

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕКТОРНОГО ПОЛЯ ВЕТРА ПРИ ОБТЕКАНИИ ИСКУССТВЕННЫХ СООРУЖЕНИЙ

О. А. Сотникова*, Л. В. Мурашова*, А. И. Маленёв**, А. Е. Пигарев**, А. И. Драбо**

*Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

**ВУНЦ ВВС «Военно-воздушная академия им. проф. Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина»

Поступила в редакцию 05.10.2015 г.

Аннотация. Статья описывает использование математической модели обтекания ветровым потоком зданий и сооружений, что позволяет определить, как ведут себя частицы вещества в окружающей среде.

Ключевые слова: ветровой поток, проектирование зданий, моделирование.

Annotation. This article describes the use of a mathematical model of the flow around wind flow of buildings and structures. That allows you to define the behavior of particles of a substance in the environment.

Keywords: wind flow, building design, modeling.

ВВЕДЕНИЕ

Ветровой поток при обтекании зданий и строений – одно из условий, которое необходимо рассматривать при городском планировании и проектировании зданий [1]. Строительство нового здания изменяет микроклимат в его окрестности. Следовательно, ветровой комфорт и безопасность становятся важными требованиями в области городского планирования и дизайна. Высотное здание оказывает большое влияние на ветровой поток, поэтому информация о поле скорости, которое формируется при обтекании зданий может иметь важное значение для архитекторов и градостроителей.

Ветровой поток можно смоделировать в аэродинамической трубе, тем не менее, с развитием вычислительной техники и численных методов можно точно моделировать те же условия в виртуальной среде с помощью CFD-моделей [2–11], которые могут обеспечить значительное экономическое преимущество при оценке инженерных проектных решений. CFD-моделирование может быть использовано для оценки поля скорости ве-

тра вокруг зданий, а также для оценки теплового комфорта, вентиляции воздуха, влияния микроклиматических условий [9]. 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 [4, 7, 8].

CFD-моделирование требует больших временных затрат, очень мелкой сетки и универсальных моделей турбулентности [12] для рассматриваемого класса задач. Также существуют классические аналитические способы расчета взаимодействия ветровых потоков со строительными сооружениями [13, 14].

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НА БАЗЕ МЕТОДА ДИСКРЕТНЫХ ВИХРЕЙ

В данной работе рассмотрим математическую модель, основанную на применении гидродинамической модели идеальной невязкой жидкости. Данная модель разработана на базе метода дискретных вихрей, что позволяет построить картину линий тока, получить поле скорости ветрового потока около одного здания, нескольких зданий или архитектурных сооружений.

© Сотникова О. А., Мурашова Л. В., Маленёв А. И., Пигарев А. Е., Драбо А. И., 2015

Рассмотрим 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 расположенные на расстоянии Δl друг от друга в плоской системе Oxy . 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 τ – безразмерное время, определяемое как $\vec{U}_\infty(\tau) \cdot t / l$, 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 используем метод дискретных вихрей [15, 16], который позволяет рассчитать структуру вихревого потока, форму линий тока и поле скорости при различных условиях размещения зданий [17, 18].

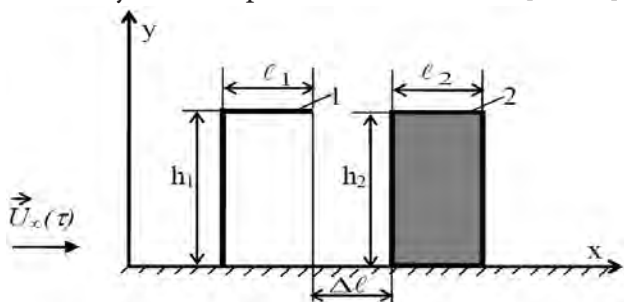


Рис. 1. Схема расчетной области: 1 – малое архитектурное сооружение, 2 – здание

Для расчета отрывного обтекания рассматриваемых сооружений у поверхности земли используется основная и зеркально отображенная вихревой системы [15, 16]. 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

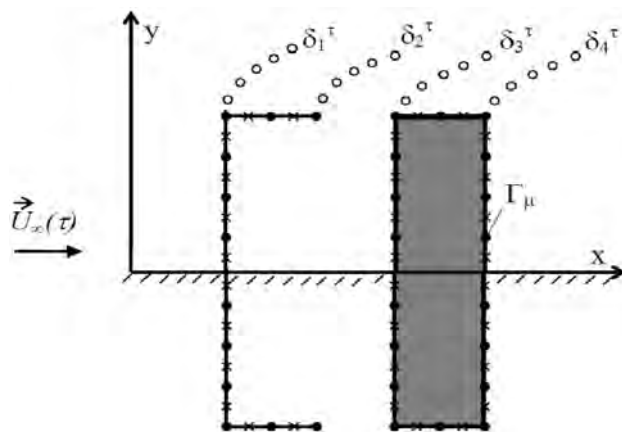


Рис. 2. Моделирование поверхности тел системой дискретных вихрей (·) и контрольных точек (×)

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.

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 [17–20].

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

где Γ_μ – циркуляция μ -го присоединенного вихря; $a_{\nu\mu}, a'_{\nu\mu}$ – нормальная составляющая скорости в ν -й контрольной точке от μ -го 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 -го 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 ;

$\cos(\vec{U}_\infty, \vec{n})_v$ – 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 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 $\tau, i = \overline{1, k}$.

Новое положение свободных вихрей определяется по методу Эйлера [15, 17] соотношениями:

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

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

$$\left\{ \begin{aligned} V_{xik} &= -\frac{1}{2\pi} \frac{y_k - y_i}{2\pi(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2} \\ V_{yik} &= \frac{1}{2\pi} \frac{y_k - y_i}{2\pi(x_k - x_i)^2 + (y_k - y_i)^2}, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

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

Получив развитый вихревой поток, можно построить линии тока [18] 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 ; сво-

бодных вихрей, сходящихся 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 следующим образом:

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

где Γ_{μ_r} – циркуляция μ -го присоединенного вихря r -го 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.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Используем описанную математическую модель для расчета структуры вихревого потока, линий тока и поля скорости при обтекании ветровым потоком здания и малой архитектурной постройки одинаковой длины $l_1 = l_2$ и высоты $h_1 = h_2$.

Рассмотрим три варианта: $\Delta l = 3l, \Delta l = 2l, \Delta l = l$, где Δl – 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.

Анализируя структуру вихревого потока, представленную на рис. 3–5, можно видеть,

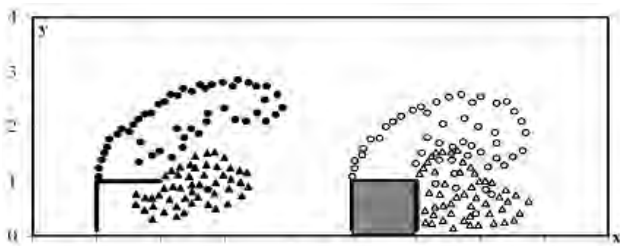


Рис. 3. Структура вихревого потока $\Delta l = 3l$

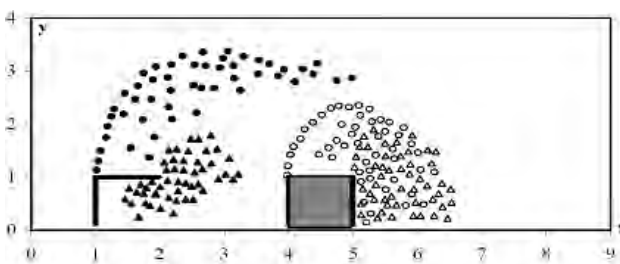


Рис. 4. Структура вихревого потока $\Delta l = 2l$

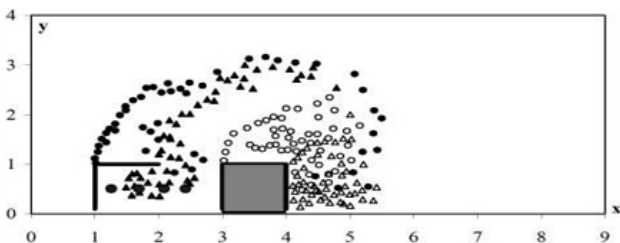


Рис. 5. Структура вихревого потока $\Delta l = l$

что если рассматриваемые объекты находятся на достаточном расстоянии друг от друга $\Delta l = 3l$ (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 $\Delta l = 2l$ (рис. 4) видно, что постепенно вихревые пелены, сходящие с малого сооружения, проникают в вихревой поток, который формируется около основного здания, и при $\Delta l = l$ (рис. 5) будут образовываться мощные порывы ветра (завихрения большой интенсивности), как в зазоре между рассматриваемыми объектами, так и внутри малого сооружения.

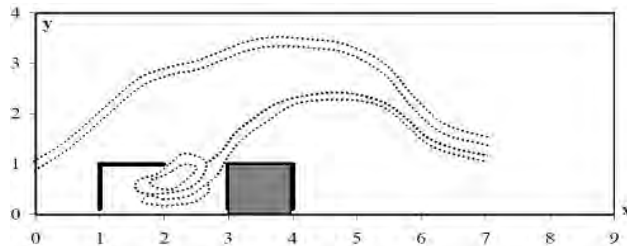


Рис. 6. Форма линий тока $\Delta l = l$

На рис. 6 представлена форма линий тока, соответствующая третьему сценарию расположения сооружений, что подтверждает образование зон возвратного течения.

МИКРОМАСШТАБНАЯ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрим трехмерную микромасштабную метеорологическую модель на примере исследования детальной ветровой обстановки в окрестностях аэропорта с учетом влияния строений различной этажности, имеющих протяженных участков растительности (лесополосы и группы отдельно стоящих деревьев) и неоднородности свойств подстилающей поверхности (асфальт или растительный покров).

Несмотря на то, что максимальная высота строений ограничена и зависит от расстояния до взлетной полосы, для их размеров характерна довольно значимая ширина и сгруппированность в одном районе. Таким образом, весь этот комплекс зданий (аэропорт, ангары, склады) при сравнительно небольшой высоте представляет собой широкий барьер на пути приземного ветра. Потoki воздуха обтекают задания сверху и сбоку, что приводит к изменению значений скорости ветра вдоль взлетно-посадочной полосы. При этом влияние препятствий на преобладающий поток воздуха зависит от многих факторов, самым важным из которых является скорость ветра и его направление относительно препятствия, а также масштаб препятствий по отношению к размерам взлетно-посадочной полосы.

Рассмотрим трехмерное стационарное турбулентное изотермическое движение несжимаемой среды над неоднородной подстилающей поверхностью с элементами крупномасштабной шероховатости. Эlemen-

ты шероховатости представляют собой прямоугольные препятствия, размеры которых соизмеримы с размерами области исследования. Пусть имеются два вида неподвижных препятствий: непроницаемые для потока здания и проницаемые массивы растительности (лесополосы) или отдельно стоящие деревья. Подстилающая поверхность: асфальт или растительный покров. Математическая модель включает в себя осредненные по Рейнольдсу уравнение неразрывности и уравнения Навье – Стокса:

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle \langle u_j \rangle}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \langle p \rangle}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial}{\partial x_j} \langle u_i' u_j' \rangle + FM_i, \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (7)$$

где $\langle u_i \rangle$ – осредненные проекции вектора скорости на оси координат Ox_i , $\langle p \rangle$ – давление, ρ – плотность, ν – кинематическая вязкость воздуха, $\langle u_i' u_j' \rangle$ – тензор напряжений Рейнольдса, FM_i – функция, описывающая влияние растительности на аэродинамику. Ось Ox_3 направлена вертикально направлению ветра.

Замыкание системы уравнений (7) проводится с использованием двухпараметрической « k - ε »-модели и градиентно-диффузионной гипотезы Буссинеска:

$$\frac{\partial \langle u_j \rangle k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P - \varepsilon + FK, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \langle u_j \rangle \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) + FE, \quad (9)$$

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon},$$

$$-\langle u_i' u_j' \rangle = \nu_T \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad (10)$$

где ν_T – турбулентная вязкость, k – кинетическая энергия турбулентности, ε – диссипация турбулентной кинетической энергии,

$P = -\langle u_i' u_j' \rangle \frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j}$ – генерация энергии турбулентности, FK , FE – функции, описывающие влияние растительности на турбулентную кинетическую энергию и диссипацию, $\sigma_k = 1$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$, $C_{\varepsilon 1} = 1.44$, $C_{\varepsilon 2} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$.

Члены в транспортных уравнениях для моделирования воздействия растительности:

уравнение Рейнольдса –

$$FM_i = -\eta C_d a \langle u_i \rangle |V|;$$

уравнение кинетической энергии турбулентности –

$$FK = \eta C_d a (\beta_p |V|^3 - \beta_d |V| k);$$

уравнение диссипации кинетической энергии турбулентности –

$$FE = C_{\varepsilon 4} \frac{\varepsilon}{k} FK.$$

В этих уравнениях η – доля подстилающей поверхности, покрытой деревьями, C_d – коэффициент сопротивления, $a = a(x_3)$ – плотность растительности в лесном массиве (например, для массива сосновых деревьев $\eta = 1$, $C_d = 0.2$, $a = 0.3125 \text{ м}^2 / \text{м}^3$), $\beta_p = 1$ – доля средней кинетической энергии потока, которая преобразовалась в турбулентную кинетическую энергию из-за сопротивления растительности, а коэффициент $\beta_d = 2.5$ – доля диссипации k из-за каскадного процесса переноса турбулентности в растительности, $C_{\varepsilon 4} = 1.5$ – эмпирическая постоянная, $|V|$ – модуль вектора скорости. Таким образом, влияние растительности учитывается с помощью дополнительных источников членов в осредненных уравнениях Навье – Стокса и в транспортных уравнениях модели турбулентности.

Для задания значений турбулентных параметров вблизи подстилающей поверхности и поверхности элементов шероховатости используется метод пристенных функций [21]. Выбор такого способа задания граничных условий для k , ε и турбулентных напряжений обусловлен тем, что турбулентные характеристики вблизи поверхности (в буферном слое и вязком подслое) имеют большие градиенты. Для описания такого поведения требуется значительное количество узловых точек при

конечно-объемном (разностном) способе решения. В то же время известно, что в зоне развитой турбулентности изменение касательной компоненты скорости в зависимости от расстояния от поверхности хорошо описывается логарифмическим законом, а энергии турбулентности – линейным. Поэтому для определения значений параметров вблизи стенки используется метод пристенных функций [21].

Краевые условия на выходе потока из расчетной области и на открытых боковых границах – это равенство нулю производных по нормали. В некоторых ситуациях, когда граничные условия на входе в расчетную область неизвестны, используются: степенной профиль для скорости ветра $u_{ref} \left(x_3 / z_{ref} \right)^{0.16}$, для кинетической энергии $k = 3/2 \left(u_{ref} Tu \right)^2$, $\varepsilon = \left(c_\mu^{3/4} \cdot k^{3/4} \right) / l$, где u_{ref} – значение модуля вектора скорости на высоте z_{ref} , l – турбулентный масштаб длины, Tu – интенсивность турбулентности. Высота шероховатости над территорией с асфальтовым покрытием прием равной 0.001 м, для остальной территории – 0.05 м.

При расчете течений вокруг зданий используется метод фиктивных областей, суть которого заключается в том, что значения векторных и скалярных величин в области преграды равны нулю и на границах фиктивных конечных объемов нет потоков диффузии, а учет трения обтекаемой поверхности осуществляется с помощью метода пристеночных функций.

Численное решение представленной выше системы дифференциальных уравнений в частных производных осуществляется на основе метода конечного объема с использованием разнесенной разностной сетки, когда значения компонента скорости определяются на гранях конечных объемов, а скалярные характеристики – в центре. Для достоверного учета влияния препятствий на направление и силу приземного ветра вблизи обтекаемых поверхностей проводилось дополнительное сгущение сетки.

После разбиения расчетной области описанным способом каждое дифференциальное

уравнение интегрируется по каждому конечному объему. При вычислении интегралов применяется кусочно-полиномиальная интерполяция для зависимых от x_1 , x_2 , x_3 величин. Аппроксимация конвективных членов уравнения переноса выполняется с использованием противопотоковой схемы MLU Ван Лиры [22].

Аппроксимация диффузионных членов осуществляется с использованием центрально-разностной схемы второго порядка. Результатом дискретизации является неявная разностная схема второго порядка аппроксимации по пространству.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЛЯ ВЕТРА

Применим рассматриваемую микромасштабную модель для расчета приземного распределения векторного поля ветра и турбулентных параметров над территорией взлетно-посадочной полосы.

Для анализа влияния разрешаемых элементов крупномасштабной шероховатости для всех рассматриваемых направлений основного ветрового потока были построены изолинии модуля относительной скорости потока W_{12} , полученные по следующей формуле:

$$W_{12} = \left(\left(\langle u_1 \rangle - \langle u_1^0 \rangle \right)^2 + \left(\langle u_2 \rangle - \langle u_2^0 \rangle \right)^2 \right)^{0.5}, \quad (11)$$

где компоненты скорости с верхним индексом «0» рассчитаны при условии отсутствия зданий и лесополосы. Результаты моделирования приведены на рис. 7 и рис. 8.

Серым цветом отмечена асфальтированная территория, прямоугольные фигуры с цифрами представляют здания с указанием высоты (м), темным цветом отмечены участки лесополосы. Внизу представлено векторное поле горизонтальной компоненты ветра на высоте 5 м. Основное направление ветра – западное.

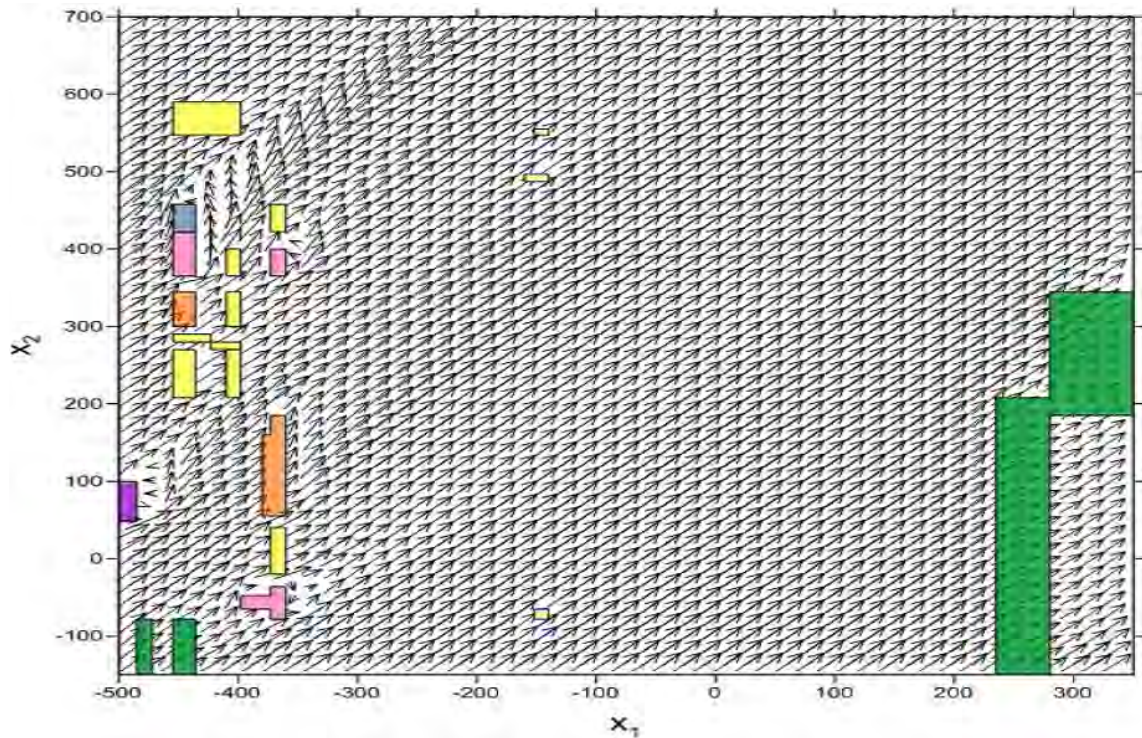


Рис. 7. Вид сверху на первую область исследования (вверху)

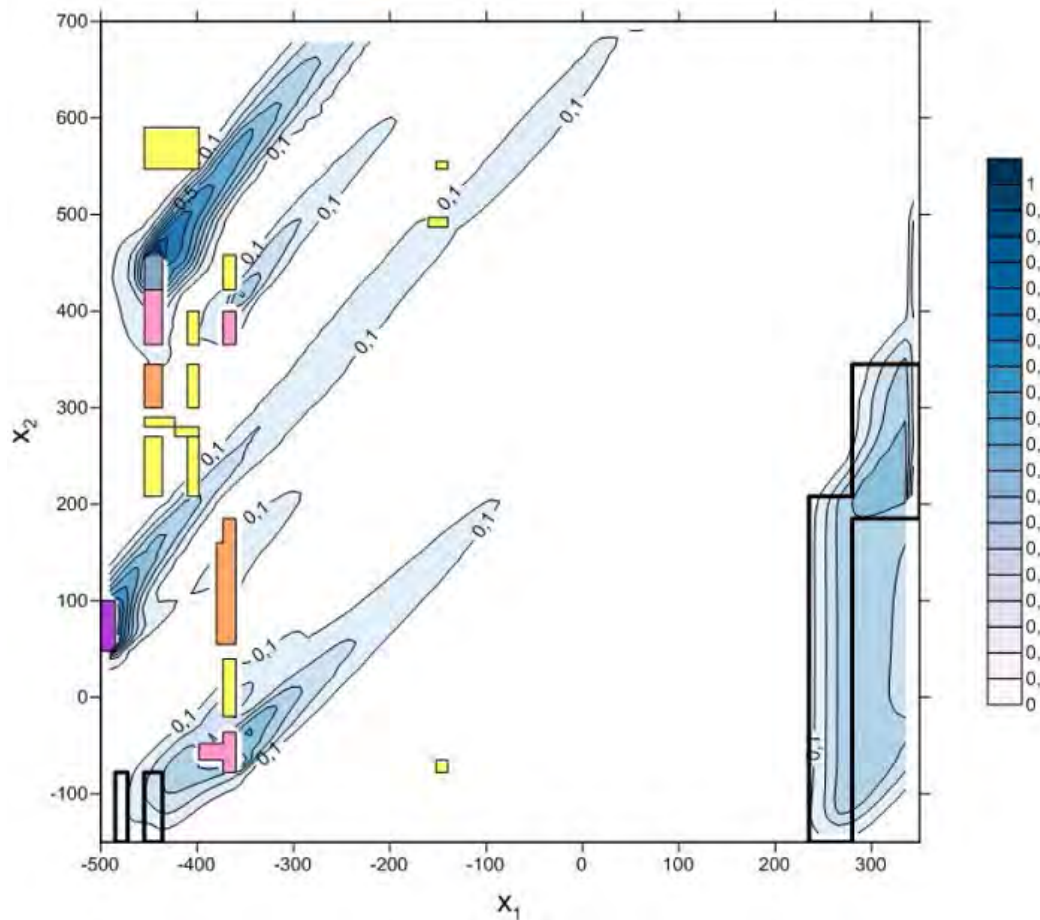


Рис. 8. Изолинии модуля вектора относительной скорости потока W_{12} (м/с) по сравнению с потоком при отсутствии зданий и лесных массивов при западном направлении ветра на высоте 10 м

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были предложены: математическая модель, на базе метода дискретных вихрей, которая позволяет построить картину линий тока, получить поле скорости ветрового потока около зданий или архитектурных сооружений; трехмерная микромасштабная метеорологическая модель на примере исследования ветровой обстановки в окрестностях аэропорта с учетом влияния строений различной этажности и неоднородности свойств подстилающей поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *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.
2. *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.
3. *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.
4. *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.
5. *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.
6. *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. – Vol2, № 2. – P. 131–143.
7. *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.
8. *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.
9. *Stathopoulos T.* Pedestrian level winds and outdoor human comfort / T. Stathopoulos // *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. – 2006. – № 94(11). – P. 769–780.
10. *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.
11. *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.
12. *Shih T.* A new k-ε 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.
13. *Белов И. А.* Взаимодействие неравномерных потоков с преградами / И. А. Белов. – Л. : Машиностроение, 1983. – 144 с.
14. *Реттер Э. И.* Архитектурно-строительная аэродинамика / Э. И. Реттер. – М. : Стройиздат, 1984. – 294 с.
15. *Белоцерковский С. М.* Математическое моделирование плоскопараллельного отрывного обтекания тел / С. М. Белоцерковский, В. Н. Котовский, М. И. Ништ. – М. : Наука, 1988. – 232 с.
16. *Белоцерковский С. М.* Моделирование отрывного обтекания цилиндра вблизи экрана / С. М. Белоцерковский, В. Н. Котовский, М. И. Ништ. // *Инженерно-физический журнал*. – 1986. – Т. 50, № 2. – С. 78–84.
17. *Русакова Т. И.* Численное исследование структуры вихревого потока около высотных сооружений / Т. И. Русакова, В. И. Карплюк //

Вісн. Дніпропетр. унту. Сер. «Механіка». – 2006. – Вип. 10, т. 1. – С. 154–160.

18. *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.

19. *Самарский А. А.* Математическое моделирование / А. А. Самарский, А. П. Михайлов. – М. : Физматлит, 2001. – 320 с.

20. *Гоман О. Г.* Численное моделирование осесимметричных отрывных течений несжимаемой жидкости / О. Г. Гоман, В. И. Карплюк, М. И. Ништ, А. Г. Судаков. – М. : Машиностроение, 1993. – 287 с.

21. *Launder B. E., Spalding D. B.* The numerical computation of turbulent flows // Computational Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974. – V. 3, № 2. P. 269–289.

22. *Van Leer B.* Towards the ultimate conservative difference scheme. II. monotonicity and conservation combined in a second order scheme // J. Computational Physics, 1974. – V. 14, P. 361–370.

23. *Матвеев М. Г.* Модель анализа динамики векторного метеорологического процесса / Матвеев М. Г. Михайлов В. В., Семенов М. Е., Сирота Е. А // Вестник Воронеж. гос. ун-та. Сер. Системный анализ и информационные технологии. – 2013. – № 1. – С. 89–94.

Сотникова О. А. – д.т.н., профессор, заведующая кафедрой Проектирования зданий и сооружений, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет. E-mail: soa63@yandex.ru

Sotnikova O. A. – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Structural Design. Voronezh State University of Architecture and Design. E-mail: soa53@yandex.ru

Мурашова Л. В. – аспирант кафедры Проектирования зданий и сооружений, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет. E-mail: soa63@yandex.ru

Murashova L. V. – Aspirant, Department of Structural Design. Voronezh State University of Architecture and Design. E-mail: soa53@yandex.ru

Маленёв А. И. – соискатель, начальник лаборатории кафедры Радиоэлектроники, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия» (г. Воронеж). E-mail: aleksandr-malenyov@yandex.ru

Malenyov A. I. – researcher, head of laboratory 203 of the Department of Radioelectronics, Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin» (Voronezh). E-mail: aleksandr-malenyov@yandex.ru

Пигарев А. Е. – к.г.н., доцент кафедры Теоретической гидрометеорологии, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия» (г. Воронеж). E-mail: pig-arev.andr@yandex.ru

Pigarev A. E. – Associate Professor, Candidate of Geographical Sciences. Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin» (Voronezh). E-mail: pigarev.andr@yandex.ru

Драбо А. И. – к.т.н., преподаватель кафедры Теоретической гидрометеорологии, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия» (г. Воронеж). E-mail: alexei002@yandex.ru

Drabo A. I. – Candidate of Technical Sciences. Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Y. A. Gagarin» (Voronezh). E-mail: alexei002@yandex.ru.