

ОЦЕНКА ВЕТРОВОГО РЕЖИМА ПРИ ОБТЕКАНИИ ЗДАНИЙ

Аннотация. Разработана математическая модель для оценки ветрового режима на улицах города. Модель основывается на решении гидродинамической задачи с использованием метода дискретных вихрей. Проведенные численные расчеты позволяют явно увидеть структуру вихревого потока, которая формируется при обтекании зданий, построить картину линий тока, получить поле скорости ветрового потока около зданий или рассматриваемых архитектурных сооружений. Расчеты, проведенные по разработанной модели, необходимы в случае проектирования новых микрорайонов или реконструкции существующих, когда возникает вопрос о том, как располагать здания, малые архитектурные сооружения, чтобы обеспечить комфортный ветровой режим на пешеходном уровне.

Ключевые слова: математическая модель, метод дискретных вихрей, вихревая структура, линии тока, поле скорости, ветровой комфорт, реконструкция микрорайонов.

Постановка проблемы и анализ публикаций. Ветер на пешеходном уровне – одно из условий, которое надо рассматривать в современном городском планировании и проектировании зданий [19]. Строительство нового здания изменяет микроклимат в его окрестности. Следовательно, ветровой комфорт и безопасность для пешеходов становятся важными требованиями в области городского планирования и дизайна. Сегодня, в рамках городских программ ставится вопрос об исследовании ветрового комфорта и его безопасности на пешеходном уровне для новых зданий или комплекса зданий. Высотные здания оказывают большое влияние на ветровой поток, поэтому информация о поле скорости, которое формируется при обтекании зданий может иметь важное значение для архитекторов и градостроителей. Новейшие научные и инженерные достижения должны помочь современным архитекторам, дизайнерам и инженерам в создании более удобных и функциональных зданий, которые оказывая влияние на ветровой, не нарушают ветровой комфорт на пешеходном уровне. В частности, возле и вокруг высотных зданий, высокие скорости ветра

часто возникают на пешеходном уровне, что может восприниматься как неудобство или даже как опасность для пешеходов.

Ветровой поток на пешеходном уровне можно смоделировать в аэродинамической трубе, тем не менее, с появлением вычислительной техники и численных методов можно точно моделировать те же условия в виртуальной среде с использованием передовых технологий моделирования, т. е. с помощью CFD моделей [10–16; 18–20], которые могут обеспечить значительное экономическое преимущество при оценке инженерных проектных решений. CFD моделирование может быть использовано для оценки поля скорости ветра вокруг зданий, а также для оценки теплового комфорта, вентиляции воздуха, влияния микроклиматических условий [18]. За последние два десятилетия наряду с совершенствованием CFD моделирования, многие исследования сосредоточены на численном моделировании воздушного потока около одного здания, их исследования показывают сложные явления потока ([12; 15; 16]. CFD моделирование ведется на базе программных пакетов, которые требуют для проведения расчетов больших временных затрат, очень мелкой сетки и универсальных моделей турбулентности [17] для рассматриваемого класса задач. В настоящее время для исследований используют коммерческий код Fluent Code [14] и k-ε модель турбулентности [17], выбор которой основан на рекомендациях [12]. Эта модель турбулентности подтверждается исследованиями, проведенными для условий на пешеходном уровне [10; 11]. Также существуют классические аналитические способы расчета взаимодействия ветровых потоков со строительными сооружениями [1; 5].

Целью данной работы является разработка эффективной математической модели, основанной на применении гидродинамической модели идеальной невязкой жидкости. Данная модель разработана на базе метода дискретных вихрей, что позволяет явно увидеть структуру вихревого потока, которая формируется при обтекании зданий, построить картину линий тока, получить поле скорости ветрового потока около одного здания, нескольких 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 $\Delta\ell$ друг от друга в плоской системе координат Oxy . Параметры $h_1, h_2, \ell_1, \ell_2, \Delta\ell$ могут варьироваться в зависимости от высоты зданий и способа их взаимного расположения. Ветровой поток движется с постоянной скоростью $U_\infty(\tau)$ вдоль положительной оси Ox . За характерный размер принята величина $\ell = h_1$, где h_1 – высота первого сооружения; за характерную скорость – значение скорости набегающего потока $U_\infty(\tau)$, где τ – безразмерное время, которое определяется, как $\tau = U_\infty(\tau) \cdot t / \ell$;

– 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 [2; 3], который позволяет рассчитать структуру вихревого потока, форму линий тока и поле скорости при различных условиях размещения зданий [6; 7].

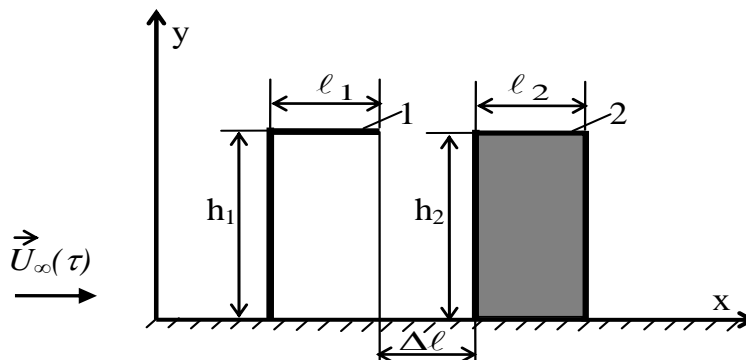


Рис. 1. Схема расчетной области: 1 – малое архитектурное сооружение; 2 – здание

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 Γ_μ равны по величине и противоположны по знаку, и свободных $\delta_1^\tau, \delta_2^\tau, \delta_3^\tau, \delta_4^\tau$ вихревых пелен, сходящихся с изломов поверхностей в момент времени τ 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 ν , а вторые – на линиях μ между контрольными точками, как в основной, так и зеркально отображенной вихревой системе рис. 2.

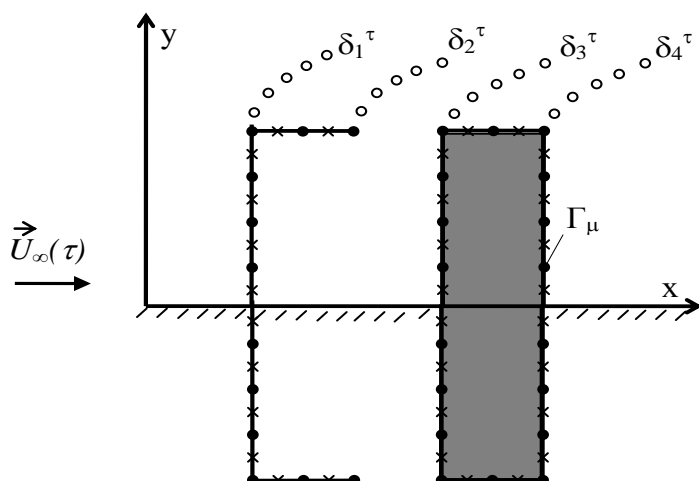


Рис. 2. Моделирование поверхности тел системой дискретных вихрей (•) и контрольных точек (x)

Циркуляции присоединенных вихрей Γ_μ 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 [6–9].

где $\sum_{\mu=0}^n \Gamma_{\mu} = 0$ циркуляция μ -ого присоединенного вихря; $a_{\nu\mu}, a'_{\nu\mu}$ – нормальная составляющая 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. Вычисленные значения циркуляций присоединенных дискретных вихрей Γ_{μ} 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 по методу Эйлера [2; 4; 6], соотношениями:

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

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.

Получив развитый вихревой поток, можно построить линии тока [4; 7] около рассматриваемых тел (4).

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

где V_x, V_y – компоненты скорости в рассматриваемой точке плоскости q от всей вихревой системы: присоединенных вихрей основной и зеркально отображенной системы первого и второго сооружения μ_1, μ_2 ; свободных вихрей, сходящих с

острых кромок, обоих сооружений $\delta_1, \delta'_1, \delta_2, \delta'_2, \delta_3, \delta'_3, \delta_4, \delta'_4$. Эти компоненты скорости вычисляются:

$$\begin{cases} (V_x)_q = \sum_{r=1}^p \sum_{i=0}^n \Gamma_{\mu_r} (V_{x\mu_r} - V'_{x\mu_r})_i + \sum_{rr=1}^{pp} \sum_{j=1}^k \Gamma_{\delta_{rr}} (V_{x\delta_{rr}} - V'_{x\delta_{rr}})_j + U_{\infty}(\tau); \\ (V_y)_q = \sum_{r=1}^p \sum_{i=0}^n \Gamma_{\mu_r} (V_{y\mu_r} - V'_{y\mu_r})_i + \sum_{rr=1}^{pp} \sum_{j=1}^k \Gamma_{\delta_{rr}} (V_{y\delta_{rr}} - V'_{y\delta_{rr}})_j; \end{cases} \quad (5)$$

где Γ_{μ_r} – циркуляция μ -ого присоединенного вихря r -ого сооружения, $\Gamma_{\delta_{rr}}$ – циркуляция свободного вихря rr -ой вихревой пелены; $U_{\infty}(\tau)$ – скорость набегающего потока; $(V_x)_q, (V_y)_q$ – компоненты скорости в рассматриваемой точке плоскости (x_q, y_q) , которые можно рассчитать как сумму соответствующих компонент скорости от всей вихревой системы (3): присоединенных вихрей μ_r (компоненты $V_{x\mu_r}, V_{y\mu_r}$), которыми моделируются поверхности сооружений, и свободных вихрей δ_{rr} (компоненты $V_{x\delta_{rr}}, V_{y\delta_{rr}}$), сошедших с острых кромок, на расчетный момент времени τ основной и зеркально отображенной вихревой системы.

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 – 5, что соответствует 50 шагам по времени или для момента времени 20 с.

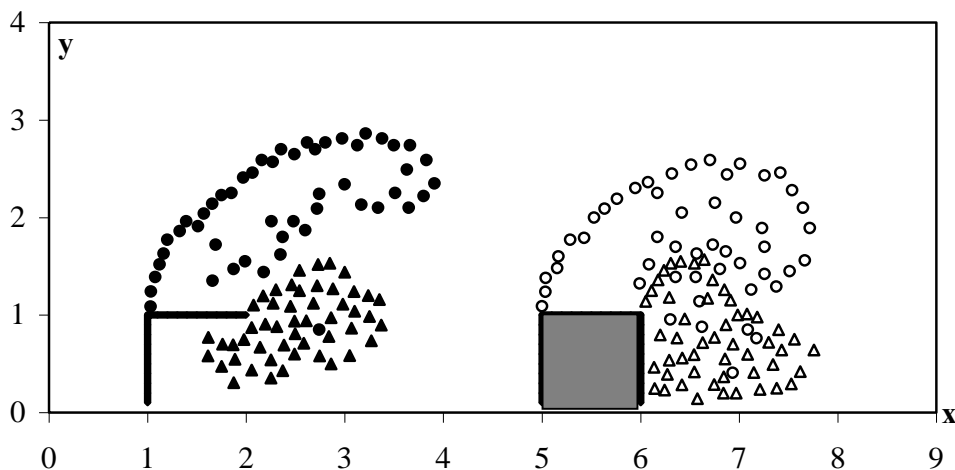


Рис. 3. Структура вихревого потока при $\Delta\ell = 3l$

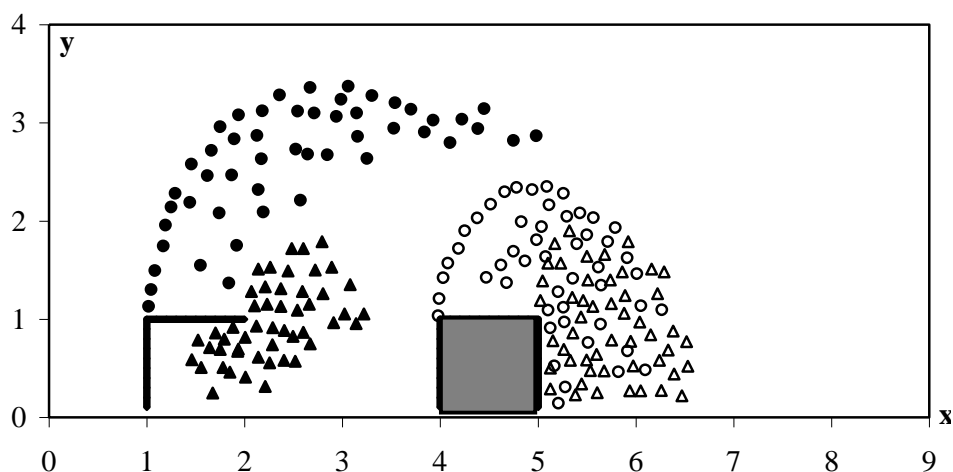


Рис. 4. Структура вихревого потока при $\Delta\ell=2l$

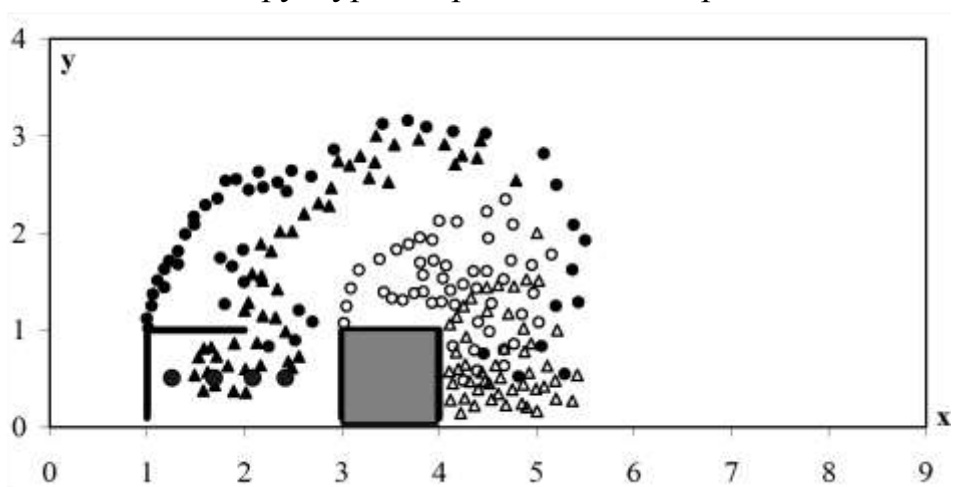


Рис. 5. Структура вихревого потока при $\Delta\ell=l$

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 основного здания, который способствует образованию 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 основного здания, и при $\Delta\ell=l$ (рис. 5) будут образовываться мощные порывы ветра (завихрения большой интенсивности), как в зазоре между рассматриваемыми объектами, так и внутри малого сооружения.

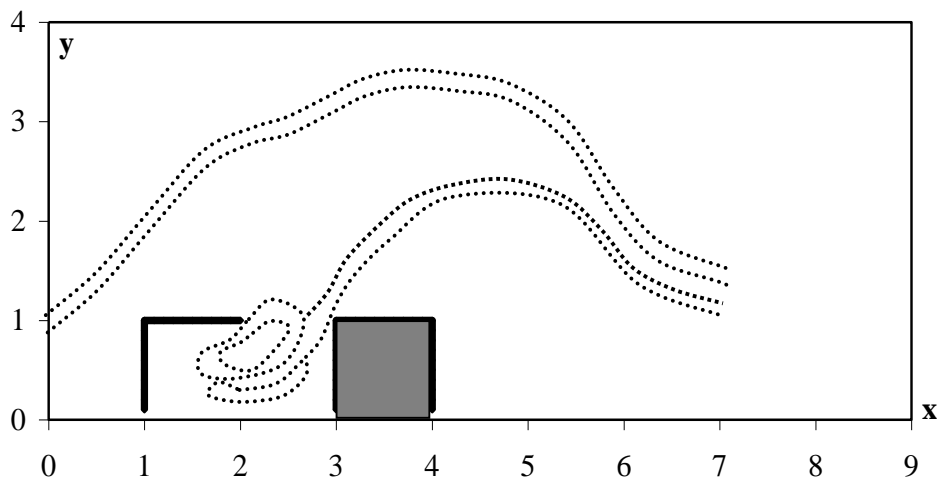


Рис. 6. Форма линий тока при $\Delta\ell=l$

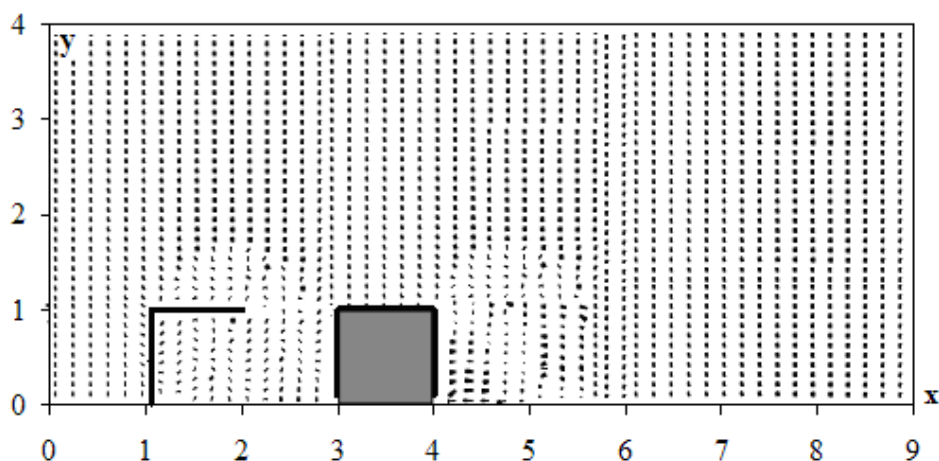


Рис. 7. Поле скорости при $\Delta\ell=l$

На рис. 6 представлена форма линий тока, соответствующая третьему сценарию расположения сооружений, что подтверждает образование зон возвратного течения. На рис. 7 показан результат расчета поля скорости ветрового потока около рассматриваемых объектов в виде вектора скорости, что позволяет определить не только числовое значение вектора скорости на разных уровнях от поверхности земли, но и увидеть направление вектора скорости. На практике представляет интерес определение скорости ветра в любой точке расчетной области (рис. 5), разработанная модель позволяет получить такую информацию, которая представлена в табл. 1, если выбранные точки брать на различной высоте над уровнем земли.

Таким образом, разработанная модель позволяет оперативно получать решение задачи о «ветровом комфорте» на улицах городов с учетом габаритов зданий и их взаимного расположения друг относительно друга. На основании

такой информации можно выбрать оптимальное расположение объектов на улице, чтобы скорость ветрового потока не превышала допустимых значений.

Таблица 1. Значение безразмерной величины скорости в зависимости от высоты над уровнем земли

Высота над уровнем земли	Скорость, \bar{V}			
	1-я точка	2-я точка	3-я точка	4-я точка
0,1 h	0,09 \bar{V}	0,11 \bar{V}	0,24 \bar{V}	0,33 \bar{V}
0,2 h	0,12 \bar{V}	0,22 \bar{V}	0,32 \bar{V}	0,54 \bar{V}
0,3 h	0,14 \bar{V}	0,26 \bar{V}	0,34 \bar{V}	0,63 \bar{V}

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. Она применима для исследования структуры вихревого потока, формы линий тока и поля скорости ветрового потока около двух или нескольких сооружений различных размеров при исследовании ветрового режима на улицах города.

Литература

1. Белов И. А. Взаимодействие неравномерных потоков с преградами / И. А. Белов. – Л.: Машиностроение, 1983. – 144 с.
2. Белоцерковский С. М. Математическое моделирование плоскопараллельного отрывного обтекания тел / С. М. Белоцерковский, В. Н. Котовский, М. И. Ништ. – М.: Наука, 1988. – 232 с.
3. Белоцерковский С. М. Моделирование отрывного обтекания цилиндра вблизи экрана / С. М. Белоцерковский, В. Н. Котовский, М. И. Ништ. // Инженерно-физический журн. – 1986. – Т.50, № 2. – С. 78-84.
4. Давидсон В. Є. Вступ до гідродинаміки / В. Є. Давидсон, М. М. Личагін. – Д.: Вид. ДНУ, 2004. – 216 с.
5. Реттер Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика / Э. И. Реттер. – М.: Стройиздат, 1984. – 294 с.

6. 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.
7. Русакова Т. И. Задача численного расчета обтекания зданий воздушным потоком / Т. И. Русакова, В. И. Карплюк // Вісн. Дніпропетр. ун-ту. Сер. «Механіка». – 2007. – Вип. 11, т. 1. – С. 53-58.
8. Самарский А. А. Математическое моделирование / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. – М. : Физматлит, 2001. – 320 с.
9. Численное моделирование осесимметричных отрывных течений несжимаемой жидкости / О. Г. Гоман, В. И. Карплюк, М. И. Ништ, А. Г. Судаков. – М. : Машиностроение, 1993. – 287 с.
10. Blocken B. Pedestrian wind comfort around a large football stadium in an urban environment: CFD simulation, validation and application of the new dutch wind nuisance standard / B. Blocken and J. Persoon. // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2009. – № 97(5-6). – P. 255–270.
11. Blocken B. Modification of pedestrian wind comfort in the silvertop tower passages by an automatic control system / B. Blocken, S. Roels and J. Carmeliet. //Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2004. – № 92(10). – P. 849–873.
12. Bosch G. Simulation of vortex shedding past a square cylinder with different turbulence models / G. Bosch, W. Rodi // International Journal for Numerical Methods in Fluids. – 1998. – № 28(4). – P. 601–616.
13. 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.
14. Mohamed S. F. CFD Simulation for Wind Comfort and Safety in Urban Area: A Case Study of Coventry University Central Campus / S. F. Mohamed, J. Karadelis // International Journal of Architecture, Engineering and Construction. – 2013. – Vol 2, № 2. – P. 131–143.
15. Murakami S. Overview of turbulence models applied in CWE – 1997 / S. Murakami // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1998. – P. 74-76, 1–24.
16. Paterson D. A. Computation of wind flows over three - dimensional buildings / D. A. Paterson, C. J. Apelt // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 1986. – № 24(3). – P. 193–213.
17. 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.

18. Stathopoulos T. Pedestrian level winds and outdoor human comfort / T. Stathopoulos // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2006. – № 94(11). – P.769–780.
19. Wu H. Designing for pedestrian comfort in response to local climate / H. Wu and F. Kriksic // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2012. – P. 104-106, 394–407.
20. Yoshie R. Cooperative project for CFD prediction of pedestrian wind environment in the architectural institute of Japan / R. Yoshie, A. Mochida, Y. Tominaga // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. – 2007. – № 95(9-11). – P. 1551–1578.

Анотація. Розроблено математичну модель для оцінки вітрового режиму на вулицях міста. Модель ґрунтується на рішенні гідродинамічної задачі з використанням методу дискретних вихорів. Проведені чисельні розрахунки дозволяють явно побачити структуру вихрового потоку, яка формується при обтіканні будівель, побудувати картину ліній течії, отримати поле швидкості вітрового потоку поблизу будівель та довільних архітектурних споруд. Розрахунки, проведені за розробленою моделлю, необхідні в разі проектування нових мікрорайонів або реконструкції існуючих, коли виникає питання про те, як розташовувати будівлі, малі архітектурні споруди, щоб забезпечити комфортний вітровий режим на пішохідному рівні.

Ключові слова: математична модель, метод дискретних вихорів, вихрова структура, лінії течії, поле швидкості, вітровий комфорт, реконструкція мікрорайонів.

Abstract. The mathematical model developed for the study of the wind regime 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. You can see the structure of the vortex flow around buildings; get a view of the current lines and velocity field of wind flow around buildings and architectural structures. Calculations on this model are made when designing new microdistricts or renovation of existing. It is necessary to create of the comfortable wind regime at the pedestrian level.

Key words: mathematical model, the method of discrete vortices, vortex structure, current lines, velocity field, wind comfort.