

УДК 519.6

А.В. Старченко, Е.А. Данилкин, Р.Б. Нутерман, М.В. Терентьева**ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОМАСШТАБНОЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ
МОДЕЛИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ
НАД ВЗЛЕТНО-ПОСАДОЧНОЙ ПОЛОСОЙ АЭРОПОРТА¹**

Для расчета детальной ветровой обстановки в окрестностях аэропорта с учетом влияния строений различной этажности, имеющих участки растительности и неоднородности подстилающей поверхности разработана микромасштабная метеорологическая модель. Полученные с ее использованием результаты математического моделирования помогут определить структуру потока в местах размещения аэродромных метеостанций с целью предварительной оценки степени влияния расположенных вблизи аэропорта на точность измерений, а также выявить сдвиг ветра на малых высотах, воздействующий на летные характеристики воздушных судов, выполняющих взлет или посадку.

Ключевые слова: *атмосферный пограничный слой, сдвиг ветра, моделирование турбулентности.*

Процессы, происходящие в нижней части атмосферного пограничного слоя (туманы, метели, осадки, гололедно-изморозевые отложения, конвективные явления (гроза, шквал, смерч), сдвиг ветра на небольших высотах), оказывают существенное влияние на работу наземного и воздушного транспорта, на энергообеспечение хозяйственных объектов.

Поэтому одной из актуальнейших проблем как фундаментальной, так и прикладной отраслей наук о Земле является проблема создания информационных систем мониторинга и прогнозирования состояния приземного слоя атмосферы над населенными пунктами и крупными транспортными узлами. Особое значение такие исследования приобретают в связи с необходимостью обеспечения безопасности жизнедеятельности в крупных аэропортах, где возникновение локальных неблагоприятных атмосферных явлений может привести к чрезвычайным ситуациям.

Целью данной работы является построение и апробация трехмерной микромасштабной математической модели для 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). Назначение разрабатываемой микромасштабной метеорологической модели заключается в определении явления сдвига ветра для рассматриваемой в данной работе области над взлетно-посадочной полосой в зависимости от орографических особенностей прилегающей территории (на примере аэропорта г. Томска – Богашево). Сдвиг ветра – это изменение скорости и/или направления ветра на небольшом участке траектории полета. Очень сильным сдвигом ветра считается тот, который приводит к изменению воздушной

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 (соглашение № 14.В37.21.0667) и РФФИ в рамках научных проектов № 12-05-31341, № 12-01-00433а.

скорости более чем на 15 узлов (около 8 м/с) или вертикальной скорости более чем на 500 фут/мин (2,5 м/с) [1].

Опасность сдвига ветра для авиации обусловлена его воздействием на летные характеристики воздушных судов, что выражается в потенциально неблагоприятном влиянии на безопасность полетов. Несмотря на возможность присутствия сдвига ветра в атмосфере на всех уровнях высоты, его наличие в области до 500 м особенно важно при взлете и заходе на посадку. Для воздушных судов, производящих посадку или осуществляющих набор высоты, значения относительной высоты воздушного судна и скорости близки к критическим, поэтому воздушное судно особенно восприимчиво к неблагоприятному воздействию сдвига ветра [1].

Изучению явления сдвига ветра на небольших высотах посвящен ряд работ отечественных и зарубежных авторов [2–6], кроме того во второй редакции подготовлено Руководство от международной организации гражданской авиации [1], в котором собраны имеющиеся на настоящий момент сведения по исследованию данного вопроса.

Анализ приведенных литературных источников показывает, что для возникновения явления сдвига ветра есть целый ряд причин. Однако для области исследования в окрестностях взлетно-посадочной полосы аэропорта Богашево наиболее значимыми причинами возникновения сдвига ветра являются присутствие невысоких протяженных зданий и участков тесно расположенных деревьев с одной стороны взлетно-посадочной полосы и обширная лесополоса – с другой.

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. Потоки воздуха обтекают здания 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 [2].

Физическая и математическая постановки задачи

Рассматривается трёхмерное стационарное турбулентное изотермическое движение несжимаемой среды над неоднородной подстилающей поверхностью с элементами крупномасштабной шероховатости. Элементы шероховатости представляют собой прямоугольные препятствия, размеры которых соизмеримы с размерами области исследования. Рассматривается 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 осреднённые по Рейнольдсу уравнения неразрывности и уравнения Навье – Стокса:

$$\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

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

Здесь $\langle u_i \rangle$ – 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 вверх.

Замыкание системы уравнений (2) проводится с использованием двухпараметрической « k - ε »-модели и градиентно-диффузионной гипотезы Буссинеска:

$$\frac{\partial \langle u_j \rangle k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P - \varepsilon + FK; \quad (3)$$

$$\frac{\partial \langle u_j \rangle \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P - C_{\varepsilon 2} \varepsilon) + FE; \quad (4)$$

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}; \quad -\langle u'_i u'_j \rangle = \nu_T \left(\frac{\partial \langle u_i \rangle}{\partial x_j} + \frac{\partial \langle u_j \rangle}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad (5)$$

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, $\sigma_k = 1,0$, $\sigma_\varepsilon = 1,3$, $C_{\varepsilon 1} = 1,44$, $C_{\varepsilon 2} = 1,92$, $C_\mu = 0,09$.

Члены в транспортных уравнениях для моделирования воздействия растительности

| Транспортное уравнение | Источниковый член |
|--|---|
| Уравнения 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 | $FE = C_{\varepsilon 4} \frac{\varepsilon}{k} FK$ |

Влияние растительности учитывается с помощью дополнительных источниковых членов в осредненных уравнениях Навье – Стокса и в транспортных уравнениях модели турбулентности. В таблице используются следующие обозначения [7, 8]: 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.

Для задания значений турбулентных параметров вблизи подстилающей поверхности и поверхности элементов шероховатости используется метод пристенных функций [9]. 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 в данной работе используется метод пристенных функций [9].

Краевые условия на выходе потока из расчётной области и на открытых боковых границах – это равенство нулю производных по нормали. В некоторых ситуациях, когда граничные условия на входе в расчётную область неизвестны, используются: степенной профиль для скорости ветра $u_{\text{ref}}(x_3/z_{\text{ref}})^{0.16}$, для кинетической энергии $k = 3/2(u_{\text{ref}}Tu)^2$, $\varepsilon = (c_{\mu}^{3/4} \cdot k^{3/2})/l$, 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 принималась равной 0,001 м, для остальной территории – 0,05 м.

Важно отметить, что разрабатываемая микромасштабная модель настроена на взаимодействие с имеющейся в Томском государственном университете мезомасштабной метеорологической моделью высокого разрешения [10, 11], а именно, результаты расчетов, полученные с ее применением, используются при задании граничных условий для области исследования в рамках микромасштабного моделирования.

При расчёте течений вокруг зданий использовался 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.

Аппроксимация дифференциальной задачи и численный метод решения

Численное решение представленной выше системы дифференциальных уравнений в частных производных осуществляется на основе метода конечного объема с использованием разнесенной разностной сетки, когда значения компонент скорости определяются на гранях конечных объёмов, 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 Лира [12]. Аппроксимация диффузионных членов осуществляется с использованием

центрально-разностной схемы второго порядка. Результатом дискретизации является неявная разностная схема второго порядка аппроксимации по пространству. Для согласования полей скорости и давления использовался метод SIMPLE. Разработана итерационная вычислительная процедура для согласования поля скорости и давления и последовательного решения систем сеточных уравнений – неявных дискретных аналогов адвективно-диффузионных уравнений нелинейной задачи на основе явного метода Булеева [13].

Корректность работы построенной математической модели проверена на целом ряде тестовых примеров, среди которых: поток за обращенным назад уступом, течение за отдельно стоящим деревом, течение в каверне и обтекание куба, расположенного на плоскости [8, 14].

Результаты моделирования

Рассматриваемая микромасштабная модель была применена для расчета приземного распределения векторного поля ветра и турбулентных параметров над двумя различными участками территории аэропорта Богашево г. Томска. Первая область (рис. 1) имела размеры $1500 \times 1500 \times 200$ м, расчеты проводились на сетке $161 \times 144 \times 84$. Внутри области располагались здания аэропорта, лесополоса, часть взлетно-посадочной полосы, вблизи которой находится метеорологическая станция, где постоянно в оперативном режиме производятся измерения метеопараметров приземного слоя атмосферы, в том числе скорость и направление ветра на высоте 10 м. Для этой области была выполнена серия расчетов по исследованию влияния орографии поверхности аэропорта на наблюдаемые значения силы и направления приземного ветра. В расчетах относительная скорость ветра u_{ref} принималась равной 1 м/с, а направление ветра менялось от варианта к варианту с шагом 45 градусов (рассматривались направления ветра – СВ, В, ЮВ, Ю, ЮЗ, З, СЗ, С). На рис. 1 (слева) представлена орографическая модель поверхности рассматриваемой области с указанием высоты зданий, типа неоднородности подстилающей поверхности, расположения метеостанции. При построении модели использовались данные спутниковых снимков с сайта <http://maps.yandex.ru>. Справа на рис. 1 представлено векторное поле ветра на высоте 5 м над поверхностью Земли при основном западном направлении ветрового потока. Из рисунка видно, что здания и лесной массив оказывают влияние на направление и силу приземного ветра. Особенно это влияние проявляется за относительно высокими зданиями, вертикальный размер которых составляет около 10 м. В лесном массиве модуль скорости уменьшается вследствие сопротивления растительности. Также, анализируя полученные расчетные данные, можно отметить увеличение уровня турбулентности приземного слоя атмосферы за зданиями с подветренной стороны и в лесном массиве.

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:

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

где компоненты скорости с верхним индексом «0» рассчитаны при условии отсутствия зданий и лесополосы.

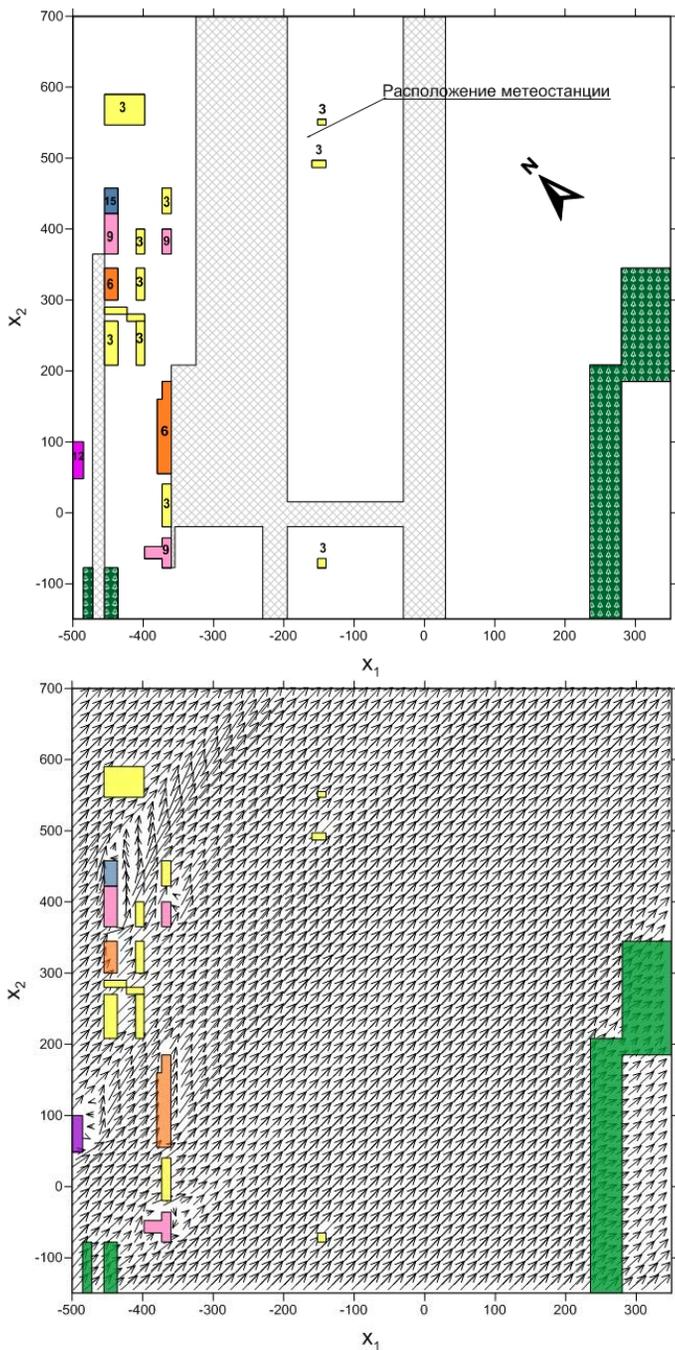


Рис. 1. Вид сверху на первую область исследования (вверху). Серым цветом отмечена асфальтированная территория, прямоугольные фигуры с цифрами представляют здания с указанием высоты (м), темным цветом отмечены участки лесополосы. Внизу представлено векторное поле горизонтальной компоненты ветра на высоте 5 м. Основное направление ветра – западное

Большие значения W_{12} соответствуют положению зон потока, где имеет место заметное влияние орографической неоднородности подстилающей поверхности. На рис. 2 для западного направления основного потока ветра представлены изолинии W_{12} на высоте 10 метров, расположение которых указывает, что при таком направлении погрешность измерения скорости приземного ветра может достигать 10 %, а при северо-западном направлении возможно увеличение погрешности за счет влияния на основной ветровой поток 15-метрового здания служб аэропорта.

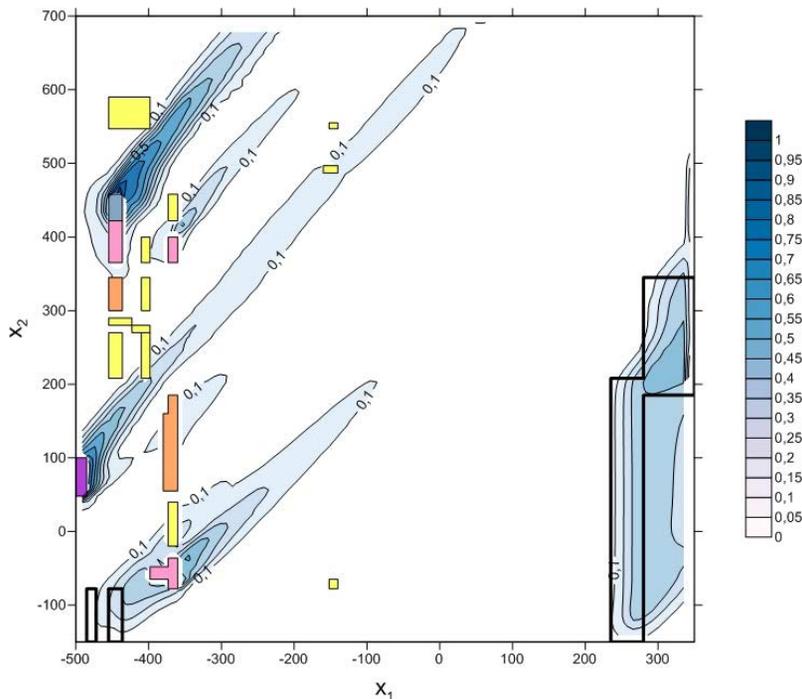


Рис. 2. Изолинии модуля вектора относительной скорости потока W_{12} (м/с) по сравнению с потоком при отсутствии зданий и лесных массивов при западном направлении ветра на высоте 10 м

Вторая расчетная область (рис. 3) была выбрана для исследования возникновения сдвига скорости ветра, вызванного элементами крупномасштабной шероховатости подстилающей поверхности на участке глиссады. Для угла наклона глиссады принято значение 3° . Направление взлетно-посадочной полосы (ВПП) ориентировано по юго-западному направлению. Размеры области составляют $4000 \times 2000 \times 150$ м. Внутри нее располагаются участки лесной растительности высотой 15 м, часть ВПП и открытая поверхность с незначительной растительностью. При расчетах выбрана сетка $144 \times 82 \times 102$. Для этой области была выполнена серия расчетов по исследованию влияния орографии поверхности аэропорта на сдвиг значения силы и направления приземного ветра. В расчетах относительная скорость ветра u_{ref} принималась равной 1 м/с, а направление ветра, так же как и для первой области, менялось от варианта к варианту с шагом 45° (рассматривались направления ветра – СВ, В, ЮВ, Ю, ЮЗ, З, СЗ, С).

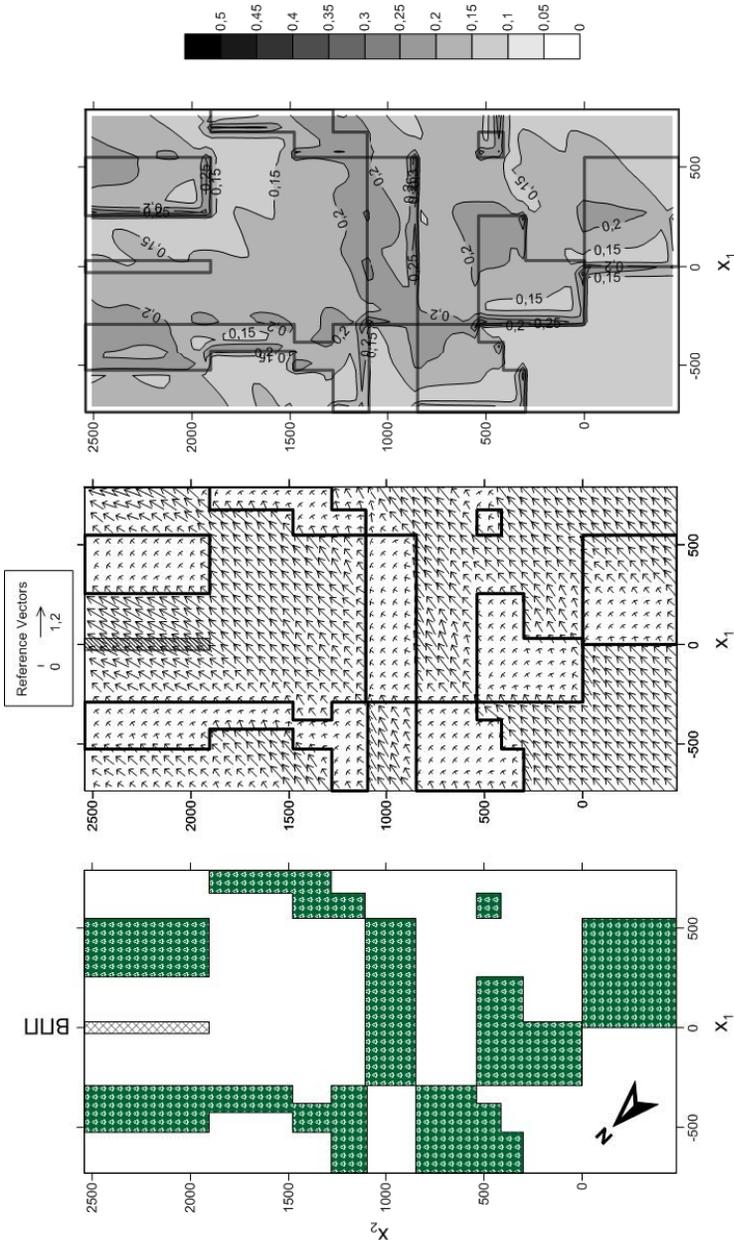


Рис. 3. Слева – вид сверху на вторую область исследования, серым цветом отмечена асфальтированная территория (ВПШ), темным цветом отмечены участки лесополосы. В центре представлено векторное поле горизонтальной компоненты ветра на высоте 5 м. Основное направление ветра – западное. Справа – изолинии интенсивности турбулентности (м/с)

На рис. 3 кроме принятой модели расположения элементов растительности и части ВПП для второй области исследования также представлены векторное поле горизонтальной компоненты приземного ветра и изолинии интенсивности турбулентности $k^{1/2}$ на высоте 5 м. Анализируя полученные распределения метеорологических характеристик, можно отметить значительное влияние лесных массивов на силу и направление ветра. Внутри массивов и за ними с подветренной стороны микромасштабная модель предсказывает снижение скорости ветра, изменение его направления, увеличение уровня турбулентного перемешивания.

Рис. 4 представляет графики изменения модуля горизонтальной компоненты скорости ветра, отнесенного к величине u_{ref} , и вариации направления ветра на глиссаде в зависимости от удаления воздушного судна от точки касания ВПП. Графики построены для четырех направлений основного ветрового потока (З, В, Ю, С). Из рисунка видно, что влияние массивов лесной растительности начинает проявляться на глиссаде, когда расстояние до земной поверхности составляет 75 и менее метров. Колебания скорости ветра на относительно небольших участках

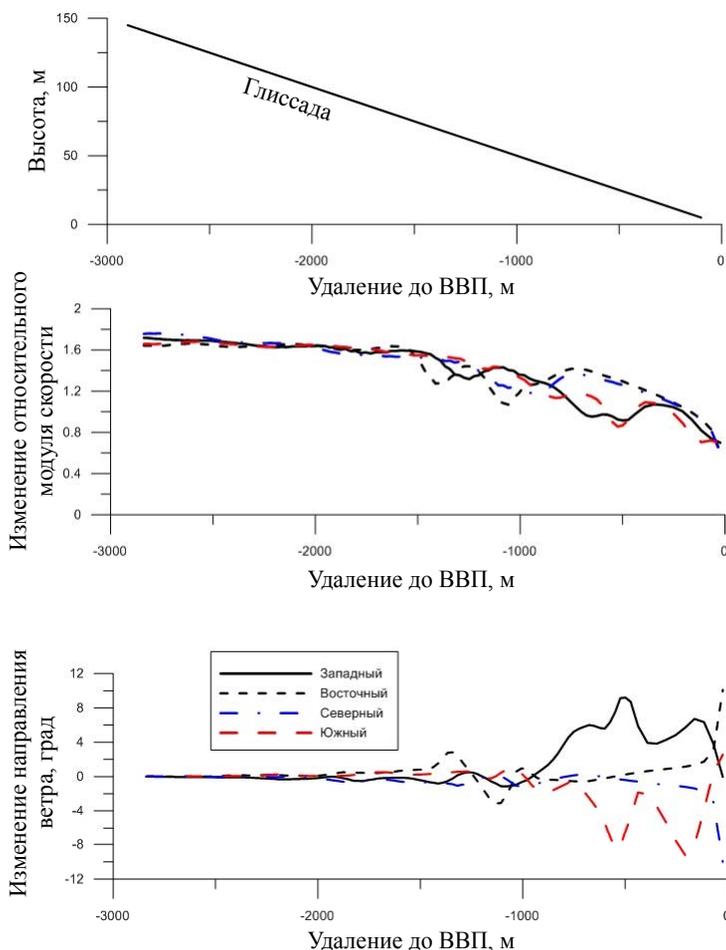


Рис. 4. Глиссада, изменение относительного модуля скорости ветра и изменение направления ветра вдоль глиссады в зависимости от удаления до ВПП

глиссады могут достигать более $0,4 u_{\text{ref}}$ (восточный ветер), что при больших значениях относительной скорости u_{ref} может давать величину сдвига ветра, близкую к критической. Изменение направления приземного ветра по глиссаде возможно на высотах ниже 50 м и по расчетным данным не превышает 10° от направления основного ветрового потока над рассматриваемой областью.

Заключение

Для расчета детальной ветровой обстановки в окрестностях аэропорта с учетом влияния строений различной этажности, имеющих участки растительности и неоднородности подстилающей поверхности разработана микромасштабная метеорологическая модель.

Микромасштабная модель была применена для анализа распределения приземной скорости ветра и интенсивности турбулентности над аэропортом Томска – Богашево, для этого были выбраны две области исследования, построены их цифровые модели, включающие описание расположения зданий, лесных массивов и асфальтированной территории. Одна область исследования предназначена для оценки погрешности измерений приземной скорости ветра аэродромной метеостанцией, вносимых орографическими элементами, вторая – для оценки величины сдвига приземного ветра, обусловленного имеющимся расположением лесной растительности.

Полученные с использованием микромасштабной модели результаты указывают, что при западном и северо-западном ветрах погрешность измерений параметров приземного ветра аэродромной метеостанцией может составлять около 10 %, а заметный сдвиг ветра на глиссаде ожидается на высотах ниже 75–50 м при больших значениях скорости основного ветрового потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Руководство по сдвигу ветра на малых высотах / Циркуляр ИКАО № 449-AN /9817.* Монреаль, ИКАО, 2005. 258 с.
2. *Исаев С.А., Белоусова Л.Ю., Баранов П.А.* Численный анализ ветрового режима в окрестности аэропорта Пулково // ИФЖ. 1999. Т. 72. № 4. С. 672–678.
3. *Бабаскин В.В., Исаев С.А., Метов Х.Т., Ченига В.Е.* Система предупреждения опасного влияния сдвига ветра // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». 2000. № 8. С. 10–16.
4. *Вышинский В.В., Судаков Г.Г.* Вихревой след самолета и вопросы безопасности полетов // Труды МФТИ. 2009. Т. 1. № 3. –С. 78–93.
5. *Cheung J.O.P., Chan P.W., Leung D.Y.C.* Large-eddy simulation of the wind flow across a terminal building on the airfield // Int. J. Earth Sciences and Engineering. 2011. V. 04. P. 486–489.
6. *Nieuwpoort A.M.H., Gooden J.H.M., de Prins J.L.* Wind criteria due to obstacles at and around airports // National Aerospace Laboratory NLR. 2010. NLR-TP-2010-312.
7. *Katul G.G., Albertson J.D.* An investigation of high-order closure models for a forested canopy // Boundary-Layer Meteorology. 1998. V. 89. P. 47–74.
8. *Нутерман Р.Б., Старченко А.В., Бакланов А.А.* Моделирование аэродинамики и распространения выбросов от автотранспорта в городском подслое // Математическое моделирование. 2010. Т. 22. № 4. С. 3–22.
9. *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.
10. *Старченко А.В.* Численное исследование локальных атмосферных процессов // Вычислительные технологии. 2005. Т. 10. С. 81–89.

11. Старченко А.В., Деги Д.В. Численное моделирование локальных атмосферных процессов с использованием многопроцессорных вычислительных систем // Научный сервис в сети Интернет: поиск новых решений: Труды Международной суперкомпьютерной конференции (17–22 сентября 2012 г., г. Новороссийск). М.: Изд-во МГУ, 2012. С. 536–541.
12. 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.
13. Ильин В.П. Методы неполной факторизации для решения алгебраических систем. М.: Физматлит, 1995. 288 с.
14. Нутерман Р.Б., Старченко А.В., Бакланов А.А. Разработка и анализ микромасштабной метеорологической модели для исследования течений воздушных масс в городской застройке // Вычислительные технологии. 2008. Т. 13. № 3. С. 37–43.

Статья поступила 08.08.2013 г.

Starchenko A.V., Danilkin E.A., Nuterman R.B., Terenteva M.V. APPLICATION OF A MICROSCALE METEOROLOGICAL MODEL FOR STUDYING THE AIRFLOW PATTERN ABOVE THE AIRPORT RUNWAY. A micro-scale meteorological model has been developed for calculating wind conditions in the vicinity of an airport with buildings of different floor numbers, vegetation, and heterogeneity of the underlying surface. The modeling results will help to determine the airflow structure around weather station sites with the aim to preliminarily estimate the effect of airport buildings on measurements quality, as well as to identify near-surface wind shear affecting aircrafts during takeoff or landing.

Keywords: Atmospheric boundary layer, wind shear, turbulence modeling

STARCHENKO Alexander Vasil'evich (Tomsk State University)

E-mail: starch@math.tsu.ru

DANILKIN Evgeniy Alexandrovich (Tomsk State University)

E-mail: ugin@math.tsu.ru

NUTERMAN Roman Borisovich (Tomsk State University,

The Niels Bohr Institute at Copenhagen University)

E-mail: nutrik@math.tsu.ru

TERENTEVA Mariya Valentinovna (Tomsk State University)

E-mail: mariya-terenteva@mail.ru