

## Проект: «Математическое моделирование распространения выбросов автотранспорта в уличном каньоне»

Старченко Александр Васильевич, Данилкин Евгений Александрович, Каратаева Екатерина Алексеевна, Дель Ирина Васильевна, Юмин Кирилл Викторович, Лещинский Дмитрий Викторович, Смиян Никита Сергеевич

*Данная заметка, подготовленная в научно-популярной форме, расскажет о работе над проектом «Математическое моделирование распространения выбросов автотранспорта в уличном каньоне» в рамках Большой математической мастерской 2022.*

### Введение

В рамках выполнения проекта участники занимались моделированием распространения выбросов автотранспорта в уличном каньоне. Уличный каньон представляет собой протяженный участок улицы с параллельно расположенными высокими зданиями с обеих ее сторон.

Работа над проектом включала получение навыков работы с моделью M2U, развиваемой в Томском государственном университете. Программный комплекс M2U используется для моделирования движения воздуха и переноса примеси в уличных каньонах и городских кварталах. Основные усилия были сосредоточены на проведении параметрических расчетов и выявлении неблагоприятных сценариев проветривания уличных каньонов.

### Физико-математическая постановка задачи

Рассматривается стационарное изотермическое турбулентное движение воздуха в уличном каньоне (см. рисунок 1). По дороге между зданиями интенсивно движется автотранспорт, выбрасывающий в атмосферу продукты сгорания углеводородного топлива. Высота зданий ( $H$ ) соизмерима с шириной улицы ( $W$ ). Примесь считается химически инертной и не осаждается на образующих уличного каньона.

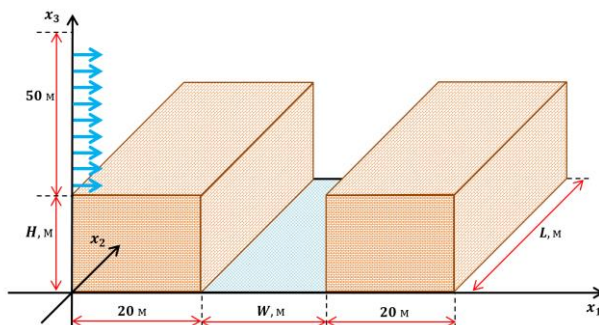


Рисунок 1 – Иллюстрация физической постановки задачи

Математическая модель, реализованная в программном комплексе M2U, включает в себя осредненные по Рейнольдсу уравнения неразрывности, Навье-Стокса и переноса примеси. Замыкание системы уравнений проводится с использованием градиентно-диффузионной гипотезы Буссинеска и двухпараметрической «к-ε» модели.

## Первый модуль: знакомство с моделью

План работы на первую неделю включал в себя следующие пункты: знакомство с программой M2U (подготовка геометрии, запуск модели и анализ результатов), разбор скриптов для анализа результатов моделирования, проведение пробных расчетов и анализ полученных результатов.

Для получения навыков работы с программой M2U выполнено моделирование распространения примеси, поступающей от линейного источника на дне уличного каньона. В качестве модельной задачи выбран эксперимент, описанный в статье «Large-eddy simulation of pollutant dispersion in a cavity at fine grid resolutions», авторов Hideki Kikumoto и Ryozo Ooka. В выбранном эксперименте испытательная камера представляла собой модель уличного каньона. Геометрические размеры каньона заданы следующим образом: высота (H) и ширина (W) 1000 мм, глубина (L) 300 мм. В результате эксперимента сделаны замеры значений компонент скорости в сечениях  $x_1 = 0.5 \cdot H$ ,  $x_3 = 0.5 \cdot W$ . На рисунке 2 представлено сравнение результатов натурального эксперимента с результатами математического моделирования.

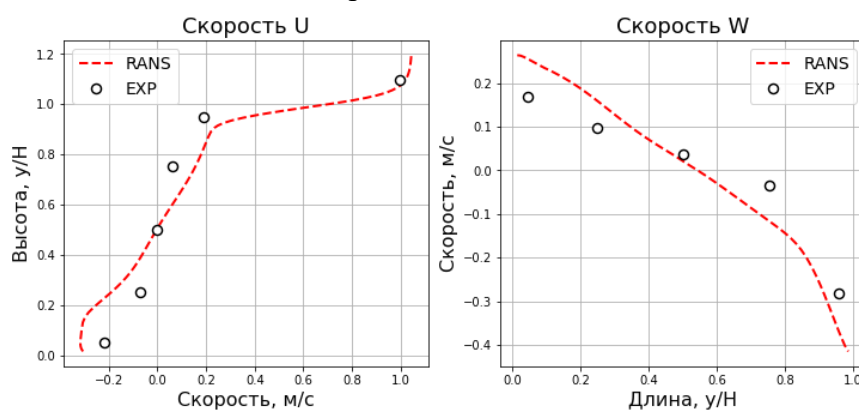


Рисунок 2 – Вертикальный и горизонтальный профили скорости

Для анализа и визуализации полученных результатов решения задачи были разработаны скрипты на языке Python. На рисунке 3 представлены векторное поле скорости и распределение концентрации примеси в сечении  $x_2 = 0.5 \cdot L$ . Моделирование движения воздуха в рассматриваемых условиях показало, что основной поток над крышами зданий вовлекает во вращательное движение воздушные массы, находящиеся внутри уличного каньона, и задает направление и интенсивность возникающего вихревого движения.

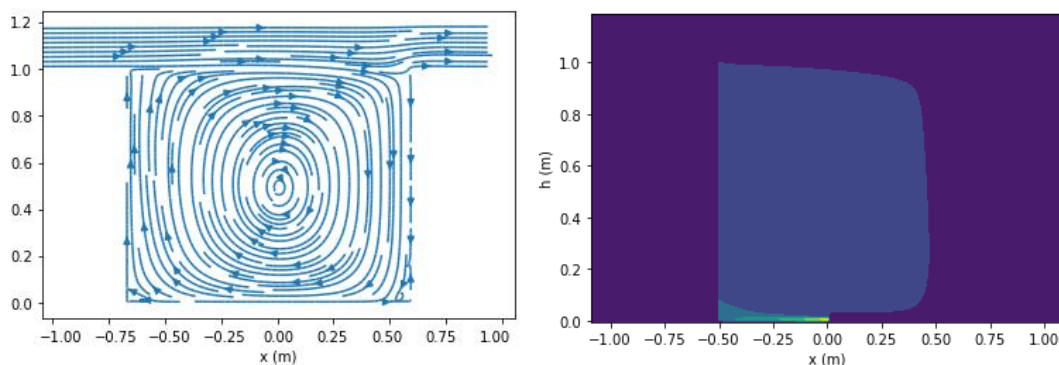


Рисунок 3 – Векторное поле скорости (слева), распределение концентрации примеси (справа)

## Межмодуль

На межмодуль каждый участник проекта получил задание исследовать влияние различной высоты зданий, образующих уличный каньон, на концентрацию примеси в каньоне и зоне дыхания. При выполнении расчетов выбиралась постоянная высота основного (более высокого) здания, например 40 метров, а высота второго здания уменьшалась от высоты основного здания до нуля с шагом 10 метров. Направление ветра всегда задавалось с левой стороны, скорость ветра 1 м/с. В таблице 1 представлен набор расчетов для основного здания высотой 40 метров. Из таблицы видно, что рассматриваются оба варианта расположения более высокого здания: слева и справа.

Таблица 1 - Набор расчетов для 40-метрового здания

Номер расчета	Высота и ширина левого здания	Ширина улицы	Высота и ширина правого здания
1	40x20	20	40x20
2	40x20	20	30x20
3	40x20	20	20x20
4	40x20	20	10x20
5	40x20	20	Нет здания
6	30x20	20	40x20
7	20x20	20	40x20
8	10x20	20	40x20
9	Нет здания	20	40x20

Участникам было предложено рассмотреть случаи, когда высота основного здания составляла 20, 30 или 40 метров, самостоятельно распределив работу между собой. Для этого требовалось сформировать исходные файлы с данными для построения геометрии каньона, задать характеристики конечно-объемной сетки и провести расчеты до получения установившегося решения.

### Второй модуль: проведение параметрических расчетов и анализ результатов

Время расчета одного варианта составляло от 5 до 10 часов, поэтому значительная часть расчетов выполнялась уже в течение второго модуля. После проведения расчетов были собраны следующие данные для анализа: максимальная концентрация в каньоне, минимальная концентрация в каньоне и зоне дыхания, средняя концентрация в каньоне и зоне дыхания. Полученные результаты собраны в виде таблиц, и теперь предстоит провести анализ полученных результатов и подготовить совместную публикацию.

### В результате совместной работы участников проекта достигнуты следующие основные цели:

- ✓ участники поработали в команде, обменялись опытом, совместно ставили задачи и преодолевали возникающие трудности;
- ✓ команда познакомилась с математическими и вычислительными аспектами задачи моделирования распространения примеси в уличных каньонах;
- ✓ участники проекта получили реальный опыт решения задач математического моделирования сложных физических процессов и выполнения групповой исследовательской работы.