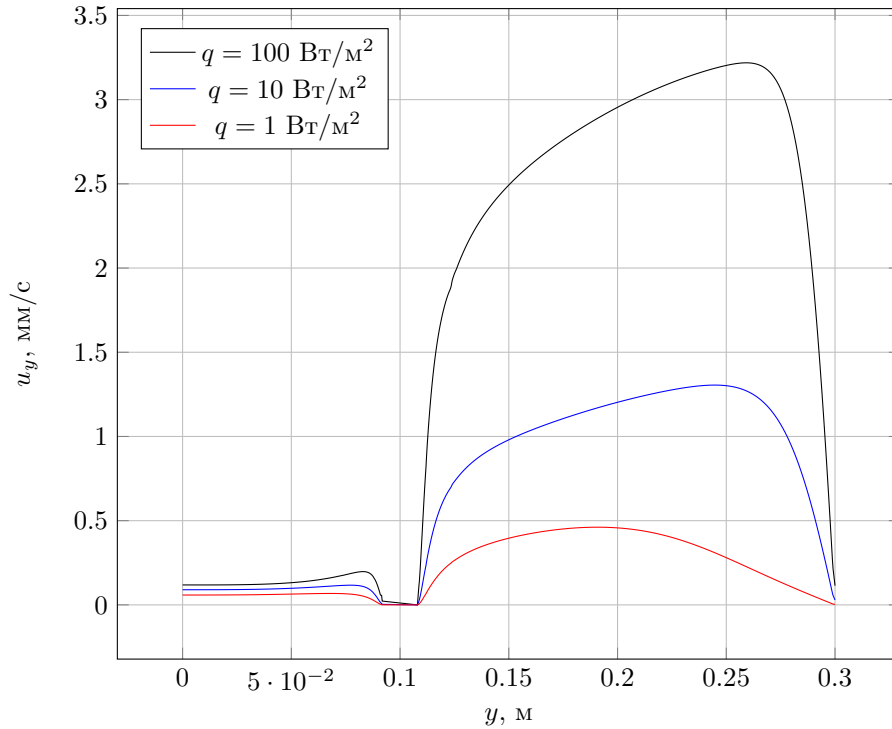


Рис. 3. График зависимости проекции скорости u_y от вертикальной координаты y на оси симметрии

5 Планы дальнейшей работы

Дальнейшая работа сводится к сравнению расчета с экспериментальными данными, для чего необходимо автоматизировать расчет числа Нуссельта, а также провести расчет при параметрах, соответствующих экспериментальным. Также необходимо обезразмерить результаты численного моделирования и перейти к решению основной задачи с двумя ТВЭЛами.

6 Заключение

На данный этап проделано большое количество вспомогательной работы, касающейся подготовки ПО для решения поставленной задачи; были получены первые расчетные профили скорости. Достоверность результатов на данный момент остается непроверенной, что является заделом для дальнейшей работы.

Список литературы

- [1] Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. – Учеб. для вузов. – Изд. 6-е, перераб. и доп. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. –840 с.
- [2] OpenFOAM: API Guide. URL: <https://www.openfoam.com/documentation/guides/latest/api/>