Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования

КАЗАНСКИЙ (ПРИВОЛЖСКИЙ) ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Институт математики и механики им. Н. И. Лобачевского

Направление: 01.04.03 – Механика и математическое моделирование

ОТЧЕТ ПО ОЗНАКОМИТЕЛЬНОЙ ПРАКТИКЕ

Обучающийся	Закиев Ислам Ильнурович	5-411	________________
	(ФИО студента)	(Группа)	(Подпись)

Руководитель практики

от кафедры проф., д.ф-м.н каф. аэрогидромеханики, Маклаков Д. В.

(Должность, ФИО)

Оценка за практику ______________________________ ___________________

(Подпись)

Дата сдачи отчета _________________

Казань – 2025

Руководитель практики от Университета

<u>проф., д.ф-м.н каф. аэрогидромеханики,</u> ____________________ <u>Маклаков Д. В.</u>

(должность, ученое звание) (подпись) (ФИО)

С индивидуальным заданием (календарным планом(графиком)), с программой практики по соответствующему практике направлению подготовки (специальности) ОЗНАКОМЛЕН(А)

____ <u>Закиев И.И.</u>

(подпись) (ФИО обучающегося)

Оглавление

1. Введение

В данной работе исследуется влияние частиц на поле течения при различных значениях числа Стокса. Понимание динамики потоков, содержащих частицы, имеет важное значение в различных областях науки и техники, таких как химическая инженерия, аэродинамика и экология. Число Стокса (St) является ключевым параметром, характеризующим инерцию частицы в потоке. Оно определяется как отношение времени релаксации частицы к характерному времени потока и позволяет оценить, насколько быстро частица реагирует на изменения в потоке. При малых значениях St частица быстро адаптируется к изменениям скорости потока, тогда как при больших значениях St частица обладает значительной инерцией и медленнее реагирует на изменения в потоке. Таким образом, число Стокса играет важную роль в определении траектории частицы и её влияния на поле течения.

На данный момент, цель данного исследования — изучить, как частицы с различными значениями числа Стокса влияют на структуру потока и построить поле массовых сил. Для этого будут использованы уравнения движения частицы, которые описывают её траекторию в потоке. Эти уравнения учитывают разницу между скоростью частицы и скоростью потока, а также инерцию частицы, выраженную через число Стокса. Решение данных уравнений позволит определить, как частицы будут двигаться в потоке и как их присутствие будет влиять на распределение скоростей и давления жидкости.

Для достижения поставленной цели будет использоваться численный метод Рунге-Кутта. Метод Рунге-Кутта является одним из наиболее точных и широко используемых методов численного интегрирования дифференциальных уравнений. Численное моделирование будет проведено для различных значений числа Стокса, что позволит проанализировать влияние частиц на поле течения в широком диапазоне условий.

В результате проведенного исследования будут получены данные о траекториях частиц и изменениях в структуре потока при различных значениях числа Стокса. Эти данные позволят сделать выводы о влиянии частиц на поле течения и предложить рекомендации для оптимизации процессов, связанных с многофазными потоками. Результаты данного исследования могут найти применение в различных областях, таких как химическая инженерия, аэродинамика, экология и другие, где важную роль играют процессы взаимодействия частиц и потоков.

2. Постановка задачи Стокса

Рассмотрим двумерное течение несжимаемой вязкой жидкости в периодической ячейке рис. 1, со сторонами H и L, с непроницаемым твердым телом радиуса r_0 при малых числах Рейнольдса.

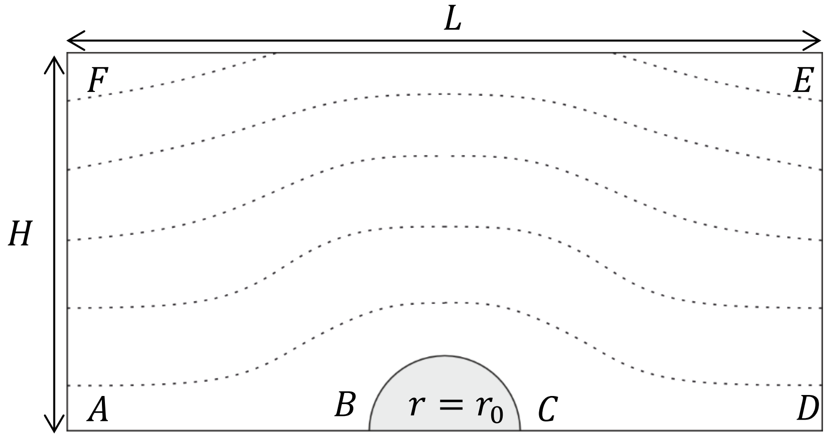

Рис. 1 Периодическая ячейка

В силу невысокой скорости и малого числа Рейнольдса, течение можно будет описать с помощью моделя Стокса, для которой функция тока ψ удовлетворяет уравнению

$$\Delta^2\psi = 0.$$

На нижней и верхней границе AB, CD и FE задается условие симметрии и, при помощи функции тока ψ, расход в данном контуре:

$$AB, CD: \psi = 0, \omega = -\Delta\psi = 0,$$

$$FE: \psi = 1, \omega = -\Delta\psi = 0.$$

На вертикальных границах AF и ED задается условие периодичности:

$$AF, ED: \frac{\partial\psi}{\partial n} = 0, \frac{\partial\omega}{\partial n} = 0.$$

На поверхности твердого тела будет выполняться условие прилипания:

$$BC: \frac{\partial\psi}{\partial n} = 0, \frac{\partial\omega}{\partial n} = 0,$$

где n −внешняя нормаль.

Безразмерные параметры H и L необходимо подбирать таким образом, чтобы поле течение в области левой границе являлось ламинарным.

3. Постановка задачи движения инерционных частиц

3.1. Уравнение движения частиц

В рамках задачи Стокса сила сопротивления частицы определяется следующим образом:

$$\vec{F} = 3\pi\mu(\vec{V} - \vec{U})d,$$

где $\mu -$ динамическая вязкость среды, $\vec{V}$ −скорость частицы, $\vec{U} -$ скорость потока жидкости, $d -$ диаметр частицы.

Уравнение движения частицы записывается через второй закон Ньютона:

$$m\frac{d\vec{V}}{dt} = 3\pi\mu(\vec{V} - \vec{U})d,$$

где m −масса частицы.

После обезразмеривания уравнений на высоту области H и среднюю скорость потока U_0 получаем следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \dfrac{d\vec{v}}{dt} = \dfrac{\vec{u} - \vec{v}}{St} \\ \dfrac{d\vec{x}}{dt} = \vec{v} \end{cases}$$

где $\vec{x} -$ безразмерные координаты частицы, $\vec{u} -$ безразмерная скорость потока газа, $\vec{v} -$ безразмерная скорость частицы, $St = \frac{\tau U_0}{H} -$ число Стокса, характеризующее инерцию частицы, $\tau = \frac{m}{3\pi\mu d}$ −время релаксации частицы.

3.2. Условие захвата частиц

Частица считается захваченной фильтром, если она соприкасается с любым волокном. Условие захвата частиц можно записать следующим образом:

$$|\vec{x} - \vec{x}_a| \leq \frac{d + d_a}{2},$$

где $\vec{x}$ – координаты частицы, $\vec{x}_a$ – координаты центра волокна, d – диаметр частиц, d_a – диаметр волокна

3.3.Метод решения

Для решения уравнений движения частиц используется метод Рунге-Кутты-Вернера 5(6)-го порядка точности. Этот метод позволяет автоматически подбирать шаг интегрирования, что ускоряет расчеты и повышает их точность. Метод Рунге-Кутты-Вернера является адаптивным, что позволяет ему динамически изменять шаг интегрирования в зависимости от сложности задачи, обеспечивая высокую точность при минимальных вычислительных затратах.

4. Результаты

В результате численного моделирования будут получены траектории частиц и определена эффективность их осаждения в зависимости от числа Стокса. На рис. 2-4 представлены траектории частиц для трех различных чисел Стокса. Безразмерные параметры H и L взяты 2 и 10 соответственно, количество частиц $N = 50$.

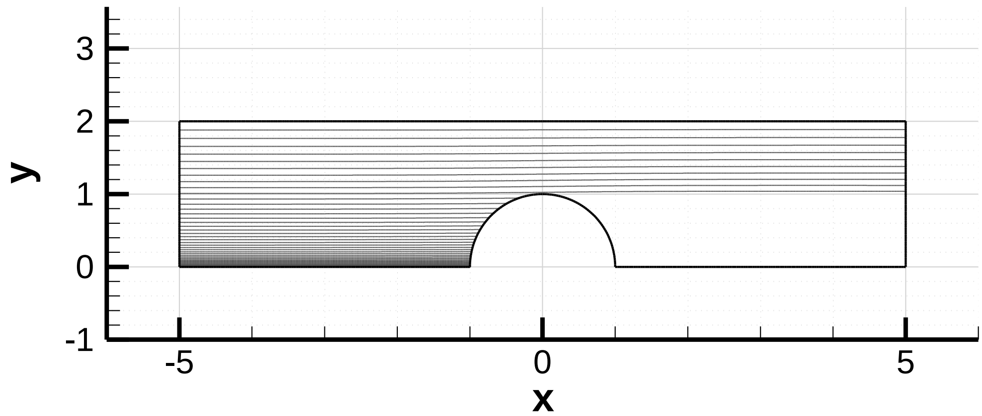

Рис. 2 Траектории частиц при N=50, St = 100

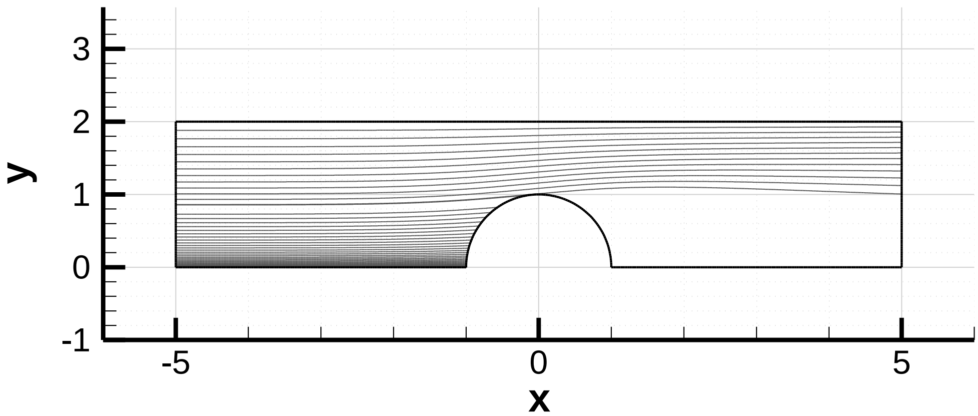

Рис. 3 Траектории частиц при N=50, St = 10

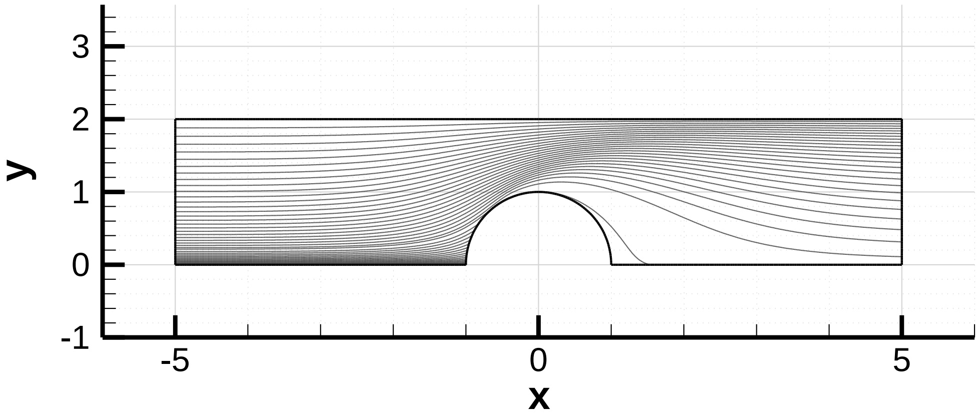

Рис. 4 Траектории частиц при N=50, St = 1

Эффективность осаждения $E(St)$ определяется как отношение количества осажденных частиц $T(St)$ к общему количеству частиц M:

$$E(St) = \frac{T(St)}{M}.$$

Результаты эффективности улавливания частиц можно наблюдать на рис. 5.

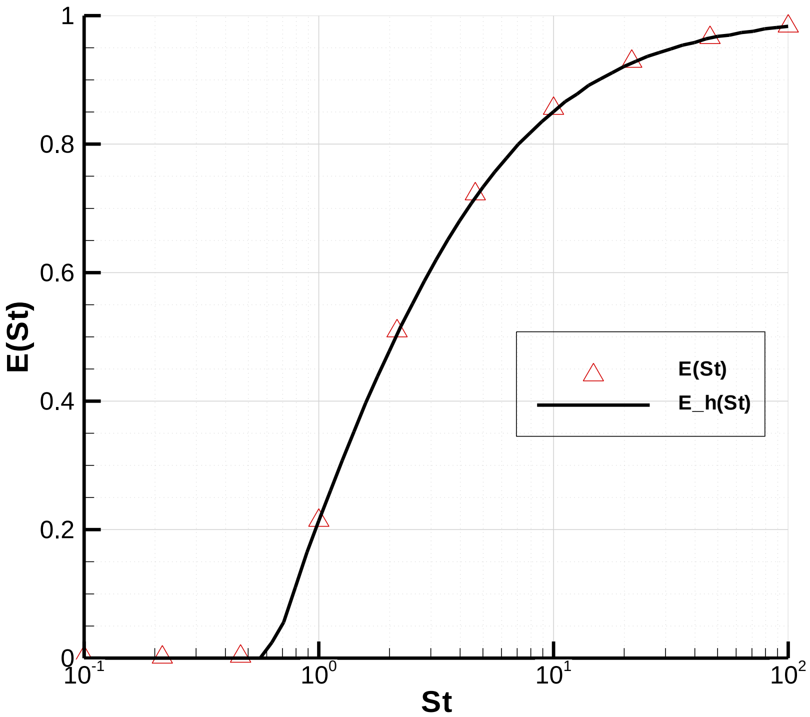

Рис. 5 Эффективность улавливания частиц в зависимости от числа Стокса. $E(St)$ –наше решение, $E\_h(St)$ – решение, представленное в статье [1]

5. Список литературы

[1] Эффективность уравнения инерционных аэрозольных частиц в периодической ячейке с пористым цилиндром / А.Р. Хазиев, Ш.Х. Зарипов, Р.Ф. Марданов, А..Г. Пилюгин // Ученые записи Казанского Университета. Серия физико-математических наук – 2022. – Vol. 13. – Pp 1-13.