

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ВЕТРОВОГО ПОТОКА НА УЛИЦАХ ГОРОДА

Разработана математическая модель для исследования структуры ветрового потока на улицах города. Модель основывается на решении гидродинамической задачи с использованием метода дискретных вихрей. Проведенные численные расчеты позволяют явно оценить структуру ветрового потока, которая формируется при обтекании зданий или рассматриваемых архитектурных сооружений, чтобы обеспечить комфортный ветровой режим на пешеходном уровне.

Розроблено математичну модель для дослідження структури вітрового потоку на вулицях міста. Модель ґрунтується на рішенні гідродинамічної задачі з використанням методу дискретних вихорів. Проведені чисельні розрахунки дозволяють явно оцінити структуру вітрового потоку, яка формується при обтіканні будівель та архітектурних споруд, щоб забезпечити комфортний вітровий режим на пішохідному рівні.

The mathematical model developed for the study of the structure wind flow in the streets. The model is based on the solution of the hydrodynamic task using the method of discrete vortices. The numerical calculations are made in the work. This makes it possible to evaluate the structure of the wind flow, which is formed in the flow around buildings or architectural structures. It is necessary to create of comfortable wind regime at the pedestrian level.

**Постановка проблемы и анализ публикаций.** Быстрая урбанизация, как глобальная проблема появилась уже несколько десятков лет назад, и развитие крупных городов в мегаполисы привело к возникновению основных источников преобразования и загрязнения окружающей среды, а также к изменению городского пространства. Проблема создания зон экологического комфорта в городской среде приобретает особую важность в связи с бурным ростом городского населения и уплотнением городской застройки. Рост городов сопровождается сокращением количества чистого воздуха, зеленого пространства и тишины.

Крупные города вносят существенные изменения в сложившийся ветровой режим движения воздушных масс. Высотные здания, размещенные в городской среде без учета ветрового режима, могут приводить к созданию нежелательных вихревых потоков, которые возникают при обтекании зданий.

Поэтому, в настоящее время в странах Евросоюза повышенное внимание привлекает проблема «ветрового комфорта» на улицах городов. Суть проблемы заключается в том, что на пешеходном уровне скорость ветра не должна быть слишком большой, а должна находилась в том диапазоне, который является для человека комфортным. Таким образом, в случае проектирования новых микрорайонов или реконструкции существующих возникает задача о том, как располагать здания, малые архитектурные сооружения, чтобы обеспечить комфортный ветровой режим.

Для решения такой задачи необходимо иметь математические модели, позволяющие исследовать структуру ветрового потока в условиях городской застройки.

Существующие за рубежом CFD модели учитывают влияние зданий на формирование ветрового режима на улицах городов, однако расчеты по этим моделям ведутся на базе программных пакетов, которые требуют для проведения численных расчетов больших временных затрат, так как данные модели основаны на уравнениях Навье-Стокса. Для реализации таких CFD моделей необходима очень мелкая сетка и универсальные модели турбулентности для рассматриваемого класса задач. По данным моделям исследуется влияние зданий на пешеходов, которые находятся снаружи, возле зданий. Рассматривается соотношение между эффективным ветром, комфортным ветром, опасным ветром и местным ветром. В настоящее время для исследований используют коммерческий код Fluent Code [5] и k-ε модель турбулентности [6], выбор которой основан на рекомендациях [4]. Эта модель турбулентности подтверждается исследованиями, проведенными для условий на пешеходном уровне для данного класса задач. Также существуют классические аналитические способы расчета взаимодействия ветровых потоков со строительными сооружениями [1].

**Целью** данной работы является разработка эффективной математической модели, основанной на применении гидродинамической модели идеальной жидкости. Данная модель, разработанная на базе метода дискретных вихрей, позволяет явно увидеть структуру вихревого потока, которая формируется при обтекании зданий, что в дальнейшем позволит построить картину линий тока, получить поле скорости ветрового потока около зданий или рассматриваемых архитектурных сооружений.

**Математическая модель.** Рассматривается отрывное нестационарное обтекание здания и малой архитектурной постройки рис. 1 с изломами образующей, которые имеют характерные геометрические размеры: длина –  $l_1, l_2$ ; высота –  $h_1, h_2$  и расположены на расстоянии  $\Delta l$  друг от друга в плоской системе координат  $Oxy$ .

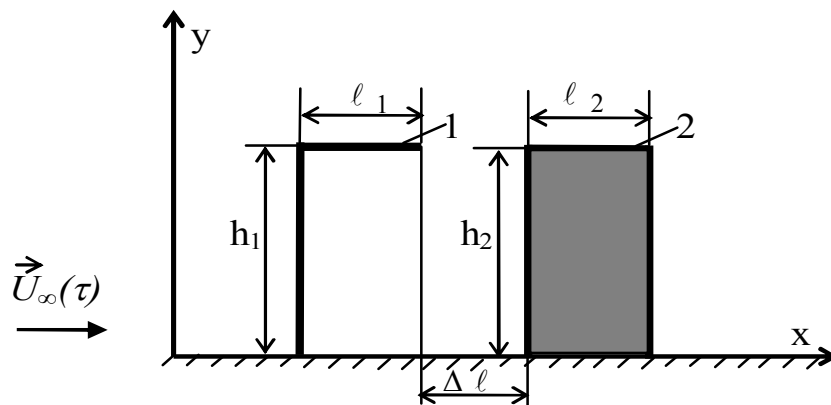


Рис. 1. Схема расчетной области: 1 – малое архитектурное сооружение; 2 – здание

Параметры  $h_1, h_2, l_1, l_2, \Delta l$  могут варьироваться в зависимости от высоты зданий и способа их расположения. Ветровой поток движется с постоянной скоростью  $\vec{U}_\infty(\tau)$  вдоль положительной оси  $Ox$ . За характерный размер принята величина  $l = h_1$ , где  $h_1$  – высота первого сооружения; за

характерную скорость – значение скорости набегающего потока  $\vec{U}_\infty(\tau)$ , где  $\tau$  – безразмерное время, которое определяется, как  $\tau = U_\infty(\tau) \cdot t / \ell$ ;  $t$  – физическое время;  $\Delta\tau \approx 1/n$  – безразмерный шаг по времени;  $n$  – число присоединенных вихрей, которыми моделируется поверхность здания.

Для моделирования процесса обтекания зданий потоком воздуха используется метод дискретных вихрей [3], который позволяет рассчитать структуру вихревого потока при различных условиях размещения зданий [2].

Для расчета отрывного обтекания рассматриваемых сооружений у поверхности земли используется основная и зеркально отображенная вихревые системы [2; 3]. Каждая из них состоит из присоединенных дискретных вихрей, циркуляции которых  $\Gamma_\mu$  равны по величине и противоположны по знаку, и свободных  $\delta_1^\tau, \delta_2^\tau, \delta_3^\tau, \delta_4^\tau$  вихревых пелен, сходящих с изломов поверхностей в момент времени  $\tau$  рис. 2. 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 сооружений включает:  $n$  контрольных точек, где выполняется граничное условие непротекания и  $n$  дискретных вихрей. Первые располагаются на линиях  $\nu$ , а вторые – на линиях  $\mu$  между контрольными точками, как в основной, так и зеркально отображенной вихревой системе рис.2.

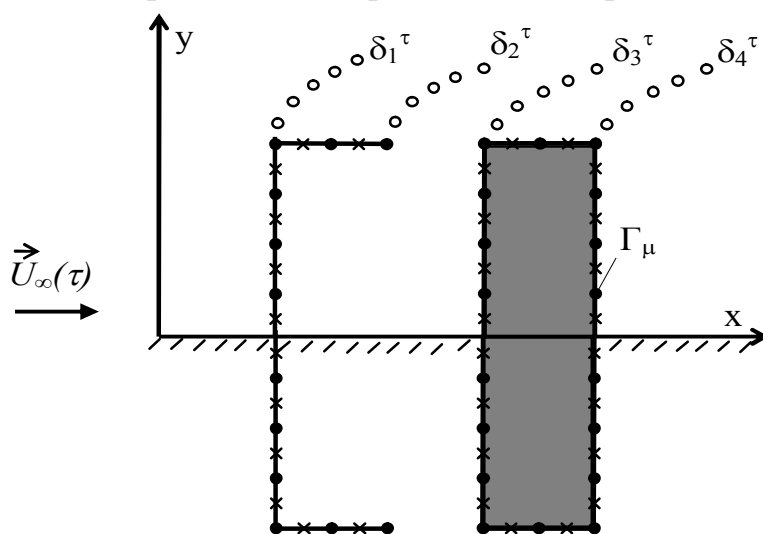


Рис. 2. Моделирование поверхности тел системой дискретных вихрей (•) и контрольных точек (x)

Циркуляции присоединенных вихрей  $\Gamma_\mu$  на  $k$ -ом шаге по времени определяются из решения системы линейных алгебраических уравнений (1), которая выражает собой условие непротекания поверхностей сооружений и условие бесциркуляционного обтекания.

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

где  $\Gamma_\mu$  – циркуляция  $\mu$ -ого присоединенного вихря;  $a_{v\mu}$ ,  $a'_{v\mu}$  – нормальная составляющая скорости в  $v$ -ой контрольной точке от  $\mu$ -ого присоединенного вихря основной и зеркально отображенной вихревых систем;  $(a_{kk\ i})_v$ ,  $(a'_{kk\ i})_v$  – нормальные составляющие скорости в  $v$ -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  $\tau$  в соответствующей вихревой пелене  $kk$ ;  $\cos(\vec{U}_\infty, \vec{n})_v$  – косинус угла между вектором скорости потока  $\vec{U}_\infty(\tau)$  и нормалью  $\vec{n}$  к поверхности тела в каждой контрольной точке. Вычисленные значения циркуляций присоединенных дискретных вихрей  $\Gamma_\mu$  в местах излома поверхностей определяют циркуляции свободных вихрей  $\delta_1^i$ ,  $\delta_2^i$ ,  $\delta_3^i$ ,  $\delta_4^i$  в расчетные моменты времени  $\tau$ ,  $i=1, \dots, k$ .

Новое положение свободных вихрей определяется согласно методу Эйлера по следующим соотношениям:

$$\begin{cases} x_{kk\ i}^{\tau+1} = x_{kk\ i}^\tau + \left[ \sum_{\mu=0}^n V_{xi\mu} - V'_{xi\mu} + \sum_{j=0}^k V_{xij} - V'_{xij} + U(\tau) \right] \cdot \Delta t, \\ y_{kk\ i}^{\tau+1} = y_{kk\ i}^\tau + \left[ \sum_{\mu=0}^n V_{yi\mu} - V'_{yi\mu} + \sum_{j=0}^k V_{yij} - V'_{yij} \right] \cdot \Delta t; \quad i=1, \dots, k; \quad kk=1, \dots, 4; \end{cases} \quad (2)$$

где  $(V_x)_{i\mu}$ ,  $(V'_x)_{i\mu}$ ,  $(V_y)_{i\mu}$ ,  $(V'_y)_{i\mu}$ ,  $(V_x)_{ij}$ ,  $(V'_x)_{ij}$ ,  $(V_y)_{ij}$ ,  $(V'_y)_{ij}$  – эти компоненты скорости можно найти из соотношений (3).

$$\begin{cases} V_{xik} = -\frac{1}{2\pi} \frac{y_k - y_i}{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2}; \\ V_{yik} = \frac{1}{2\pi} \frac{y_k - y_i}{(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2}. \end{cases} \quad (3)$$

где  $k$  – расчетная точка, в которой определяется скорость;  $i$  – вихрь, который индуцирует скорость.

**Практическая реализация модели.** Разработанная математическая модель была применена для численного расчета структуры вихревого потока, линий тока и поля скорости при обтекании ветровым потоком здания и малой архитектурной постройки одинаковой длины  $\ell_1 = \ell_2$  и высоты  $h_1 = h_2$ .

Рассматривалось три сценария:  $\Delta\ell=3l$ ,  $\Delta\ell=2l$ ,  $\Delta\ell=l$ , где  $\Delta\ell$  – расстояние между зданием и малой архитектурной постройкой,  $l$  – характерный размер. Результаты расчета структуры вихревого потока представлены на рис. 3 – рис. 5, что соответствует 50 шагам по времени или для момента времени 15 с.

Анализируя структуру вихревого потока, представленную на рис. 3–5, можно видеть, что если рассматриваемые объекты находятся на достаточном расстоянии друг от друга  $\Delta\ell=3l$  (рис. 3), то возникает мощный вихревой поток

внутри малого сооружения и на подветренной стороне капитального здания, что способствует образованию в этих областях застойных зон. Однако, так как вихревые пелены, сходящие с острых кромок обоих объектов не взаимодействуют между собой, то с течением времени вихревой поток около малого сооружения вытягивается и выносится за его пределы, что способствует хорошему вентилированию межкорпусного пространства. При уменьшении расстояния  $\Delta\ell=2l$  (рис. 4) видно, что постепенно вихревые пелены, сходящие с малого сооружения, проникают в вихревой поток, который формируется около капитального здания, и при  $\Delta\ell=l$  (рис. 5) образуются мощные порывы ветра (завихрения большой интенсивности), как в зазоре между рассматриваемыми объектами, так и внутри малого сооружения.

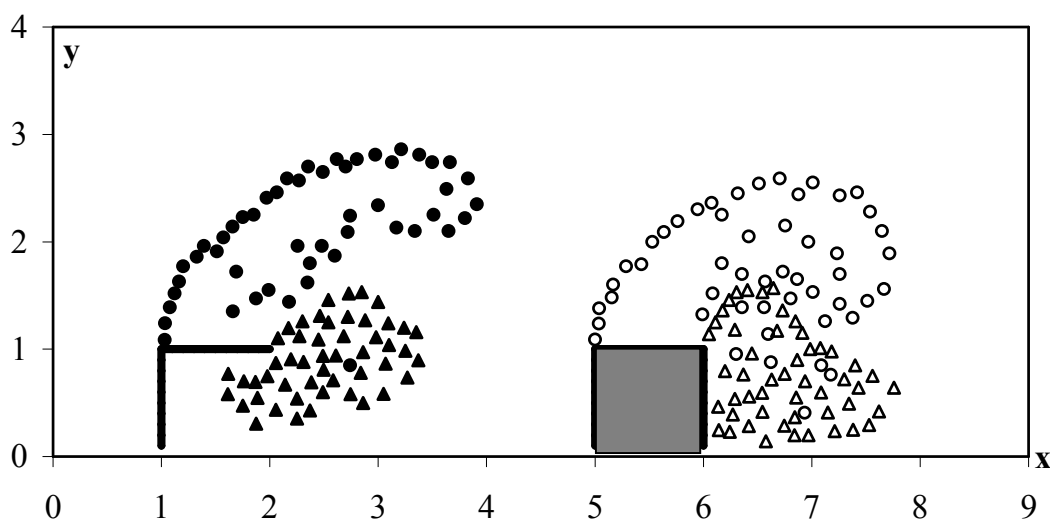


Рис. 3. Структура вихревого потока при  $\Delta\ell=3l$

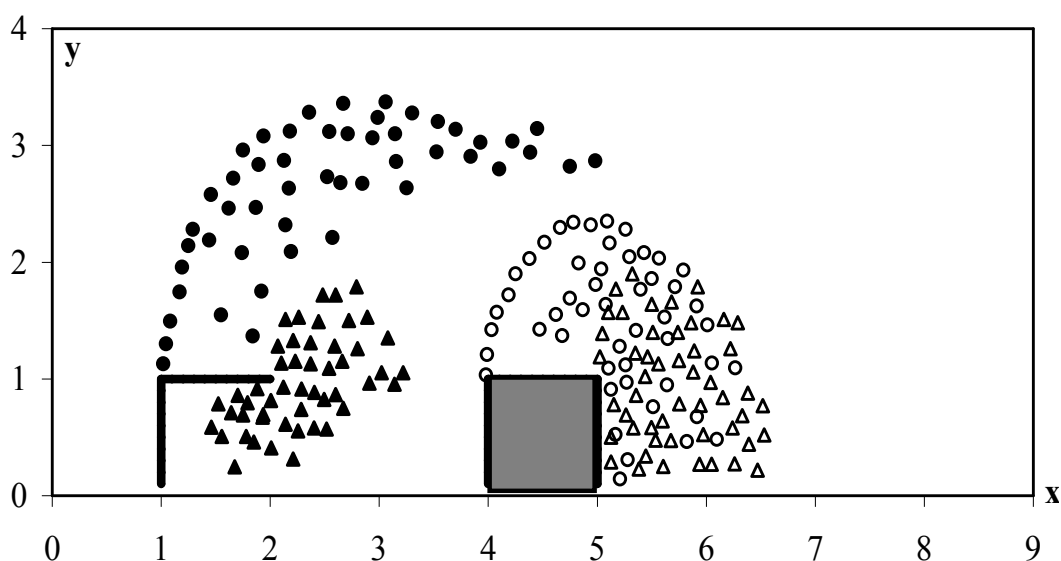


Рис. 4. Структура вихревого потока при  $\Delta\ell=2l$

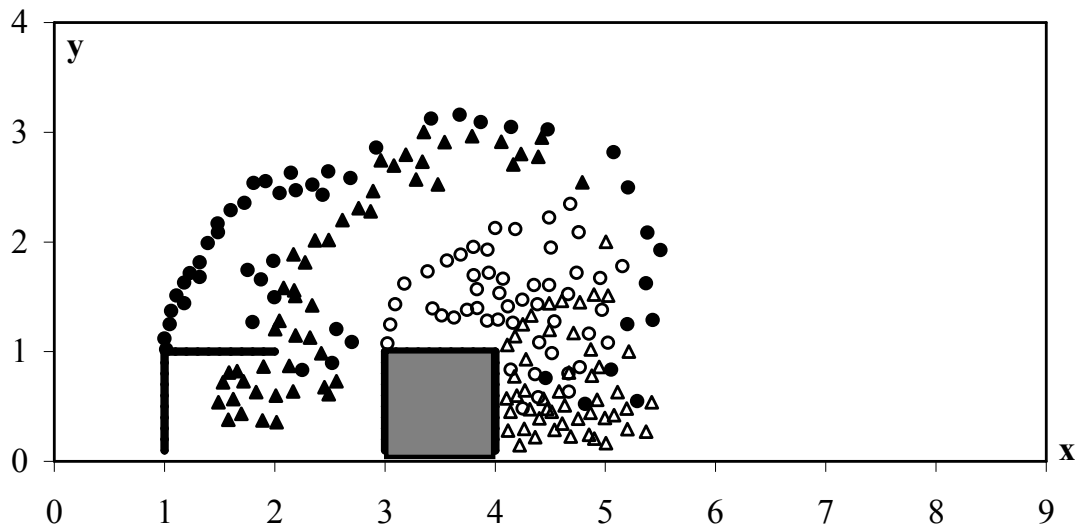


Рис. 5. Структура вихревого потока при  $\Delta t = l$

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет оперативно получать промежуточные результаты по оценке структуры ветрового потока при решении задачи о «ветровом комфорте» на улицах городов с учетом габаритов зданий и их взаимного расположения друг относительно друга. На основании такой информации можно выбрать оптимальные расположение объектов на улице, чтобы не возникали мощные вихревые потоки, которые нарушают «ветровой комфорт».

**Выводы.** В данной работе исследовался характер обтекания совокупности здания и малой архитектурной постройки, которые представляют собой плохообтекаемые тела, так как угловые кромки и зазоры между ними становятся причиной возникновения интенсивных вихреобразований. Разработана математическая модель и методика численного расчета нестационарного отрывного обтекания сооружений с изломами, которая базируется на методе дискретных вихрей. В дальнейших исследованиях данная математическая модель может быть применима для исследования структуры вихревого потока около сооружений различных размеров, формы и взаимного расположения, а также для изучения формы линий тока и поля скорости ветрового потока при обтекании зданий на улицах города.

#### Список литературы

1. Реттер Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика / Э. И. Реттер. – М.: Стройиздат, 1984. – 294 с.
2. Русакова Т. И. Численное исследование структуры вихревого потока около высотных сооружений / Т. И. Русакова, В. И. Карплюк // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер. «Механіка». – 2006. – Вип. 10, т. 1. – С. 154–160.
3. Численное моделирование осесимметричных отрывных течений несжимаемой жидкости / О. Г. Гоман, В. И. Карплюк, М. И. Ништ, А. Г. Судаков. – М. : Машиностроение, 1993. – 287 с.
4. Franke J. Recommendations on the use of CFD in wind engineering. / J. Franke, C. Hirsch, A. G. Jensen. // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2004. – № 81(1-3). – P. 295–309.

5. Mohamed Sakr Fadl, John Karadelis CFD Simulation for Wind Comfort and Safety in Urban Area: A Case Study of Coventry University Central Campus / Sakr Fadl Mohamed, John Karadelis // International Journal of Architecture, Engineering and Construction. – 2013. – Vol 2, № 2. – P. 131–143.
6. Shih T. A new k-e eddy viscosity model for high reynolds number turbulent flows / T. Shih, W.W. Liou, A. Shabbir // Computers and Fluids. – 1995. – № 24(3). – P. 227–238.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Зберовським О.В.  
Надійшла до редакції 03.11.2014*

УДК 543:546.633

© Ю.Ф. Коровин

## **БЕЗОТХОДНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ЯДЕРНО-ЧИСТОГО ЦИРКОНИЯ**

В работе рассматриваются вопросы решения экологических проблем с полной утилизацией отходов в производстве ядерно-чистого циркония.

В роботі розглядаються питання вирішення екологічних проблем з повною утилізацією відходів у виробництві ядерно-чистого цирконію.

The paper deals with issues connected with environmental problem settlement and complete waste disposal during manufacturing of nuclear-grade zirconium.

Постановлением Совмина СССР в 1971 г. Приднепровскому химическому заводу было поручено организовать производство ядерно-чистого циркония. В связи с этим, руководством Минсредмаша принимается решение о создании в стране второй промышленной базы производства ядерно-чистого циркония мощностью 4000 тонн в год. Выбор нашего предприятия был обусловлен близостью Самотканского месторождения руд (г. Вольногорск), содержащих циркон, не менее важным было наличие на предприятии строительной организации, осваивающей ежегодно до 24 млн. руб. строительно-монтажных работ и квалифицированных кадров на самом заводе.

Встал вопрос выбора технологии. К этому времени была известна хлоридная технология получения циркония методом Кролля и действующая – электролизная на Чепецком механическом заводе в г. Глазове. Недостатком первой технологии является применение высокотоксичного хлора, наличие его отходов, сложность отделения циркония от гафния. Получение циркония в виде губки и ее переработка осложняет технологию.

Метод электролиза связан с получением металла в виде порошка. Начало процесса – перекристаллизация не обеспечивает необходимую степень очистки циркония от гафния, низкое извлечение металлов из сырья. Кроме того, образование при электролизе фреонов и наличие сбросных хлоридных растворов при отмывке порошка от электролита требует решения их утилизации и захоронения.