

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ОБТЕКАНИЯ ЗДАНИЙ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ

Рассмотрена задача по исследованию закономерностей обтекания зданий воздушным потоком. Разработана математическая модель на базе методики нестационарного отрывного обтекания тел с изломами, которая основывается на методе дискретных вихрей. Проведены численные расчеты по структуре вихревого потока и форме линий тока при обтекании одного или нескольких зданий в зависимости от геометрических размеров и способа их расположения друг относительно друга. Представленные результаты подтверждаются исследованиями других авторов.

Розглянуто задачу про дослідження закономірностей обтікання будівель повітряним потоком. Розроблено математичну модель на основі методики нестационарного відривного обтікання тіл зі зломами, яка ґрунтується на методі дискретних вихорів. Проведено чисельні розрахунки по структурі вихревого потоку і формі ліній струму при обтіканні одного або декількох будівель в залежності від геометричних розмірів і способу їх розташування один щодо одного. Представлені результати підтверджуються дослідженнями інших авторів.

Considered the task of research the regularities air flow around buildings. A mathematical model based on the methodology unsteady separated flow around models with corners, which is based on the method of discrete vortices. Numerical calculations were performed for the structure of the vortex flow and the form of the flow lines for one or more buildings depending on the geometric dimensions and their location relative to one another.

Постановка проблемы и анализ публикаций. Как известно промышленная аэрогидродинамика занимается изучением структуры потока, которая формируется около плохообтекаемых тел [2–5]. Под действием воздуха и воды, включая порывы ветра, ураганы, обтекание таких тел сопровождается фиксированным отрывом потока на изломах, уступах, срезах, в угловых точках и изменяемым отрывом на гладкой поверхности. Наиболее типичные формы поперечных сечений: окружности – фабричные трубы, газопроводы, провода; многоугольники – здания, опоры. В связи с этим остается актуальной проблема рационального моделирования отрывных течений. При решении такого класса задач достаточно важным является получение аэродинамических данных: вихревых следов, линий тока и полей скоростей, которые лежат в основе решения других, более сложных задач аэродинамики. Исследование кинематики воздушного потока около одного, двух и целого комплекса сооружений необходимый и достаточно важный критерий исследования при строительстве и реконструкции.

Жилые здания линейного и башенного типа, промышленные с плоской кровлей и многие другие типы сооружений имеют форму параллелепипеда. Методы теории обтекания и результаты экспериментов с параллелепипедом, имеющим разные геометрические размеры, можно считать основой при рассмотрении обтекания тел более сложной формы.

Целью работы является разработка математической модели и численной методики нестационарного отрывного обтекания зданий для получения

структуры потока и формы линий тока при обтекании зданий в зависимости от геометрических размеров и способа их расположения друг относительно друга.

Математическая модель. Эффективным методом решения подобных задач является метод дискретных вихрей [1, 3, 4], согласно которому непрерывный процесс изменения граничных условий в пространстве и во времени заменяется дискретным. Решается задача об отрывном нестационарном обтекании двух зданий линейного типа рис. 1. Характерные размеры первого – l_1 , h_1 , второго – l_2 , h_2 , расстояние между ними – Δl в плоской системе координат Oxy .

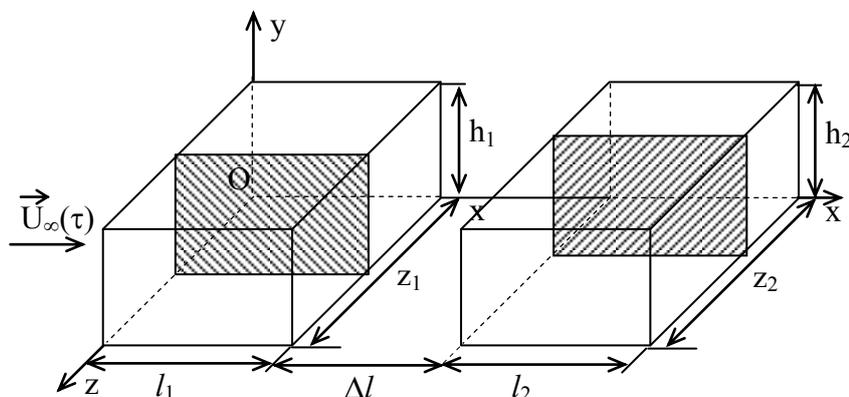


Рис.1. Взаимное расположение зданий

Поток движется с постоянной скоростью $\vec{U}_\infty(\tau)$ вдоль положительной оси Ox по закону (1). Параметры h_1 , h_2 , l_1 , l_2 , Δl могут варьироваться в зависимости от высоты и способа расположения зданий. Схема разбиения поверхности тел на дискретные вихри и контрольные точки, показана на рис. 2. За характерный линейный размер принята величина $l = h_1$, где h_1 – высота первого здания; за характерную скорость – скорость движения $\vec{U}_\infty(\tau)$.

$$U_\infty(\tau) = \begin{cases} 0, \tau < 0 \\ 1, \tau \geq 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где τ – безразмерное время, которое в случае закона (1) определяется, как $\tau = U_\infty \cdot t / l$; $U_\infty(\tau)$ – безразмерная скорость набегающего потока; $\Delta\tau \approx 1/n$ – безразмерный шаг по времени; n – число присоединенных вихрей, которыми моделируется тело. Для моделирования отрывного обтекания зданий используется основная и зеркально отображенная вихревые системы [1]. Каждая из них состоит из присоединенных дискретных вихрей, циркуляции которых Γ_μ равны по величине и противоположны по знаку, и свободных δ_1^τ , δ_2^τ , δ_3^τ , δ_4^τ пелен, сходящих с изломов поверхностей в момент времени τ . Движение последних в обеих вихревых системах происходит симметрично. При таком разбиении на линии симметрии Ox автоматически в любой момент времени выполняется условие непротекания, что равносильно присутствию здесь поверхности земли.

Схема разбиения поверхностей включает: n контрольных точек, где выполняется граничное условие непротекания и n дискретных вихрей. Первые располагаются на линиях ν , а вторые – на линиях μ между контрольными точками рис. 2.

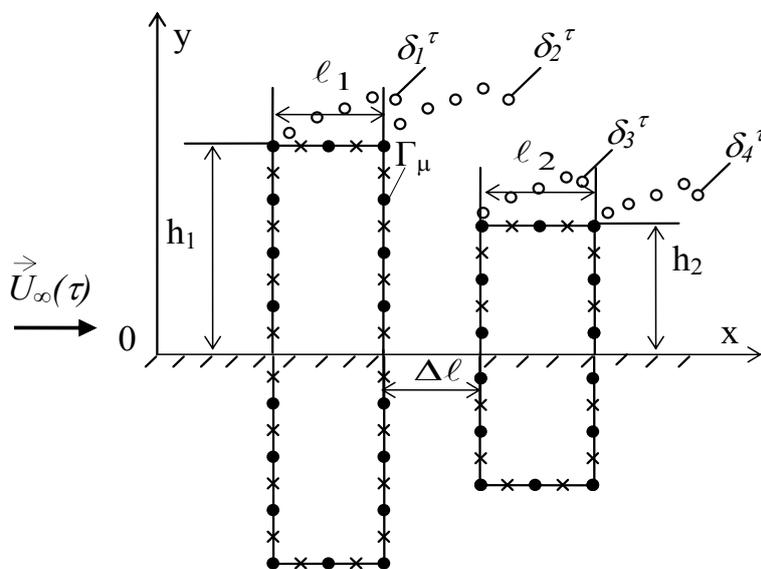


Рис. 2. Моделирование поверхности зданий системой дискретных вихрей (•) и контрольных точек (x)

Циркуляции присоединенных вихрей Γ_μ на k -ом шаге по времени определялись из решения системы линейных алгебраических уравнений (2), которая выражает собой условие непротекания поверхности и условие бесциркуляционного обтекания [1; 3].

$$\sum_{\nu=0}^n \left[\sum_{\mu=0}^n \Gamma_\mu (a_{\nu\mu} - a'_{\nu\mu}) = -\cos(\vec{U}_\infty, \vec{n})_\nu - \sum_{kk=1}^4 \sum_{i=1}^k \delta_{kk i} (a_{kk i} - a'_{kk i})_\nu \right], \quad (2)$$

где Γ_μ – циркуляция μ -ого присоединенного вихря; $a_{\nu\mu}$, $a'_{\nu\mu}$ – нормальные составляющие скорости в ν -ой контрольной точке от μ -ого присоединенного вихря основной и зеркально отображенной вихревых систем; $(a_{kk i})_\nu$, $(a'_{kk i})_\nu$ – нормальные составляющие скорости в ν -ой контрольной точке от i -ого свободного вихря основной и зеркально отображенной вихревых систем; kk – порядковый номер вихревой пелены; k – количество свободных вихрей в потоке в момент времени τ в соответствующей вихревой пелене kk ; $\cos(\vec{U}_\infty, \vec{n})_\nu$ – косинус угла между вектором скорости потока $\vec{U}_\infty(\tau)$ и нормалью \vec{n} к поверхности тела в каждой контрольной точке. Для первого тела характерна схема разбиения, которая предполагает расположение у поверхности земли контрольных точек, а для второго тела – вихрей, чтобы система алгебраических уравнений (2) была замкнутой.

Известные значения циркуляций присоединенных дискретных вихрей Γ_μ в местах излома поверхности зданий определяют циркуляции свободных вихрей $\delta_1^\tau, \delta_2^\tau, \delta_3^\tau, \delta_4^\tau$, сходящих с поверхности тел в расчетный момент времени τ .

Новое положение свободных вихрей определяется по методу Эйлера, соотношениями:

$$\begin{cases} x_{kk\ i}^{\tau+1} = x_{kk\ i}^\tau + \left[\sum_{\mu=0}^n (V_x - V'_x)_{i\mu} + \sum_{j=0}^k (V_x - V'_x)_{ij} + U(\tau) \right] \cdot \Delta t, \\ y_{kk\ i}^{\tau+1} = y_{kk\ i}^\tau + \left[\sum_{\mu=0}^n (V_y - V'_y)_{i\mu} + \sum_{j=0}^k (V_y - V'_y)_{ij} \right] \cdot \Delta t; \quad i=1, \dots, k; \quad kk=1, \dots, 4; \end{cases} \quad (3)$$

где $(V_x)_{i\mu}, (V'_x)_{i\mu}, (V_x)_{ij}, (V'_x)_{ij}, (V_y)_{i\mu}, (V'_y)_{i\mu}, (V_y)_{ij}, (V'_y)_{ij}$ – компоненты скорости, которые можно найти из соотношений (6).

Получив развитый вихревой поток при $\tau > 100 \cdot \Delta t$, можно построить линии тока [3] около рассматриваемых зданий (4).

$$\frac{dx}{V_x} = \frac{dy}{V_y}, \quad (4)$$

где V_x, V_y – компоненты скорости в рассматриваемой точке плоскости i от всей вихревой системы: присоединенных вихрей основной и зеркально отображенной системы первого и второго тела μ_1, μ_2 ; свободных вихрей, сходящих с острых кромок, обоих зданий $\delta_1, \delta'_1, \delta_2, \delta'_2, \delta_3, \delta'_3, \delta_4, \delta'_4$.

$$\begin{cases} (V_x)_i = (V_{x\mu_1})_i + (V_{x\mu_2})_i + (V_{x\delta_1} + V_{x\delta'_1})_i + (V_{x\delta_2} + V_{x\delta'_2})_i + \\ \quad (V_{x\delta_3} + V_{x\delta'_3})_i + (V_{x\delta_4} + V_{x\delta'_4})_i; \\ (V_y)_i = (V_{y\mu_1})_i + (V_{y\mu_2})_i + (V_{y\delta_1} + V_{y\delta'_1})_i + (V_{y\delta_2} + V_{y\delta'_2})_i + \\ \quad (V_{y\delta_3} + V_{y\delta'_3})_i + (V_{y\delta_4} + V_{y\delta'_4})_i. \end{cases} \quad (5)$$

Компоненты скорости из формулы (5) вычисляются по формулам Био-Савара [1],

$$\begin{cases} V_{xik} = -\frac{1}{2\pi} \frac{y_k - y_i}{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2}; \\ V_{yik} = \frac{1}{2\pi} \frac{y_k - y_i}{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2}. \end{cases} \quad (6)$$

Полученные результаты. На рис. 3 представлена структура вихревого потока и картина линий тока, полученная в результате численных расчетов на основе разработанной математической модели на базе метода дискретных вихрей при отрывном обтекании двух зданий, одинаковой высоты $h_1 = h_2 = 1$ и ширины $\ell_1 = \ell_2 = 1$, расположенные непосредственно друг за другом для развитого вихревого потока $\tau = 100 \Delta t$.

Систематические испытания для определения зоны аэродинамического следа провел Эванс при вариации высоты, ширины и длины зданий [2], результаты этих испытаний для данного расположения зданий приведены на рис. 4. К сожалению, в этой работе не даются функциональные зависимости, связывающие протяженность заветренной области с геометрическими параметрами обтекаемого здания. Однако, путем обработки результатов испытаний, автору удалось получить приближенную формулу для расчета относительной протяженности заветренной области, которая может быть использована только при направлении ветра под прямым углом к продольной стенке [2].

$$x_{зав} / H \cong 2,4\sqrt{L/B} \quad (7)$$

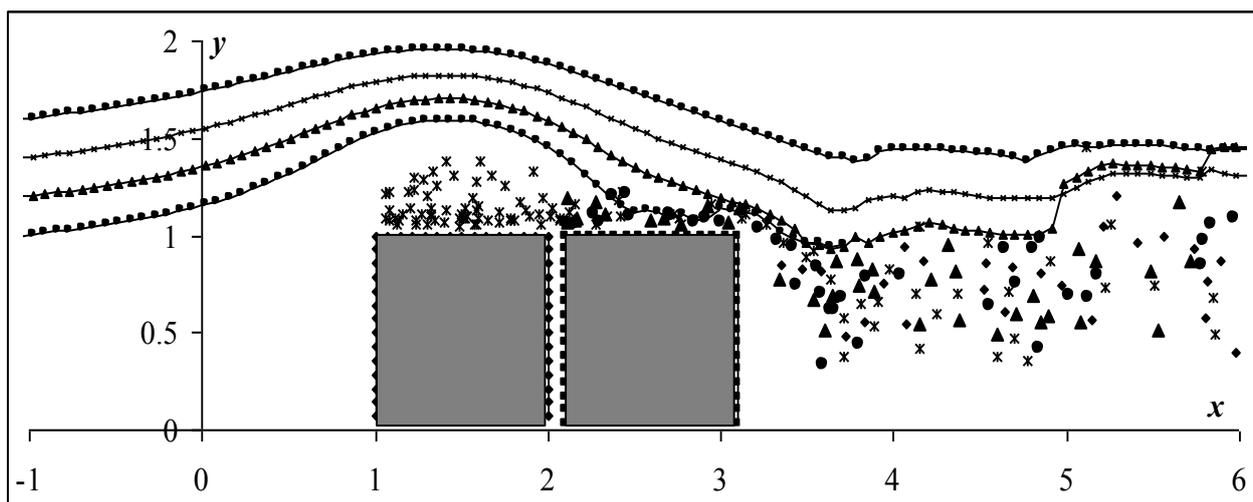


Рис. 3. Обтекание зданий одинаковой высоты и ширины $h_1=h_2=1$, $l_1=l_2=1$ (численный расчет)

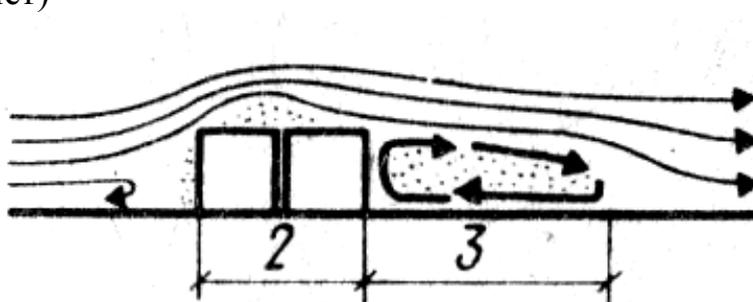


Рис. 4. Обтекание зданий одинаковой высоты и ширины $h_1=h_2=1$, $l_1=l_2=1$ (по Эвансу)

На рис. 5 представлена структура вихревого потока и картина линий тока, полученная в результате численных расчетов при отрывном обтекании одного здания высоты $h_1=1$ и ширины $l_1=1$ для развитого вихревого потока $\tau=100\Delta t$. Для сравнения на рис. 6 приведены результаты испытаний для одного здания единичных размеров по Эвансу.

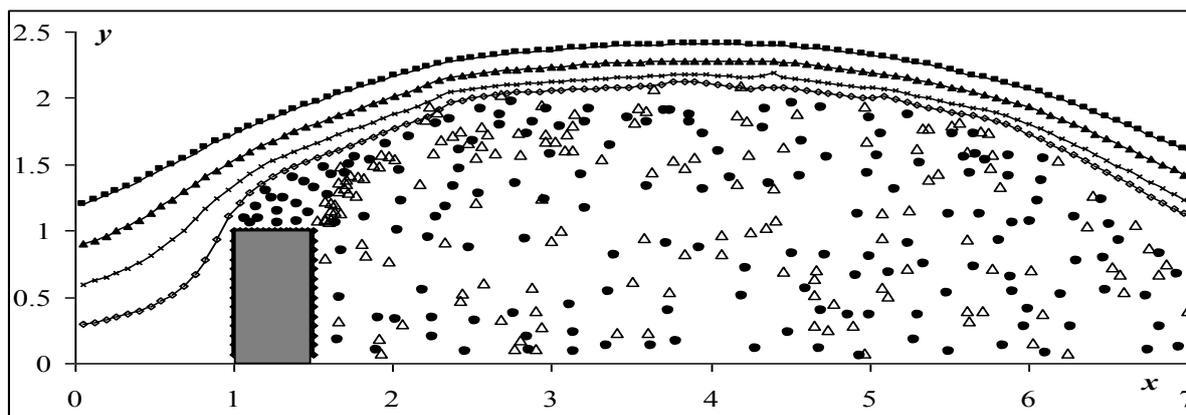


Рис. 5. Обтекание одного здания $h_1=1, l_1=1$, численный расчет

На рис. 7 представлена структура вихревого потока и картина линий тока, полученная в результате численных расчетов при отрывном обтекании одного здания высоты $h_1 = 2$ и ширины $l_1 = 1$ для развитого вихревого потока $\tau=100\Delta t$. Для сравнения на рис. 8 приведены результаты испытаний для одного здания соответствующих размеров по Эвансу.

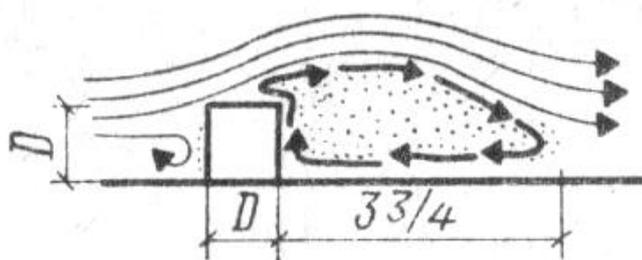


Рис. 6. Обтекание одного здания $h_1=1, l_1=1$, по Эвансу

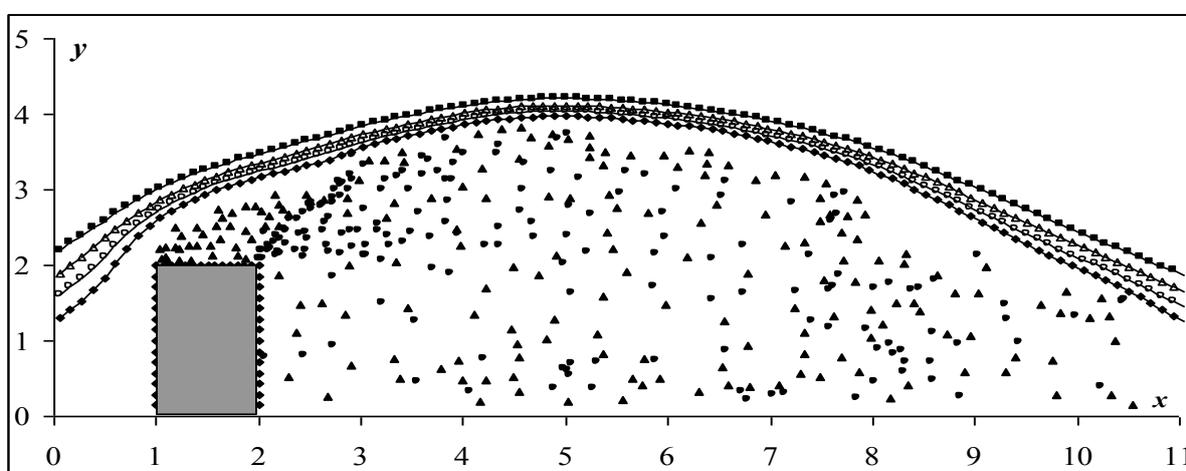


Рис. 7. Обтекание одного здания $h_1=2, l_1=1$, численный расчет

Сравнение численных расчетов с результатами испытаний по Эвансу (рис. 3–8) показывает их удовлетворительное согласование уже для развитого вихре-

вого потока порядка $\tau=100\Delta t$. Некоторое расхождение наблюдается во второй половине заветренной области, так как потенциальный поток не может описывать турбулизацию в областях, где возникают течения, направленные против основного потока.

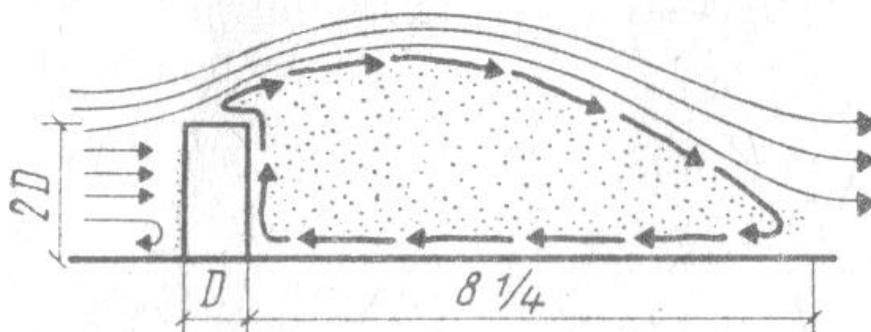


Рис. 8. Обтекание одного здания $h_l=2$, $l_l=1$, по Эвансу

Выводы. Разработанная методика численного расчета нестационарного отрывного обтекания зданий, в основе которой лежит метод дискретных вихрей, позволяет исследовать характер течения как возле одного отдельно расположенного здания, так и около совокупности зданий линейного типа. Программа численного расчета позволяет: получить развитую вихревую структуру потока, построить картину линий тока, проанализировать поле течения вокруг рассматриваемых тел, что является крайне важным при решении вопроса о расположении жилых и промышленных зданий.

Список литературы

1. Белоцерковский С. М. Математическое моделирование плоскопараллельного отрывного обтекания тел / С. М. Белоцерковский, В. Н. Котовский, М. И. Ништ. – М. : Наука, 1988. – 232 с.
2. Реттер Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика / Э. И. Реттер. – М.: Стройиздат, 1984.– 294 с.
3. Русакова Т. И. Исследование структуры ветрового потока на улицах города / Т. И. Русакова // Сборник научных трудов НГУ. – 2014. – Вип. 44. – С. 67–72.
4. Численное моделирование осесимметричных отрывных течений несжимаемой жидкости / О. Г. Гоман, В. И. Карплюк, М. И. Ништ, А. Г. Судаков. – М. : Машиностроение, 1993. – 287 с.
5. Bourabaa N. Wind potential evaluation around isolated pitched roof buildings / N. Bourabaa, E. Delacourt, J-L. Menet // Journal of Renewable and Sustainable Energy. – 2015. – Vol 2, № 1. – P. 137–143.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Зберовським О.В.
Надійшла до редакції 25.04.2015*