

УДК 625.768.5:004.94

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВАРИАНТОВ РАСПОЛОЖЕНИЯ СНЕГОЗАЩИТНЫХ ЭКРАНОВ В ПРИДОРОЖНОЙ ПОЛОСЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Д-р техн. наук, профессор **А.В. Кочетков**,
канд. техн. наук, доцент **Л.В. Янковский**,
д-р техн. наук, профессор **М.Г. Бояршинов**
(Пермский национальный
исследовательский политехнический университет),
канд. техн. наук, доцент **Н.В. Щеголева**
(Саратовский государственный
технический университет имени Гагарина Ю.А.),
канд. техн. наук **И.Г. Шашков**
(Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил
«Военно-воздушная академия
имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина»)
Конт. информация: soni.81@mail.ru

Представлена методика совместного проведения математического и натурного аэродинамического моделирования размещения снегозащитных экранов и процессов их взаимодействия со снеговетровыми (метелевыми) потоками при зимнем содержании автомобильных дорог общего пользования. Компьютерное моделирование течений воздушных потоков было выполнено с использованием 3D-модели с учетом окружающего рельефа местности.

Ключевые слова: *снегозаносимость, автомобильная дорога, проектирование, зимнее содержание, эксплуатация, снегозащитный экран, численное моделирование, снеговетровой поток, скорость, давление.*

Введение

Для определения эффективности применения снегозащитных экранов используются предварительные расчеты обтекания снеговетровыми (метелевыми) потоками зданий и сооружений объекта при различных начальных условиях (скоростях и направлениях ветра, изменениях рассматриваемых конструкций и месторасположений экранов). Для проведения расчетов используются методы компьютерных

CFD-технологий¹ математического моделирования, в том числе в среде SolidWorks.

Цели и задачи исследования

Цель представленного в настоящей статье пилотного проекта заключается в формировании нового научного направления: исследования вопросов зимнего содержания автомобильных дорог общего пользования на основе математического и натурного моделирования в аэродинамических трубах, а также разработке вариантов размещения снегозащитных экранов и схем их взаимодействия со снеговетровыми (метелевыми) потоками.

Практическая ценность заключается в получении достоверного визуального компьютерного представления, дополненного лабораторным моделированием показателей механико-кинематического взаимодействия (скоростей, траекторий движения и давлений) в аэродинамических трубах большого диаметра (более 1 м), а также в оценке риска снегозаносимости дорожных покрытий и эффективности применения снегозащитных экранов.

Постановка задачи

В настоящей математической модели движение текучей среды моделируется с помощью уравнений Навье-Стокса. Этими уравнениями моделируются турбулентные, ламинарные и переходные течения. Для моделирования турбулентных течений уравнения Навье-Стокса усредняются по критическому значению числа Рейнольдса, т.е. используется усредненное по малому масштабу времени влияние турбулентности на параметры потока, а крупномасштабные временные изменения усредненных по малому масштабу времени составляющих газодинамических параметров потока (давления, скоростей) учитываются введением соответствующих производных по времени [1-5].

В результате уравнения имеют дополнительные члены – напряжения по Рейнольдсу, а для замыкания этой системы уравнений используются уравнения переноса кинетической энергии турбулентности (k) и ее диссипации (ε) в рамках $k - \varepsilon$ модели турбулентности.

Эта система уравнений сохранения массы, импульса и энергии нестационарного пространственного течения имеет следующий вид в рамках подхода Эйлера в декартовой системе координат ($x_i, i = 1, 2, 3$),

¹ англ. CFD – Computational Fluid Dynamic – вычислительная гидрогазодинамика.

вращающейся с угловой скоростью Ω вокруг оси, проходящей через ее начало:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dt} + \frac{d}{dx_k}(\rho u_k) &= 0 \quad ; \\ \frac{d(\rho u_i)}{dt} + \frac{d}{dx_k}(\rho u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{dP}{dx_i} &= S_i \quad ; \\ \frac{d(\rho E)}{dt} + \frac{d}{dx_k}((\rho E + P)u_k + q_k - \tau_{ik}u_i) &= S_k u_k + Q_H \quad ; \end{aligned}$$

где

t – время;

u – скорость текучей среды;

ρ – плотность текучей среды;

P – давление текучей среды;

S_i – внешние массовые силы, действующие на единичную массу текучей среды:

$S_{iporous}$ – действие сопротивления пористого тела;

$S_{igravity}$ – действие гравитации;

$S_{irotation}$ – действие вращения системы координат, т.е.

$$S_i = S_{iporous} + S_{igravity} + S_{irotation} \quad ;$$

E – полная энергия единичной массы текучей среды;

Q_H – тепло, выделяемое тепловым источником в единичном объеме текучей среды;

τ_{ik} – тензор вязких сдвиговых напряжений;

q_i – диффузионный тепловой поток; нижние индексы означают суммирование по трем координатным направлениям.

Для ньютоновских текучих сред тензор вязких сдвиговых напряжений определяется следующим образом:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{du_i}{dx_j} + \frac{du_j}{dx_i} - \frac{2}{3} \frac{du_l}{dx_l} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad ,$$

где

$\mu = \mu_l + \mu_t$;

μ_l – коэффициент динамической вязкости;

μ_t – коэффициент турбулентной вязкости;

δ_{ij} – дельта-функция Кронекера ($\delta_{ij} = 1$, при $i = j$; $\delta_{ij} = 0$, при $i \neq j$);

k – кинетическая энергия турбулентности.

В соответствии с $k - \varepsilon$ моделью турбулентности μ_t определяется через величины кинетической энергии турбулентности k и диссипации этой энергии ε :

$$\mu_t = f_\mu \frac{C_\mu \rho k^2}{\varepsilon} ,$$

где

$$f_\mu = [1 - \exp(-0,025R_y)]^2 \cdot \left(1 + \frac{20,5}{R_T}\right) ;$$

$$R_y = \frac{\rho \sqrt{k} y}{\mu_l} ; R_T = \frac{\rho k^2}{\mu_l \varepsilon} ,$$

y – расстояние от поверхности стенки;

$$C_\mu = 0,09.$$

Кинетическая энергия турбулентности k и диссипации этой энергии ε определяется в результате решения следующих двух уравнений:

$$\frac{d\rho k}{dt} + \frac{d}{dx_k}(\rho u_k) = \frac{d}{dx_k} \left(\left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{dk}{dx_k} \right) + S_k ;$$

$$\frac{d\rho \varepsilon}{dt} + \frac{d}{dx_k}(\rho u_k \varepsilon) = \frac{d}{dx_k} \left(\left(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{d\varepsilon}{dx_k} \right) + S_\varepsilon ,$$

где

$$S_k = \tau_{ij}^R \frac{du_i}{dx_j} - \rho \varepsilon + \mu_l P_B ;$$

$$S_\varepsilon = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \left(f_1 \tau_{ij}^r \frac{du_i}{dx_j} + \mu_l C_B P_B \right) - C_{\varepsilon 2} f_2 \frac{\rho \varepsilon^2}{k} ;$$

$$\tau_{ij}^R = \mu_t \left(\frac{du_i}{dx_j} + \frac{du_j}{dx_i} - \frac{2}{3} \frac{du_l}{dx_l} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} ;$$

$$P_B = - \frac{g_i}{\sigma_B} \frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx_i} ;$$

g_i – составляющая гравитационного ускорения в координатном направлении x_i ;

$$\sigma_B = 0,9;$$

$$C_B = 1 \text{ при } P_B > 0 \text{ и } C_B = 0 \text{ при } P_B \leq 0;$$

$$f_1 = 1 + \left(\frac{0,05}{f_\mu} \right)^3 ;$$

$$f_2 = 1 - \exp\left(-R \frac{z}{T}\right);$$

$$C_{\varepsilon 1} = 1,44 ;$$

$$C_{\varepsilon 2} = 1,92 ;$$

$$\sigma_{\varepsilon} = 1,3 ;$$

$$\sigma_k = 1 .$$

Для моделирования ламинарных течений данная система уравнений несколько модифицируется, а именно полагается $\mu_t = 0$ и $k = 0$.

С помощью функции f_{μ} моделируется переход ламинарного течения в турбулентное и турбулентного в ламинарное.

Ламинарные и турбулентные пограничные слои течения около поверхностей твердого тела, а также переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный и, наоборот, турбулентного в ламинарный моделируются с высокой точностью с помощью модифицированных пристеночных функций [6-9].

Для сжимаемых текучих сред используется уравнение состояния следующего вида:

$$\rho = \rho(P, T, y) ,$$

где

$y = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ – вектор концентраций компонентов текучей среды.

Для газов используется уравнение состояния идеального газа:

$$\rho = P/(RT) ,$$

где

R – газовая постоянная моделируемого газа (смеси газов) с учетом молекулярных масс компонентов смеси газов.

Математическое аэродинамическое моделирование

Компьютерное моделирование течений воздушных потоков было проведено с использованием 3D-модели с учетом окружающего рельефа местности [9-13].

Были приняты следующие начальные условия:

1. скорость снеговетрового потока: 25 м/с;
2. направление ветра: юго-восточное;

3. угол наклона направления потока воздуха к горизонтали, обусловленный наличием части горного склона в пределах расчетной области: -6° .

Расчет проводился для снегозащитных экранов высотой 6 м, расположенных на верхней границе откоса на южном, юго-восточном и северо-восточном направлениях относительно объекта. Пример экрана в твердой визуализации, подготовленной для математического аэродинамического моделирования, представлен на **рис. 1**.

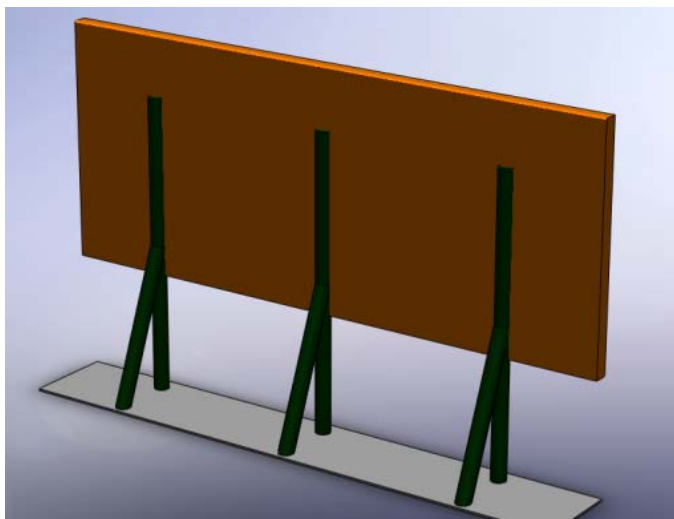
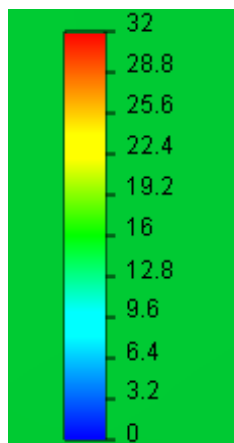


Рис. 1. Пример снегозащитного экрана (фрагмент)

На **рис. 2** представлена цветовая дифференциация скоростей снеговетровых потоков, рассчитанная с помощью программы математического аэродинамического моделирования. Каждый цвет на шкале соответствует определенной скорости движения снеговетрового потока на конкретном участке. Так, синий цвет соответствует скоростям от 0 до 6 м/с, голубой – от 7 до 12 м/с, зеленый – от 13 до 19 м/с, желтый – 20-25 м/с (что соответствует начальной скорости ветра), оранжевый – от 25,5 до 28 м/с, красный – от 29 м/с и выше.

Рис. 2. Цветовая шкала скоростей снеговетрового потока



Проведенные в математическом аэродинамическом моделировании расчеты показывают, что воздушные потоки на высотах от 0 до 1,5-2 м над поверхностью земли (поземка) при отсутствии препятствий значительно теряют свою скорость при прохождении кромки откоса (**рис. 3**). Она падает с первоначальных 25 м/с до 16-18 м/с, т.е. на 30-40 % (зеленая зона слева от откоса на **рис. 3**), что способствует увеличению выпадения снега в этой области.

На **рис. 3** представлено сечение результатов математического аэродинамического моделирования в вертикальной плоскости экрана, вид сбоку.



Рис. 3. Сечение результатов математического аэродинамического моделирования в вертикальной плоскости экрана

Обсуждение результатов

Анализ изображений, показанных на **рис. 2** и **3**, подтверждает, что в случае наличия снегозащитного экрана резко увеличивается площадь (на данной высоте), на которой скорость ветра не превышает 9-11 м/с.

Результаты были подтверждены при макетном натурном моделировании на опытном стенде – в аэродинамической трубе – кафедры вычислительного эксперимента в механике Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского.

Диаметр аэродинамической трубы – 1 м. Были изготовлены макеты снегозащитных экранов с учетом модельного соответствия (высота не более 0,3 м). Метель визуализировалась дымом или легкопереносимым белым материалом. Процесс снимался на видеокамеру, в характерных зонах устанавливались датчики давления. Результаты математического и натурального моделирования показали хорошее соответствие на качественном уровне; относительная погрешность результатов математического моделирования в сравнении с натурным составила 20-45 %.

ВЫВОДЫ

1. Впервые опробована методика совместного проведения математического и натурального аэродинамического моделирования размещения снегозащитных экранов и процессов их взаимодействия со снеговетровыми (метелевыми) потоками при зимнем содержании автомобильных дорог общего пользования.
2. Полученные экспериментальные результаты рекомендуются для теоретического и практического применения и дальнейшего совершенствования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Реттер Э.И. *Архитектурно-строительная аэродинамика* / Э.И. Реттер – М.: Стройиздат, 1984. – 294 с.
2. СНиП 2.01.07–85*. *Нагрузки и воздействия* / Госстрой СССР. — М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 36 с.
3. *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures* / ASCE Standard, SEI/ASCE 7-05. – Электрон. данные. – URL: <http://bookre.org/reader?file=1084610&pg=1> (дата обращения 05.10.2018).
4. Гутников В.А. *Математическое моделирование аэродинамики городской застройки* / В.А. Гутников [и др.]; РАН, Ин-т вычислительной математики. – М.: ПАСЬВА, 2002. – 243 с.

5. *Исаев С.А., Судаков А.Г., Харченко В.Б., Усачов А.Е. Численное моделирование турбулентных отрывных течений в задачах внешней аэродинамики с помощью многоблочных вычислительных технологий. Модели и методы аэродинамики: материалы Шестой Международной школы-семинара, Евпатория, 5-14 июня, 2006 г. – М.: МЦНМО, 2006.*
6. *Старков А.Н. Атлас ветров России / А.Н. Старков, П.П. Безруких, Л. Ландберг, М.М. Борисенко – М.: Изд-во Можайск-Терра, 2000.*
7. *Савицкий Г.А. Ветровая нагрузка на сооружения / Г.А. Савицкий.– М.: Стройиздат, 1972.– 112 с.*
8. *Симиу Э. Воздействие ветра на здания и сооружения / Э. Симиу, Р. Сканлан. – М.: Стройиздат, 1984.– 360 с.*
9. *Ушаков В.В. Совершенствование конструкций снегозадерживающих устройств на основе моделирования их работы / В.В. Ушаков, Д.Ю. Корнеева // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2015. – № 4 (74). – С. 7-10.*
10. *Wind Engineering – Building Aerodynamics. – Электрон. ресурс. – Force Technology. – Электрон. данные. – URL: www.force.dk (дата обращения 29.10.2018).*
11. *Hoerner S.F. Fluid-Dynamic Drag: Theoretical, Experimental and Statistical Information / S.F. Hoerner. – Washington: Walter, 1965. – 455 p.*
12. *Lawson T. Building Aerodynamic / Lawson T. – London: Imperial College Press, 2001. – 286 p.*
13. *STAR-CD. Version 3.20. Methodology. – Электрон. ресурс. – CD Adapco Group, Computational Dynamics Limited, 2004.*

L I T E R A T U R A

1. *Retter Je.I. Arhitekturno-stroitel'naja ajerodinamika / Je.I. Retter – М.: Strojizdat, 1984. – 294 s.*
2. *SNiP 2.01.07-85*. Nagruzki i vozdejstvija / Gosstroj SSSR. – М.: CITP Gosstroja SSSR, 1988. – 36 s.*
3. *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures / ASCE Standard, SEI/ASCE 7-05. – Jelektron. dannye. – URL: <http://bookre.org/reader?file=1084610&pg=1> (data obrashhenija 05.10.2018).*
4. *Gutnikov V.A. Matematicheskoe modelirovanie ajerodinamiki gorodskoj zastrojki / V.A. Gutnikov [i dr.]; RAN, In-t vychislitel'noj matematiki. – М.: PAS"VA, 2002. – 243 s.*
5. *Isaev S.A., Sudakov A.G., Harchenko V.B., Usachov A.E. Chislennoe modelirovanie turbulentnyh otrivnyh techenij v zadachah vneshnej ajerodinamiki s pomoshh'ju mnogoblochnyh vychislitel'nyh tehnologij. Modeli i metody ajerodinamiki: materialy Shestoj Mezhdunarodnoj shkoly-seminara, Evpatorija, 5-14 ijunja, 2006 g. – М.: MCNMO, 2006.*

6. Starkov A.N. *Atlas vetrov Rossii / A.N. Starkov, P.P. Bezrukih, L. Landberg, M.M. Borisenko – M.: Izd-vo Mozhaysk-Terra, 2000.*
7. Savickij G.A. *Vetrovaja nagruzka na sooruzhenija / G.A. Savickij.– M.: Strojizdat, 1972.– 112 s.*
8. Simiu Je. *Vozdejstvie vetra na zdaniya i sooruzhenija / Je. Simiu, R. Skanlan.–M.: Strojizdat, 1984.– 360 s.*
9. Ushakov V.V. *Sovershenstvovanie konstrukcij snegozaderzhivajushhih ustrojstv na osnove modelirovanija ih raboty / V.V. Ushakov, D.Ju. Korneeva // Nauka i tehnika v dorozhnoj otrasli. – 2015. – # 4 (74). – S. 7-10.*
10. *Wind Engineering – Building Aerodynamics. – Jelektron. resurs. – Force Technology. – Jelektron. dannye. – URL: www.force.dk (data obrashhenija 29.10.2018).*
11. Hoerner S.F. *Fluid-Dynamic Drag: Theoretical, Experimental and Statistical Information / S.F. Hoerner. – Washington: Walter, 1965. – 455 p.*
12. Lawson T. *Building Aerodynamic / Lawson T. – London: Imperial College Press, 2001. – 286 p.*
13. *STAR-CD. Version 3.20. Methodology. – Jelektron. resurs. – CD Adapco Group, Computational Dynamics Limited, 2004.*

COMPUTATIONAL MODELING OF VARIANTS OF SNOW FENCES POSITIONING AT ROADSIDE

*Doctor of Engineering, Professor **A.V. Kochetkov**,
Ph. D. (Tech.), Associated Professor **L.V. Yankovskiy**,
Doctor of Engineering, Professor **M.G. Boyarshinov**
(Perm National Research Polytechnic University),
Ph. D. (Tech.), Associated Professor **N.V. Schegoleva**
(Yuri Gagarin State Technical University of Saratov),
Ph. D. (Tech.) **I.G. Shashkov**
(Russian Air Force Military Educational
and Scientific Center
«Air Force Academy named
after Professor N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin»)»
Contact information: soni.81@mail.ru*

The article dwells upon a method for the joint realizing of mathematical and full-scale aerodynamic modeling of the snow fences positioning, as well as the processes of their interaction with the snow-and-wind (snow-drifting) streams, when carrying out winter maintenance of public roads. The airstreams computational modeling is performed using a 3D model taking into account the surrounding terrain.

Key words: *snow drifts, road, design, winter maintenance, operation, snow fence, computational modeling, snow-and-wind stream, velocity, pressure.*

Рецензент: главный эксперт по вопросам ремонта и содержания автомобильных дорог Ю.Н. Розов (ФАУ «РОСДОРНИИ»).

Статья поступила в редакцию: 20.08.2018 г.