Интернет-журнал «Науковедение» ISSN 2223-5167 https://naukovedenie.ru/

Том 9, №6 (2017) https://naukovedenie.ru/vol9-6.php

URL статьи: https://naukovedenie.ru/PDF/99TVN617.pdf

Статья опубликована 17.02.2018

Ссылка для цитирования этой статьи:
Степанов Р.Н., Роменский Д.И., Мущанов В.Ф., Зубенко А.В., Цепляев М.Н. Ветровая нагрузка на вертикальный цилиндрический резервуар // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №6 (2017) https://naukovedenie.ru/PDF/99TVN617.pdf (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 624.014

Степанов Роман Николаевич
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
Россия, Москва[1]
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: rnstepanov@gmail.com

Роменский Денис Игоревич
ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
Россия, Москва
Старший преподаватель
Кандидат технических наук
E-mail: rdi777@bk.ru

Мущанов Владимир Филиппович
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», Украина, Макеевка
Проректор по научной работе, заведующий кафедрой
Доктор технических наук, профессор
E-mail: volodymyr.mushchanov@mail.ru

Зубенко Анна Васильевна
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», Украина, Макеевка
Ассистент
E-mail: zubenkoanna@dr.com

Цепляев Максим Николаевич
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры», Украина, Макеевка
Ассистент
E-mail: m.n.cepliaev@donnasa.ru

Ветровая нагрузка на вертикальный цилиндрический резервуар

Аннотация. В статье выполнен аналитический обзор результатов проведенных научных исследований в сфере изучения воздействия ветровой нагрузки на сооружения, имеющие круговую цилиндрическую поверхность, а именно вертикальных цилиндрических резервуаров больших объемов. Выделены особенности исследуемых подходов в виде достоинств и недостатков, связанных с различными методиками определения ветровой нагрузки, используемые в современных отечественных и зарубежных нормативных документах. Особое внимание уделено численному определению аэродинамических коэффициентов на

[1] 129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

поверхностях вертикальных цилиндрических резервуаров и их групп. Сформулированы недостаточно изученные вопросы в области определения нагрузок и воздействий на одиночные вертикальные цилиндрические резервуары и их группы. Выполнено аналитическое сравнение методов компьютерного моделирования турбулентных ветровых течений, основанных на решении уравнений Рейнольдса, возникающих вследствие применения осреднения уравнений Навье-Стокса. Рассмотрены основные модели турбулентности такие как: k-ε модель Standard; Re-Normalisation Group k-ε модель; Realizable k-ε модель; Standart k-ω модель; Shear-Stress Transport k-ω модель; Reynolds Stress Model модель. Проанализирована возможность выбора той или иной модели в зависимости от свойств и характеристик ветрового потока, для применения в численном моделировании обтекания ветром специфических цилиндрических поверхностей.

Ключевые слова: ветровая нагрузка; вертикальный цилиндрический резервуар; аэродинамический коэффициент; уравнения Рейнольдса; уравнения Навье-Стокса; турбулентность; ветровой поток

Введение

Для анализа поведения сооружений при воздействии ветровой нагрузки существуют различные способы определения значений аэродинамических параметров, используя аналитические и опытные данные. На сегодняшний день наиболее развитым считается численный метод определения методы вышеупомянутых характеристик, основанного на численном решения системы уравнений Навье-Стокса.

Точность результатов, полученных с использованием такого расчетного метода для получения значений аэродинамических сил возросла вследствие пересмотра математических моделей и развития СОФТа для дескретизации тел рассматриваемых объектов.

1. Анализ результатов научных исследований и нормативных документов

Существующие принципы (методики) определения характера и значений ветрового давления на объекты различных конструктивных форм, предложены в середине XX века специалистами ЦНИИСК им. Кучеренко опираясь на результаты, полученные в работах А. Давенпорта и А. Вайза, с последующей реализацией в профильном нормативном документе[2]. В 1985 г. при выпуске стандарта[3] были упрощены зависимости, характеризующие динамическое поведение строительных конструкций в условиях ветровых воздействий [1].

Основные теоретические сведения об архитектурно-строительной аэродинамике, методиках определения ветровой нагрузки на здания и сооружения представлены в работах: Э. Симиу, Р. Сканлан, Э. И. Реттер, Б. Г. Коренева, И. М. Рабиновича [2-7]. Работы Е. В. Горохова, С. Г. Кузнецова [8], М. А. Березина, В. В. Катюшина [9], посвящены определению ветровых воздействий на здания и сооружения в аэродинамической трубе. В работах Р. И. Кинаша, R. J. Holroyd, M. C. Hort, P. A. MacDonald [10-16] описано экспериментальное моделирование взаимодействия ветрового потока с инженерными сооружениямиb в аэродинамической трубе. В книгах Е. В. Горохова [17] и П. Г. Еремеева [18] представлены результаты модельных

[2] СНиП II-6-74. Нагрузки и воздействия. – М.: Изд. ЦИТП Госстроя СССР, 1976. – 58 с.

[3] СНиП 2.01.07-85. Нагрузки и воздействия. – М.: Изд. ЦИТП Госстроя СССР, 1988. – 36 с.

экспериментальных исследований ветровых и снеговых нагрузок на технически сложные большепролетные покрытия со сложной геометрией.

Также, отдельным аспектам численного моделирования ветровых воздействий посвящены исследования S. Murakami, A. Moshida, Y. Tominaga, T. Shirasawa [19-22] и др.

1.1 Нормативные методики определения ветровой нагрузки

Проанализируем действующие нормативные документы, по определению ветрового воздействия на здания и сооружения для Украины, России и стран объединенной Европы.

1.1.1 Методика, действующая в Украине

В Украине действует нормативный документ[4,5], в соответствии с приведенной классификацией, ветровая нагрузка относится к основной переменной нагрузке, для которой устанавливаются два расчетных значения: предельное и эксплуатационное. В расчет включены, в частности, нормативное значение ветрового давления, определяемое по картам районирования территории, тип местности (открытые пространства, территории равномерно покрытые препятствиями высотой более 10 м, городские районы с застройкой зданиями высотой более 25 м), и расчет ведется по формуле:

$$w_m = \gamma_{fm} w_0 C, \quad (1)$$

где: γ_{fm} – коэффициент надежности по предельному значению ветровой нагрузки; w_0 – характеристическое значение ветрового давления.

$$\mathrm{C} = C_{aer} \cdot C_h \cdot C_{alt} \cdot C_{rel} \cdot C_d \cdot C_{dir} \quad (2)$$

где: C_{aer} – аэродинамический коэффициент, C_h – коэффициент высоты сооружения, C_{alt} – коэффициент географической высоты, C_{rel} – коэффициент рельефа, C_d – коэффициент динамичности, C_{dir} – коэффициент направления.

1.1.2 Методика, действующая в Российской Федерации (РФ)

Нормативный документ[6] СП 20.13330.2011 требует учитывать для зданий и сооружений следующие воздействия ветра:

а) основной тип ветровой нагрузки;

б) пиковые значения ветровой нагрузки, действующие на конструктивные элементы ограждения и элементы их крепления;

в) резонансное вихревое возбуждение;

г) аэродинамические неустойчивые колебания типа галопирования, дивергенции и флаттера.

---

[4] ДБН В.1.2-2:2006. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. – Взамен СНиП 2.01.07-85, кроме раздела 10. – Київ: Изд. Минстрой Украины, 2006. – 78 с.

[5] ЗМІНА № 1 ДБН В.1.2-2:2006. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. – 2 с.

[6] СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – М.: Изд. Госстандарт, 2011. – 80 с.

Резонансное вихревое возбуждение и аэродинамические неустойчивые колебания типа галопирования необходимо учитывать для зданий и сплошностенчатых сооружений, у которых $h/d > 10$, где h – высота, d – характерный поперечный размер.

Нормативное значение ветровой нагрузки следует определяется как сумму средней w_m и пульсационной составляющих w_p:

$$w = w_m + w_p \tag{3}$$

Нормативное значение средней составляющей ветровой нагрузки w_m в зависимости от эквивалентной высоты z_e над поверхностью земли следует определять по формуле

$$w_m = w_0 k(z_e) c \tag{4}$$

где: w_0 – нормативное, значение ветрового давления;

$k(z_e)$ – коэффициент, учитывающий изменение ветрового давления для высоты z_e;

c – аэродинамический коэффициент.

Для сооружений и конструктивных элементов с круговой цилиндрической поверхностью, таких как резервуар.

1.1.3 Методика, действующая в странах объединённой Европы

При определении ветровой нагрузки по нормам Европы[7] учитываются: скорость ветра, определяемая по карте районирования территории, рельеф местности (месторасположение здания относительно склона), тип местности (центр города, пригород, открытые территории, прибрежная зона), назначение строящегося здания (коэффициент важности), динамическая составляющая.

Нормальное, характеристическое значение ветрового давления w_e, приложенное к внешней поверхности сооружения или элемента, определяется по формуле:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \tag{5}$$

где: $q_p(z_e)$ – пиковый скоростной напор на высоте z_e внешней поверхности сооружения или элемента; c_{pe} – аэродинамический коэффициент внешнего давления.

Пиковый скоростной напор $q_p(z_e)$, определяется по формуле:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e(z) \cdot q_b \tag{6}$$

где: $I_v(z)$ – интенсивность турбулентности,

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = \frac{k_I}{c_o(z) \cdot \ln(z/z_0)} \tag{7}$$

k_I – коэффициент турбулентности, при $k_I = 1$ $I_v(z) = \frac{1}{\ln(z/z_0)}$;

ρ – плотность воздуха, при t = 20 °C $\rho = 1.2$ кг/м^3;

$v_m(z)$ – средняя скорость на высоте z, определяемая как:

[7] Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-4. Загальні дії. Вітрові навантаження: ДСТУ-Н Б EN 1991-1-4:2010 (EN 1991-1-4:2005, IDT). К.: Изд. Мінрегіон України, 2012. – 18 с.

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b; \quad (8)$$

$c_r(z)$ – коэффициент неровности поверхности, зависит от типа местности, и определяется:

$$c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0.156 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right); \quad (9)$$

k_r – коэффициент местности, зависит коэффициента шероховатости z_0 и определяется:

$$k_r = 0{,}19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0.07}; \quad (10)$$

при $z_0 = 0{,}003$ для типа местности I (открытые поверхности, море или прибрежная зона)

$$k_r = 0.19 \cdot \left(\frac{0.003}{0.05}\right)^{0.07} = 0.156;$$

$z_{0,II}$ – коэффициента шероховатости для типа местности II, $z_{0,II} = 0{,}05$ м;

$c_o(z)$ – коэффициент рельефа, для основной скорости $c_o(z) = 1$;

$c_e(z)$ – коэффициент экспозиции;

q_b – базовый скоростной напор, $q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_{b_0}^2$;

v_b – базовая скорость,

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b,0}; \quad (11)$$

c_{dir} – коэффициент направления; c_{season} – коэффициент сезонности, используется для временных конструкций и конструкций в стадии возведения, $c_{season} = 1$.

Подставив, для местности I соответствующие коэффициенты, получим формулу для описания ветрового профиля:

$$v_m(z) = c_r(z) \cdot c_o(z) \cdot v_b = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot v_{b_0} = 0.156 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \cdot v_{b_0}.$$

Также для описания турбулентности необходимо по европейским нормам определять интегральный масштаб турбулентности:

$$\mathrm{L(z)} = \mathrm{L_t}\left(\frac{\mathrm{z}}{\mathrm{z_t}}\right)^{\alpha} \quad (12)$$

где: z_t = 200 м – базовая высота; L_t = 300 м – базовый масштаб; $\alpha = 0{,}67 + 0{,}05 \ln(z_0)$; z_0 – длина неровности, $z_0 = 0{,}003$ для открытых поверхностей.

Сравнение основных общих параметров методик приведены в таблице 1.

Таблица 1

Общие параметры методик по нормам (составлено авторами)

Страна	ДБН[8,9] (Украина)	СП[10] (Россия)	ЄВРОКОД 1[11] (Украина)
Рельеф	оговаривается	не учитывается	оговаривается
Кол-во типов местности	4	3	5
Количество ветровых районов	5	7	5
Изменение ветрового давления для высоты (z_e)	Таблично [33]	$k(z_e) = k_{10}\left(\frac{z_e}{10}\right)^{2\alpha}$ $k_{10} = 1; \alpha = 0.15$ – для типа местности А	$c_e(z) = = \left[\ln\left(\frac{z}{z_0}\right) + 7\right] \cdot k_r^2 \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right)$ Для типа местности I
Закон изменения ветрового давления	логарифмический	степенной	логарифмический
Интенсивность турбулентности	не представлена	косвенно фигурирует и представлена коэффициентом пульсаций $\zeta(z_e) = \zeta_{10} \cdot (z/\alpha)^{-\alpha}$	$I_v(z) = \frac{1}{\ln(z/z_0)}$ (см. формулу 7)
Интегральный продольный масштаб турбулентности	не представлен	Не зависит от высоты и принимается равным $L_v = 1200$м [29]	$\mathrm{L(z)} = \mathrm{L_t}\left(\frac{\mathrm{z}}{\mathrm{z_t}}\right)^{\alpha}$ (см. формулу 12)

На рисунке 1 показан сравнительный анализ по трем методикам для коэффициента экспозиции, который учитывает изменение профиля ветрового потока по высоте (графики построены только для определения среднего скоростного напора на высоте z, без учета пульсаций продольной компоненты скорости ветра). Тип местности 0 для ДБН и Eurocode, тип местности А – СП, что соответствует открытой местности, побережьям морей.

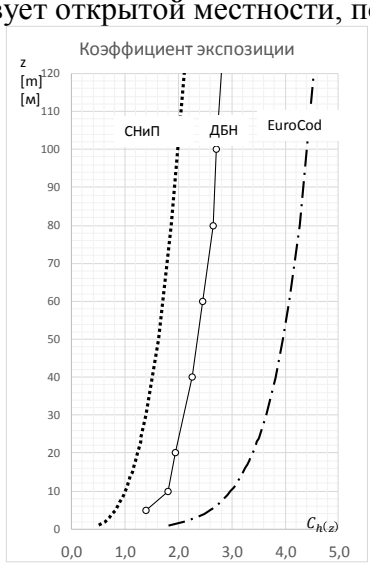


Рисунок 1. *Сравнение коэффициентов экспозиции C_h по рассматриваемым методикам в нормативных документах Украины, России и Европы (составлено авторами)*

---

[8] ДБН В.1.2-2:2006. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. – Взамен СНиП 2.01.07-85, кроме раздела 10. – Київ: Изд. Минстрой Украины, 2006. – 78 с.

[9] ЗМІНА № 1 ДБН В.1.2-2:2006. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. – 2 с.

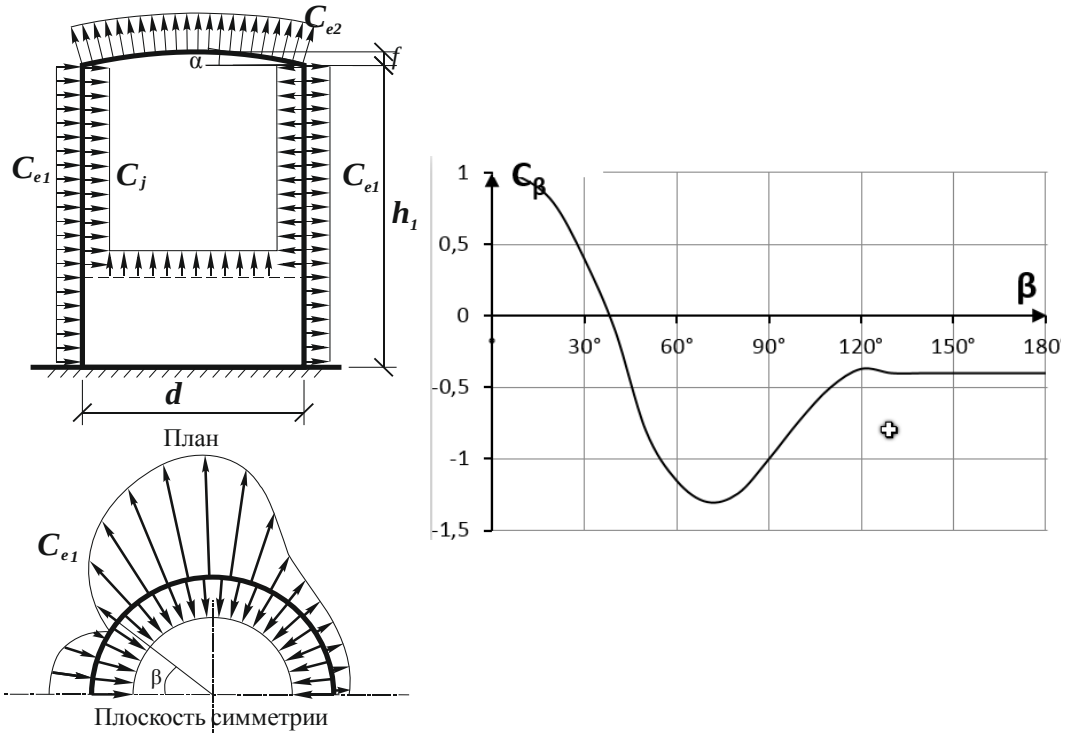
[10] СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – М.: Изд. Госстандарт, 2011. – 80 с.

[11] Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-4. Загальні дії. Вітрові навантаження: ДСТУ-Н Б EN 1991-1-4:2010 (EN 1991-1-4:2005, IDT). К.: Изд. Мінрегіон України, 2012. – 18 с.

Анализируя вышеприведенные методики, можно сказать, что в нормах Еврокода более дифференцированный подход, который обеспечивает более точное описание вертикального профиля скорости ветра.

В методиках расчета в соответствии с нормативными требованиями для определения ветровой нагрузки используют графики зависимости значений аэродинамических коэффициентов от положения угла образующей цилиндрической поверхности к направлению ветрового потока. При этом величины этих значений зависят от числа Рейнольдса. Для украинских норм[12,13] коэффициенты определены при Re > $4 \cdot 10^5$, а для российских[14] и европейских норм[15] коэффициенты определяются по трем значениям числа Рейнольдса, а именно Re = $2 \cdot 10^6$, Re = 10^7, Re = $5 \cdot 10^5$ (рис. 2).

а) $Re > 4 \cdot 10^5$



[12] ДБН В.1.2-2:2006. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. – Взамен СНиП 2.01.07-85, кроме раздела 10. – Київ: Изд. Минстрой Украины, 2006. – 78 с.

[13] ЗМІНА № 1 ДБН В.1.2-2:2006. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. – 2 с.

[14] СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – М.: Изд. Госстандарт, 2011. – 80 с.

[15] Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-4. Загальні дії. Вітрові навантаження: ДСТУ-Н Б EN 1991-1-4:2010 (EN 1991-1-4:2005, IDT). К.: Изд. Мінрегіон України, 2012. – 18 с.

б) $Re = 2 \cdot 10^6$; $Re = 10^7$; $Re = 5 \cdot 10^5$

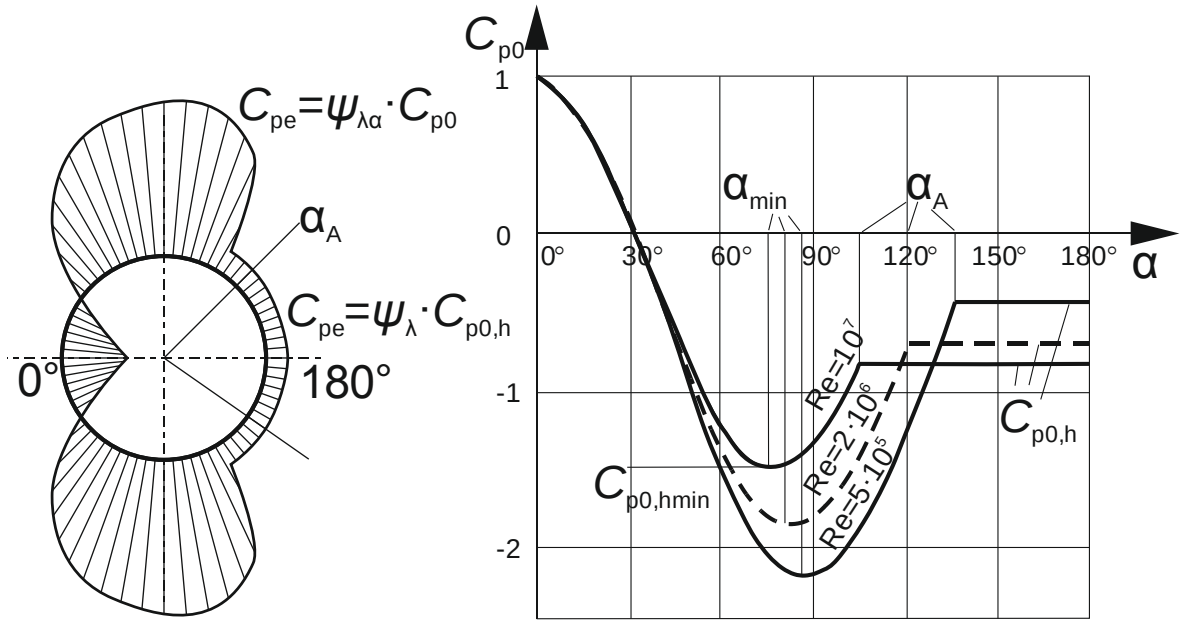


***Рисунок 2**. Нормирование аэродинамических коэффициентов C_β, определяемые в соответствии с нормативными документами: а) по ДБН[16,17], б) по EN[18], или СП[19], где C_{e1} – аэродинамический коэффициент для стенки резервуара[1,2]; C_{e2} – аэродинамический коэффициент для кровли резервуара[1,2]; C_j – аэродинамический коэффициент для стенки резервуара применяемый в случае опущенной плавающей кровли, или отсутствии кровли[1,2]; d – диаметр вертикального цилиндрического резервуара; h_1 – высота резервуара; C_{pe}[3,4]*

Несмотря на многочисленные работы в области проектирования, строительства и эксплуатации резервуаров, ряд вопросов, связанные с оценкой и повышением работоспособности резервуаров, остаются открытыми. Среди них следует отметить следующие:

- недостаточно изучены нагрузки и воздействия на вертикальные цилиндрические резервуары для новых типов кровель, в т. ч. с провисающими мембранными покрытиями;
- недостаточно изучены нагрузки и воздействия на вертикальные цилиндрические резервуары и в составе группы, несмотря на то, что на большинстве нефтехранилищ, такая компоновка является преимущественной.

[16] ДБН В.1.2-2:2006. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. – Взамен СНиП 2.01.07-85, кроме раздела 10. – Київ: Изд. Минстрой Украины, 2006. – 78 с.

[17] ЗМІНА № 1 ДБН В.1.2-2:2006. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования. – 2 с.

[18] СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – М.: Изд. Госстандарт, 2011. – 80 с.

[19] Єврокод 1. Дії на конструкції. Частина 1-4. Загальні дії. Вітрові навантаження: ДСТУ-Н Б EN 1991-1-4:2010 (EN 1991-1-4:2005, IDT). К.: Изд. Мінрегіон України, 2012. – 18 с.

2. Методики, применяемые в численном компьютерном моделировании

В наши дни наиболее популярными методами прогнозирования турбулентных течений считаются способы, базирующиеся на решении уравнений Рейнольдса, образующихся из-за использования осреднения уравнений Навье-Стокса (например, Unsteady Reynolds-averaged Navier-Stokes equations (URANS), Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)).

Впрочем, итоги расчетов данными методами весьма восприимчивы к предпочтению той или иной полуэмпирической модели турбулентности, а в некоторых случаях и попросту неспособны отобразить отличительные черты, характерные настоящим турбулентным течениям.

Рассмотрим основные модели турбулентности[20]:

1) k-ε модель Standard

Ключевая двухпараметрическая модель турбулентности с уравнениями переноса для турбулентной кинетической энергии k и скорости турбулентной диссипации ε, применяется только для развитых турбулентных течений. Для этой модели турбулентности постоянные коэффициенты получают экспериментальным путем и в следствие этого она считается полуэмпирической. Не обращая внимания на ограничения данная модель приобрела обширное распространение в промышленных задачах, что разъясняется достаточно стабильным итерационным процессом и достаточной точностью. На основании Standard k-ε модели с учетом её минусов были сформированы Re-Normalisation Group (RNG) k-ε модель и Realizable k-ε модели.

2) RNG k-ε модель

В данной модели были сделаны соответствующие усовершенствования:

1. вспомогательный критерий в уравнении для скорости турбулентной диссипации e, повышающий достоверность ответа;
2. предусматривается явление циркулирования турбулентности, что повышает достоверность решения скоростных течений;
3. для потока добавлена аналитическая зависимость определения числа Pr;
4. добавлена формула с целью нахождения динамической вязкости.

Данные отличительные черты позволяют использовать RNG k-ε модель для более обширного класса вопросов, чем в Standard k-ε модели.

3) Realizable k-ε модель

Эта форма турбулентности обладает значительными различиями по сопоставлению с Standard k-ε моделью:

1. добавлен усовершенствованный метод вычисления турбулентной вязкости;
2. из уравнения переноса среднеквадратичного пульсационного вихря получено уравнение скорости турбулентной диссипации ε.

Прямое достоинство Realizable k-ε модели заключается в том, что она наиболее корректно прогнозирует распространение диссипации плоских и круглых потоков.

---

[20] Подходы к записи уравнений Навье-Стокса [Электронный ресурс], 2015. URL: http://lektsii.org/2-28386.html.

Эти две модели Realizable и RNG k-ε демонстрируют значительное достоинство перед Standard k-ε моделью турбулентности для рассмотрения вихревых, искривленных и вращающихся потоков.

4) Standart k-ω модель

Данную модель разработал Уилкокс (Wilcox) в 1998 году. Двухпараметрическая модель турбулентности с уравнениями для турбулентной кинетической энергии k и скорости турбулентной диссипации, записанной в виде (k/ε). Демонстрирует замечательные результаты при вычислении пристенных слоев и потоков с низким числом Re.

5) Shear-Stress Transport (SST) k-ω модель

Эта модель SST, считается разновидностью Standart k-ω модели, изобретена Ментером.

Даная модель результативно соединяет стабильность и достоверность обычной k-ω модели в пристенных зонах и k-ε модели при удалении от стенки, ради этого k-ε модель была конвертирована в вариант k-ω модели. Эта модель турбулентности обладает значительными различиями по сопоставлению с Standard k-ω моделью:

1. standard k-ω модель и измененная k-ε модель соединяются особой функцией и обе добавлены в SST модель;
2. нахождение турбулентной вязкости изменено, для получения уравнения переноса касательных напряжений;
3. различаются константы моделей турбулентности.

Данные характерные черты делают SST k-ω модель наиболее точной для обширного класса вопросов.

6) Reynolds Stress Model (RSM) модель

RSM модель считается одной с наиболее трудных моделей турбулентности.

Данная модель никак не применяет теорию о изотропности турбулентной вязкости, а с целью замыкания уравнений Навье-Стокса, осредненных согласно Рейнольдсу, решает уравнения переноса напряжений вместе с уравнением для скорости турбулентной диссипации ε.

RSM модель обладает более значительными возможностями, чем другие модели. Применяется для наиболее верного расчета сложных потоков, т. к. описывает эффекты вращения, кривизны и внезапного изменения напряжений между слоями.

Выводы

1. В рассмотренных нормативных методиках для определения характеристик ветрового воздействия наиболее дифференцированным является подход по определению соответствующих коэффициентов, регламентированный в Eurocode.
2. Для конструкций вертикальных цилиндрических резервуаров в рассмотренных методиках учитывается распределение ветрового потока, действующее только на одиночный объект.
3. Поскольку, при расчете стенки резервуара на устойчивость, одной из основных нагрузок является ветровая, возникает необходимость уточнить существующие методики для учета распределения ветрового давления в группе резервуаров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савицкий Г. А. Ветровая нагрузка на сооружения. – М.: Изд. лит. по стр-ву, 1972. 111 с.
2. Симиу Э., Сканлан Р. Воздействие ветра на здания и сооружения [Текст]: пер. с англ. – М.: Изд. Стройиздат, 1984. 359 с.
3. Реттер Э. И. Архитектурно-строительная аэродинамика: монография. – М.: Изд. Стройиздат, 1984. – 294 с.
4. Коренев Б. Г., Рабинович И. М. Справочник по динамике сооружений. – М.: Изд. Стройиздат, 1972. 512 с.
5. Mushchanov V. P., Zubenko G. V., Moskalenko I. V. Numerical simulation of wind pressure on a vertical cylindrical tank surface [Текст] // журнал Металлические конструкции. 2013. Vol. 3. P. 173-182.
6. Гордеев В. Н., Лантух-Лященко А. И., Пашинский В. А., Перельмутер А. В., Пичугин С. Ф. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения. М.: Изд. АСВ, Изд. СКАД СОФТ, Изд. ДМК Пресс, 2009. 528 с.
7. Пичугин С. Ф., Махинько А. В. Ветровая нагрузка на строительные конструкции. – Полтава: Изд. АСМІ, 2005. 342 с.
8. Горохов Е. В., Кузнецов С. Г. Экспериментальные методы определения ветровых нагрузок на здания и сооружения [Текст]. Донецк: Изд. Норд-Пресс, 2009. 169 с.
9. Березин М. А., Катюшин В. В. Атлас аэродинамических характеристик строительных конструкций. Новосибирск: Изд. ООО Олденполиграфия, 2003. 140 с.
10. Кинаш Р. И., Копылов А. Е. Аэродинамические исследования четырех круглых цилиндров // Вестник НУ "Львовская политехника", "Теория и практика строительства". 2004. №495. С. 88-92.
11. Кинаш Р. И., Копылов А. Е. Исследование аэродинамических параметров системы из двух круговых цилиндров // «Вестник». Донбасской национальной академия строительства и архитектуры. 2007. №6(68). С. 32-40.
12. J. Franke, C. Hirsch, A. G. Jensen, H. W. Krüs, M. Schatzmann, P. S. Westbury, S. D. Miles, J. A. Wisse, N. G. Wright: Recommendations on the Use of CFD in Predicting Pedestrian Wind Environment, COST Action C14 “Impact of Wind and Storms on City Life and Built Environment”, 2004.
13. Holroyd R. J. On the behaviour of open-topped oil storage tanks in high winds (Part 1) [Text] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamicsy. 1983. Vol. 12. P. 329-352.
14. Hort M. C., Robbins A. G. The dispersion of fugitive emissions from storage tanks [Text] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 2002. Vol. 90. P. 1321-1348.
15. MacDonald P. A. Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: I. Point pressure measurements on isolated structures [Text] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1988. Vol. 31. P. 165-187.

16. MacDonald P. A. Wind loads on circular storage bins, silos and tanks: II. Effect of grouping [Text] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1990. Vol. 34. P. 77-95.

17. Горохов Е. В., Мущанов В. Ф., Кинаш Р. И., Шимановский А. В., Лебедич И. Н. Конструкции стационарных покрытий над трибунами стадионов [Текст]. Макеевка: Изд. РИО ДонНАСА, 2008. 405 с.

18. Еремеев П. Г. Современные стальные конструкции большепролетных покрытий уникальных зданий и сооружений: монография. – М.: Изд. АСВ, 2009. – 336 с.

19. Mochida A., Tominaga Y., Murakami S., Yoshie R., Ishihara T., Ooka R. Comparison of various k-e models and DSM applied to flow around a high-rise building-Report on AIJ cooperative project for CFD prediction of wind environment. Wind Struct. 2002. Vol. 5 (2-4). P. 227-244.

20. Murakami S. Computational wind engineering [Text] // Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 1990. Vol. 36, Part 1. P. 517-538.

21. Shirasawa T., Tominaga T., Yoshie R., Mochida A., Yoshino H., Kataoka H., Nozu T. Development of CFD method for predicting wind environment around a high-rise building part 2: the cross comparison of CFD results using various k- models for the flowfield around a building model with 4:4:1 shape // AIJ J. Technol. Des. 2003. Vol. 18. P. 169-174.

22. Tominaga Y., Mochida A., Shirasawa T., Cross comparisons of CFD results of wind environment at pedestrian level around a high-rise building and within a building complex [Text] // Journal of Asian Architecture and Building Engineering. 2004. Vol. 3. P. 63-70.

Stepanov Roman Nikolaevich
National research university Moscow state university of civil engineering, Russia, Moscow
E-mail: rnstepanov@gmail.com

Romenskyi Denis Igorevich
National research university Moscow state university of civil engineering, Russia, Moscow
E-mail: rdi777@bk.ru

Mushchanov Vladimir Filippovich
Donbas national academy of civil engineering and architecture, Ukraine, Makeyevka
E-mail: volodymyr.mushchanov@mail.ru

Zubenko Anna Vasil'evna
Donbas national academy of civil engineering and architecture, Ukraine, Makeyevka
E-mail: zubenkoanna@dr.com

Tsepliaev Maxim Nikolaevich
Donbas national academy of civil engineering and architecture, Ukraine, Makeyevka
E-mail: m.n.cepliaev@donnasa.ru

Wind loading to a vertical cylindrical tank

Abstract. The paper contains an analytical review of the results of scientific research in the field of studying the effect of wind load on structures with a circular cylindrical surface, namely, vertical cylindrical tanks of large volumes. Allocated the features of the researched approaches in the form of advantages and disadvantages associated with various methods of determining the wind load used in modern native and foreign standards. Particular attention is paid to the numerical determination of aerodynamic coefficients to the surfaces of vertical cylindrical tanks and their groups. Formulated the insufficiently studied questions in the field of definition of loads and impacts to single vertical cylindrical tanks and their groups. Performed an analytical comparison of the computer simulation methods of turbulent wind flows based on the solution of the Reynolds equations arising from the application of the Navier-Stokes equations averaging. Are considered the basic turbulence models such as: k-ε model Standard; Re-Normalisation Group k-ε model; Realizable k-ε model; Standart k-ω model; Shear-Stress Transport k-ω model; Reynolds Stress Model model. Was analiazed the possibility of choosing a particular model depending to the properties and characteristics of the wind flow for application in numerical simulation of wind flow with specific cylindrical surfaces.

Keywords: wind load; vertical cylindrical tank; aerodynamic coefficient; Reynolds equations; Navier-Stokes equations; turbulence; wind flow