УДК 004.942:539.3:624.04

# ЦИЛІНДРИЧНІ ОБОЛОНКИ У ВІТРОВОМУ ПОТОЦІ: РЕГРЕСІЙНИЙ АНАЛІЗ КОЕФІЦІЄНТА ПРИВЕДЕННЯ

**Є.А.** Єгоров<sup>1</sup>,

д-р техн. наук, професор

# О.Є. Кучеренко<sup>2</sup>,

канд. техн. наук, старший науковий співробітник

<sup>1</sup>ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», Дніпро

<sup>2</sup>Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, Дніпро

# DOI: 10.32347/2410-2547.2025.114.165-172

Розглядається задача моделювання циліндричних тонкостінних оболонок, які знаходяться під дією вітрового потоку. Проводиться аеродинамічне моделювання в програмному пакеті OpenFOAM, визначаються критичні параметри вітрового потоку, за яких відбувається втрата стійкості. З метою спрощення розрахунків розглядається умова еквівалентного приведення вітрового тиску по поверхні оболонок до рівномірного радіального тиску з використанням коефіцієнта приведення. За допомогою регресійного аналізу, який виконується із застосуванням інформаційного критерію Акаіке та крос-валідації, встановлюється можливість визначення коефіцієнта приведення вітрового тиску в залежності від геометричних параметрів оболонки

Ключові слова: моделювання, оболонка, стійкість, критичний тиск, вітровий потік, регресія, коефіцієнт приведення, OpenFOAM.

Вступ. У статті розглядається поведінка вертикальних циліндричних оболонкових структур у потоці газу. В промисловості найчастіше це циліндричні корпуси вертикальних сталевих резервуарів і силосів різноманітного призначення, що знаходяться під впливом вітрового потоку. Такі оболонки можна віднести до класу супертонкостінних, для якого характерне співвідношення радіусу r до товщини t знаходиться у межах 500÷1500 та більше. За дії вітрового навантаження головною небезпекою для цих об'єктів є втрата загальної або місцевої стійкості. Проблема ускладнюється тим, що одночасно з вітровим тиском у загальному випадку має місце осьове навантаження від власної ваги конструкцій та вакууму, який створює ефект стискання як у меридіональному, так і радіальному напрямках. І якщо меридіональні впливи можна розглядати окремо, то ефекти від дії вакууму та газу мають розглядатися як комбіноване навантаження. Так, у нормативних документах [1] перевірка на стійкість циліндричних оболонок у зазначених умовах здійснюється за формулою:

$$\frac{\gamma_n}{\gamma_c} (\frac{\sigma_1}{\sigma_{cr1}} + \frac{\sigma_2}{\sigma_{cr2}}) \le 1, \tag{1}$$

де  $\gamma_n$ ,  $\gamma_c$  - коефіцієнти відповідно надійності та умови роботи;  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  - сумарні напруження від дії відповідно меридіональних та радіальних навантажень;  $\sigma_{cr1}$ ,  $\sigma_{cr2}$  — критичні значення відповідних напружень, де  $\sigma_{cr2}$  визначається як критичний рівномірний тиск на оболонку.

Формула (1) демонструє незалежність розрахунку меридіональних та радіальних навантажень, проте свідчить про спільне врахування навантажень, що спричиняють радіальне напруження  $\sigma_2$ . Отже, напруження від впливу вітрового навантаження  $\sigma_{w2}$  повинні входити до складу  $\sigma_2$  як такі, що спричинені рівномірним за периметром тиском, але в дійсності розподіл вітрового тиску (рис. 1) не є рівномірним. У технічному аналізі це питання вирішується шляхом умовного переходу від вітрового тиску  $q_{2w}$  до еквівалентного рівномірного тиску за наступною формулою:

$$q_{2we} = q_{2w} \cdot k_w. \tag{2}$$

В нормах проектування сталевих резервуарів [2]  $k_w$  дорівнює 0.5 для всіх резервуарів незалежно від параметрів геометрії оболонок. Водночас за європейськими нормами [3] такий коефіцієнт позначається як  $\gamma_w$ , і його пропонується визначати за формулою:

$$\gamma_{w} = 0.46 \cdot \left( 1 + 0.1 \cdot \sqrt{\frac{c_{\theta}}{\omega} \cdot \frac{r}{t}} \right), \tag{3}$$

де  $c_{\theta}$  – коефіцієнт, що залежить від умов закріплення оболонки; t – товщина стінки оболонки;  $\omega = \frac{L}{\sqrt{r \cdot t}}$  - безрозмірний параметр геометрії оболонки. Тобто, за формулою (3) коефіцієнт

приведення визначається в залежності від параметрів циліндричної оболонки, що є цілком логічним припущенням, адже значення  $q_{2we}$  має залежати від деформаційних ефектів впливу вітрового потоку на поверхню оболонки, зокрема від спорідненості цих ефектів з власною формою втрати стійкості цих оболонок.

В [4] коефіцієнт приведення  $k_w$  пропонується визначати з огляду на те, що в задачах стійкості перехід від будь-якого розподілення газового потоку до рівномірного тиску повинен забезпечувати незмінним запас за стійкістю (з певним коефіцієнтом стійкості). Якщо радіальний тиск вітру буде єдиним радіальним навантаженням, що діє на оболонку, то нескладним аналізом (1, 2) можна показати правомірність таких співвідношень:



Рис. 1. Розподіл вітрового тиску навколо циліндричної оболонки

 $\frac{q_{2w} \cdot k_w}{p_{\text{cr}2}} = \frac{q_{2w}}{q_{\text{cr}2w}},\tag{4}$ 

критичне значення зовнішнього де  $p_{\rm cr2}$  – рівномірного тиску; q<sub>сг2w</sub> - критичне значення фронтального вітрового тиску, визначене без приведення вітрового тиску до еквівалентного вакууму, тобто визначене за фактичним розподілом вітрового тиску за периметром циліндричної оболонки. Зважаючи на те, що розподіл вітрового тиску за довжиною оболонки € також нерівномірним, то зазвичай за величину  $q_{cr2w}$  умовно приймається максимальне значення вітрового тиску на фронтальній поверхні циліндричної оболонки, за дії якого відбувається втрата стійкості (рис. 1) [5].

Отже, відповідно до (4) коефіцієнт приведення може бути визначений за формулою:

$$k_w = \frac{p_{cr2}}{q_{cr2w}}.$$
(5)

Основна складність тут полягає у визначенні величини  $q_{cr2w}$ . У роботі [4] це здійснювалося за допомогою чисельного моделювання. Значення  $p_{cr2}$  обчислювалося за формулою Папковіча [6]. Врахування можливих геометричних недосконалостей в циліндричній оболонці [7] здійснювалося шляхом застосування до  $p_{cr2}$  коефіцієнта  $k_{loc}=0.6$  у відповідності до [1]. Цей же коефіцієнт застосовувався і до

косфицієнті застосовувався і до  $q_{cr2w}$ . Визначені таким чином коефіцієнти приведення для резервуарів місткістю 1000, 3000 і 5000 м<sup>3</sup> наведені у таблиці 1. Також, для порівняння, наведені відповідні значення  $k_w$ , що визначалися за рекомендаціями [2, 3].

Таблиця 1 Значення коефіціснтів приведення вітрового навантаження

Місткість, м <sup>3</sup>	$k_w[2]$	$\gamma_w$	k <sub>w</sub> [4]
1000	0,5	0.643	0,700
3000		0.718	0,804
5000		0.894	0,734

Наведені данні свідчать, по-перше, про те, що нормативна умова  $k_w$ =0.5 потребує певної корекції, бо вона не забезпечує запасу за стійкістю; по-друге, про те, що коефіцієнт  $k_w$  залежить від геометричних параметрів оболонок. Головним недоліком зазначених робот є той факт, що в них у розрахунках використовувалося спрощене розподілення вітрового тиску по поверхні оболонки.

Постановка задачі. В статті досліджується поведінка оболонок під впливом вітрового тиску, який визначається на основі газодинамічного моделювання в тривимірній постановці із застосуванням відкритого програмного забезпечення OpenFOAM [8]. Визначаються критичні значення такого тиску. Отримані результати порівнюються з розрахунковими методиками норм проектування подібних конструкцій. Обговорюється питання переходу від нерівномірного зовнішнього тиску газу до еквівалентного рівномірного із застосуванням коефіцієнтів приведення. Виконується регресійний аналіз цих коефіцієнтів.

Параметри моделей оболонкових структур. Геометричні параметри оболонкових структур, що розглядаються, наведено у таблиці 2. Для оболонок зі змінною товщиною стінки вказано відповідні середні товщини.

Таблиця 2

№ моделі	Місткість, м <sup>3</sup>	Довжина L, мм	Радіус <i>г</i> , мм	Товщина стінки t, мм
1	300	7450	3790	4
2	400	7450	4265	4
3	500	7450	4585	4
4	700	8940	5215	4
5	1000	11920	5215	4
6	2000	11920	7590	6
7	3000	11920	9490	6.125
8	5000	11920	11400	7.375

Геометричні параметри оболонок

Матеріал оболонок – сталь з модулем Юнга 2·10<sup>11</sup> Па, межею плинності 245 МПа, коефіцієнтом Пуассона 0.3 та щільністю 7850 кг/м<sup>3</sup>. Нижній край усіх оболонок жорстко закріплений. Верхній край кожної оболонки з'єднаний шарнірно з конічним покриттям з кутом нахилу 15°. Зазначена конфігурація відповідає характеру роботи циліндричної стінки у складі вертикального циліндричного резервуару. На рис. 2 наведено загальну геометричну схему досліджуваних об'єктів.

Моделювання квазістатичного вітрового навантаження. Для визначення статичної компоненти від дії вітрового потоку на циліндричну стінку використовуються рівняння Нав'є-Стокса, усереднені за Рейнольдсом (RANS – Reynoldsaveraged Navier–Stokes) [9], які дозволяють моделювати турбулентні течії навколо циліндричної оболонки та визначати розподіли тиску і швидкості на її поверхні. Для чисельного розв'язування цих рівнянь застосовано модель k- $\omega$  SST (Shear



Рис. 2. Загальна геометрична схема оболонкових конструкцій

Stress Transport) з двома додатковими рівняннями для урахування кінетичної енергії турбулентних пульсацій k і специфічної швидкості дисипації турбулентної енергії ω [10, 11]. В підсумку, рівняння RANS записуються таким чином:

$$\frac{\partial(\rho \overline{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \overline{u}_i \overline{u}_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ -\overline{p} \delta_{ij} + \mu \left( \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u_i' u_j'} \right], \tag{6}$$

де  $\rho$  – густина,  $\overline{u}$  – середня за часом швидкість,  $\overline{p}$  – середній за часом тиск,  $\delta_{ij}$  – дельта Кронекера, u' - флуктуації швидкості через турбулентність,  $\mu$  – молекулярна в'язкість,  $-\rho \overline{u'_i u'_j}$  напруження за Рейнольдсом. Останні відповідно до гіпотези Бусінеска [12] можна переписати наступним чином:

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left( \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \overline{u_k}}{\partial x_k} \delta_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij}, \tag{7}$$

де  $\mu_t$  – коефіцієнт турбулентної в'язкості, k – кінетична енергія турбулентних пульсацій. В цьому аналізі швидкість вітру не перевищує 100 м/с, тому вважатимемо, що потік газу нестисливий (а отже,  $\frac{\partial \bar{u}_k}{\partial x_k} = 0$ ) і має щільність  $\rho = 1.225$  кг/м<sup>3</sup>, Невідомий параметр  $\mu_t$  в рівнянні

(7) визначається за допомогою двох додаткових рівнянь моделі k-ω SST.

Розміри розрахункового домену навколо кожної оболонкової структури обиралися відповідно до рекомендацій, наведених у [13]. На рис. З наведено приклад скінченноелементної сітки для однієї з моделей з деталізацією навколо стінок оболонки.



Рис. 3. Приклад побудови сітки розбиття для обчислювального домену моделі №5

При проведенні газодинамічного моделювання в ОрепFOAM на вході обчислювального домену задаються такі початкові параметри: швидкість потоку  $U_x$ , кінетична енергія k та швидкість дисипації енергії  $\omega$ . Мінімальне значення швидкості  $U_x$  для кожної оболонки підбиралося емпірично таким чином, щоб після еволюції газового потоку впродовж певного часу відповідні оболонкові структури втрачали стійкість. Параметри k та  $\omega$  розраховувалися за наступними емпіричними формулами:

$$k_0 = \frac{3}{2} (IU_x)^2,$$
  

$$\omega_0 = \frac{C_{\mu}^{0.75} \cdot k^{1.5}}{L_m},$$
(8)

де I=0.05,  $U_x$  - швидкість газового потоку на вході домену,  $C_{\mu}=0.09$ ,  $L_m \sim 0.1L$ .

Як приклад, на рис. 4 наведено обчислені розподіли тиску і швидкостей після еволюції газового потоку для моделі №5. Дослідження зазначеної проблеми з застосуванням чисельного моделювання вітрового потоку показало, що розподіл вітрового тиску за периметром циліндричної оболонки є більш складним (рис. 4), ніж це прийнято в [1]. Тому значення  $q_{cr2w}$  потребує більш точного визначення на основі газодинамічного моделювання.

У таблиці 3 наведені критичні значення швидкості вітрового потоку  $U_x$  на вході домену, за яких оболонки втрачають стійкість. Остання визначалася шляхом перевірки дотичної матриці жорсткості відповідної оболонкової структури на сингулярність. У відповідності до  $U_x$  визначалися критичні максимальні величини фронтального тиску  $q_{cr2w}$  на оболонку та коефіцієнти  $k_w$ , розраховані за формулою (5). Також у таблиці наведено значення критичних лінійних тисків  $p_{cr2}$ .

Таблиця 3

№ моделі	1	2	3	4	5	6	7	8
<i>U<sub>x</sub></i> , м/с	94.45	84.50	81.50	68.85	59.80	73.00	59.10	63.25
<i>q<sub>cr2w</sub></i> , Па	6197	4986	4425	3189	2424	3719	2492	2765
<i>p<sub>cr2</sub></i> , Па	4330	3543	3287	2280	1686	2630	1901	2289
$k_w$ sa (5)	0.6987	0.7106	0.7428	0.7150	0.6955	0.7072	0.7628	0.8228

Результати чисельного моделювання



Рис. 4. Розподіли тиску і швидкості газового потоку в вертикальній площині домену моделі №5

# Регресія коефіцієнта приведення. Введемо наступні позначення:

$$\omega = \frac{L}{\sqrt{r \cdot t}},$$
  

$$\gamma = 0.46 \cdot (1 + 0.1 \cdot \sqrt{r \cdot t/\omega}),$$
  

$$m = 2.74 \cdot \left(\frac{r}{L} \left(\frac{r}{t}\right)^{0.5}\right)^{0.5}.$$
(9)

Побудуємо наближену регресійну залежність для коефіцієнта  $k_w$ , використовуючи у якості регресорів такі члени як L, L/r,  $(L/r)^2$ , m, m<sup>2</sup>, t,  $t^2$ , r/t,  $(r/t)^2$ ,  $\omega$ ,  $\omega^2$ ,  $\gamma$ ,  $\gamma^2$  і т.д. Зважаючи на малу кількість вихідних даних, для уникнення перенавчання використовуватиме скоригований інформаційний критерій Акаіке (AICc) [14] для вибору регресійної моделі, яка, з одного боку, найбільш точно відображає залежність між коефіцієнтом приведення та регресійними членами, а з іншого – має найменшу складність. Сам критерій обчислюється за наступною формулою:

$$AICc = 2d - 2\ln(\hat{L}) + \frac{2d^2 + 2d}{n - d - 1},$$
(10)

де d - число оцінюваних параметрів регресійної моделі,  $\hat{L}$  - максимальне значення функції правдоподібності, n – розмір вибірки. Стверджується, що регресійна модель з мінімальним значенням AICc найбільш точно описує зв'язок між залежною змінною та регресорами [15]. Але мінімальне значення AICc не гарантує абсолютної якості моделі, тож додатково необхідно проводити оцінку якості – наприклад, за допомогою процедури крос-валідації [16]. Для малої вибірки зазвичай застосовується leave-one-out cross-validation (LOOCV) з оцінкою, наприклад, mean squared error (MSE) та/або mean absolute error (MAE).

Було побудовано кілька тисяч варіантів регресійних залежностей в системи статистичного моделювання R, з яких обрано 3 моделі з мінімальними значеннями AICc, для яких також застосовано процедуру LOOCV (таблиця 4). З огляду на MSE і MSE, регресійну модель №2 можна вважати найбільш прийнятною.

На рис. 5 наведено коефіцієнти приведення для оболонок, які розглядаються у статті. Ромбами позначено експериментально (чисельне моделювання) отримані співвідношення (таблиця 3), а кружечками – значення, отримані на основі регресійної залежності - моделі 2 з таблиці 4. Коефіцієнті приведення, визначені із регресійної моделі, досить точно відображають

Таблиця 4

Регресійні моделі для $k_w$						
N⁰	Модель	AICc	MSE	MAE		
1	$k_w \sim 0.3367 + 0.8593\gamma^2$	-35.0350	4.3e-04	1.6e-02		
2	$k_w \sim 1.444698 - 0.0209279\omega + 0.0001437\omega^2$	-32.9981	2.6e-04	1.3e-02		
3	$k_w \sim 1.1842 - 0.4633 L/r + 0.1097 (L/r)^2$	-30.2409	3.2e-04	1.3e-02		

співвідношення, які обчислені на основі даних, що їх отримано за допомогою газодинамічного моделювання.



Рис. 5. Коефіцієнти приведення для різних моделей оболонок

№ моделі

# Висновки

1. Значення коефіцієнта приведення залежить від параметрів циліндричних оболонок, на які діє вітровий тиск або - в загальному випадку - потік газу з певними характеристиками. Такі коефіцієнти не можуть бути однаковими для всіх оболонок.

2. Для розглянутих оболонкових споруд коефіцієнт приведення перевищує 0.5. Це свідчить про те, що в загальному випадку прийнята в нормативних документах умова не забезпечує необхідний рівень надійності

3. Наведені в статті регресійні моделі для обчислення коефіцієнтів приведення вітрового потоку до рівномірного тиску досить точно відповідають даним, які отримані за допомогою чисельного газодинамічного моделювання. Але такі залежності, як і будь-які інші моделі, необхідно використовувати з певною обережністю.

# СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. К.: Мінрегіон України, 2014. 199 с.
- ВБН В.2.2 58.2 94. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93.3 кПа. Відомчі будівельні норми України. – К.: Держкомнафтогаз, 1994. – 98 с.
- 3. EN 1993-1-6:2007. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures. Brussels: European committee for standardization, 2007. 94 p.
- 4. *Егоров Е.А., Федоряка Ю.В.* Исследование вопросов устойчивости стальных вертикальных цилиндрических резервуаров // Металлические конструкции. 2006. № 1. С. 89-97.
- Resinger F., Greiner R. Buckling of wind loaded cylindrical shells application to unstiffened and ring-stiffened tanks // Buckling of Shells: Proceedings of a State-of-the-Art Colloquium, Universität Stuttgart, Germany (Stuttgart, 6-7 May 1982). - Springer Berlin Heidelberg, 1982. – P. 305-331.
- 6. Алфутов Н.А. Основы расчета на устойчивость упругих систем. М.: Машиностроение, 1961. 312 с.

- Yegorov Y., Kucherenko O. Computer modelling of thin-walled shell structures with geometric imperfections // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA. - 2023. – Issue 111. – P. 205-213.
- Weller H.G., Tabor G, Jasak H., Fureby C. A tensorial approach to computational continuum mechanics using objectoriented techniques // Comput. Phys. – 1998. – Vol. 12 (6). – P. 620–631.
- 9. Blazek J. Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications. Oxford: Elsevier Science Ltd, 2001. 440 p.
- Menter F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // AIAA Journal. 1994. Vol. 32 (8). – P. 1598-1605.
- Menter F.R, Kuntz M. Langtry R. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model // Turbulence, Heat and Mass Transfer: Proceedings of the 4th International Symposium, Turkey (Antalya, 12-17 October 2003). – Begell House Inc, 2003. – P. 625 - 632.
- Schmitt F.G. About Boussinesq's turbulent viscosity hypothesis: historical remarks and a direct evaluation of its validity // Comptes Rendus Mecanique. – 2007. – Vol. 335 (9-10). - P.617-627.
- 13. *Revuz J., Hargreaves D.M., Owen J.S.* On the domain size for the steady-state CFD modelling of a tall building // Wind and Structures. 2012. Vol. 15 (4). P. 313-329.
- 14. Akpa O.M., Unuabonah E.I. Small-Sample Corrected Akaike Information Criterion: An appropriate statistical tool for ranking of adsorption isotherm model // Desalination. 2011. Vol. 272 (1-3). P.20-26.
- Portet S. A primer on model selection using the Akaike Information Criterion // Infectious Disease Modelling. 2020. Vol. 5. – P. 111-128.
- Yates L.A., Aandahl Z., Richards S.A., Brook B.W. Cross validation for model selection: A review with examples from ecology // Ecological Monographs. – 2023. – Vol. 93 (1). – P. 1-24.

#### REFERENCES

- DBN V.2.6-198:2014. Stalevi konstruktsii. Normy proektuvannia. (Steel structures. Design standards). K.: Minrehion Ukrainy, 2014. – 199 s.
- VBN V.2.2 58.2 94. Rezervuary vertykalni stalevi dlia zberihannia nafty i naftoproduktiv z tyskom nasychenykh pariv ne vyshche 93.3 kPa. Vidomchi budivelni normy Ukrainy. (Vertical steel tanks for oil and oil products with saturated vapor pressure not exceeding 93.3 kPa. Departmental design codes of Ukraine). – K.: Derzhkomnaftohaz, 1994. – 98 s.
- 3. EN 1993-1-6:2007. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1-6: Strength and Stability of Shell Structures. Brussels: European committee for standardization, 2007. 94 p.
- Yehorov E.A., Fedoriaka Yu.V. Yssledovanye voprosov ustoichyvosty stalnykh vertykalnykh tsylyndrycheskykh rezervuarov (Research on stability issues of steel vertical cylindrical tanks) // Metallycheskye konstruktsyy. – 2006. – № 1. – S. 89-97.
- Resinger F., Greiner R. Buckling of wind loaded cylindrical shells application to unstiffened and ring-stiffened tanks // Buckling of Shells: Proceedings of a State-of-the-Art Colloquium, Universität Stuttgart, Germany (Stuttgart, 6-7 May 1982). - Springer Berlin Heidelberg, 1982. – P. 305-331.
- 6. *Alfutov N.A.*Osnovy rascheta na ustoichivost upruhikh system. (Fundamentals of elastic structures stability calculating). Moscow: Mashinostroenie. 1961.
- Yegorov Y., Kucherenko O. Computer modelling of thin-walled shell structures with geometric imperfections // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA. - 2023. – Issue 111. – P. 205-213.
- Weller H.G., Tabor G, Jasak H., Fureby C. A tensorial approach to computational continuum mechanics using objectoriented techniques // Comput. Phys. - 1998. - Vol. 12 (6). - P. 620-631.
- 9. Blazek J. Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications. Oxford: Elsevier Science Ltd, 2001. 440 p.
- Menter F. R. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications // AIAA Journal. 1994. Vol. 32 (8). – P. 1598-1605.
- Menter F.R, Kuntz M. Langtry R. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model // Turbulence, Heat and Mass Transfer: Proceedings of the 4th International Symposium, Turkey (Antalya, 12-17 October 2003). – Begell House Inc, 2003. – P. 625 - 632.
- Schmitt F.G. About Boussinesq's turbulent viscosity hypothesis: historical remarks and a direct evaluation of its validity // Comptes Rendus Mecanique. – 2007. – Vol. 335 (9-10). - P.617-627.
- 13. *Revuz J., Hargreaves D.M., Owen J.S.* On the domain size for the steady-state CFD modelling of a tall building // Wind and Structures. 2012. Vol. 15 (4). P. 313-329.
- 14. Akpa O.M., Unuabonah E.I. Small-Sample Corrected Akaike Information Criterion: An appropriate statistical tool for ranking of adsorption isotherm model // Desalination. 2011. Vol. 272 (1-3). P.20-26.
- Portet S. A primer on model selection using the Akaike Information Criterion // Infectious Disease Modelling. 2020. Vol. 5. – P. 111-128.
- Yates L.A., Aandahl Z., Richards S.A., Brook B.W. Cross validation for model selection: A review with examples from ecology // Ecological Monographs. – 2023. – Vol. 93 (1). – P. 1-24.

Стаття надійшла 21.01.2025

Сгоров С.А., Кучеренко О.С.

# ЦИЛІНДРИЧНІ ОБОЛОНКИ У ВІТРОВОМУ ПОТОЦІ: РЕГРЕСІЙНИЙ АНАЛІЗ КОЕФІЦІЄНТА ПРИВЕДЕННЯ

У статті розглядається поведінка тонкостінних вертикальних сталевих циліндричних оболонкових структур місткістю від 300 до 5000 м<sup>3</sup> у потоці газу. За дії вітрового навантаження головною небезпекою для цих об'єктів є втрата загальної або місцевої стійкості. У технічному аналізі з метою спрощення розрахунків на стійкість виконується перехід від складного розподілу вітрового тиску  $q_{2w}$  до еквівалентного рівномірного тиску  $q_{2w}e^{-}q_{2w}k_w$ . В нормах

проектування сталевих резервуарів приймається, що коефіцієнт приведення kw дорівнює 0.5 для всіх резервуарів незалежно від параметрів геометрії оболонок, що у загальному випадку не відповідає дійсності, адже значення коефіцієнта приведення залежить від параметрів циліндричних оболонок, на які діє потік газу з певними характеристиками. Прийняте в нормативних документах значення не забезпечує необхідний рівень надійності. Проте за певних умов k<sub>w</sub> може бути обчислений як відношення критичного значення зовнішнього рівномірного тиску p<sub>cr2</sub> до критичного значення фронтального вітрового тиску q<sub>сг2</sub>». В статті критичне фронтальне квазістатичне вітрове навантаження q<sub>cr2w</sub> (за дії якого оболонка втрачає стійкість) визначається за допомогою чисельного моделювання вітрового потоку із застосуванням моделі k-ю Shear Stress Transport в системі OpenFOAM. Критичний лінійний тиск рега і стійкість оболонок визначаються шляхом перевірки дотичної матриці жорсткості відповідної оболонкової структури на сингулярність. На основі отриманих значень критичних тисків розраховується коефіцієнт k<sub>w</sub>, як зазначено вище. Із застосуванням методів машинного навчання у статистичному пакеті R побудовано регресійну залежність для визначення коефіцієнта kw із застосуванням геометричних параметрів оболонки. Для перевірки адекватності моделі використовується скоригований інформаційний критерій Акаіке (AICc) та методика перехресної перевірки (leave-oneout cross-validation) з оцінкою середньоквадратичної похибки (mean squared error) та середньої абсолютної похибки (mean absolute error). Отримана регресійна модель коефіцієнта приведення досить точно відповідає даним, які отримані за допомогою чисельного моделювання.

**Ключові слова:** моделювання, оболонка, стійкість, критичний тиск, вітровий потік, регресія, коефіцієнт приведення, Open FOAM.

#### Yegorov Y., Kucherenko O.

# CYLINDRICAL SHELLS IN A WIND FLOW: REGRESSION ANALYSIS OF THE WIND PRESSURE DISTRIBUTION COEFFICIENT

The article considers the behavior of thin-walled vertical cylindrical steel shell structures (capacities range from 300 to 5000 m<sup>3</sup>) in a gas flow. Under wind load, the main danger for such structures is global or local buckling. In technical applications, in order to simplify buckling analysis, we usually perform a transition from a complex distribution of a wind pressure  $q_{2w}$  to an equivalent uniform pressure  $q_{2w} = q_{2w} k_w$ . According to the design standard for storage tanks, it is assumed that the wind pressure distribution coefficient  $k_w$  equals to 0.5 for all tanks, regardless of geometric parameters of the shells. However, this generalization is not accurate since the value of the coefficient depends on the parameters of cylindrical shells subjected to a gas flow with specific characteristics. The value adopted in normative documents does not provide the required level of reliability. However, under certain conditions,  $k_w$  can be calculated as the ratio of the critical value of the external uniform pressure  $p_{cr2}$  to the critical value of the frontal wind pressure  $q_{cr2w}$ . In this article, the critical frontal quasi-static wind load  $q_{cr2w}$  (which causes shell buckling) is determined through numerical simulation of a wind flow in OpenFOAM using the k-w Shear Stress Transport model. The critical uniform pressure  $p_{cr^2}$  and, thus, buckling of the shell are determined by verifying the singularity of the tangent stiffness matrix of the corresponding shell structure. The  $k_w$  coefficient is calculated using obtained values of the critical pressures, as described above. Using machine learning methods in the R statistical package, we have built a regression model, which allows us to calculate the  $k_{\nu}$  coefficient using the geometric parameters of the shell. The adjusted Akaike Information Criterion (AICc) and the leave-one-out cross-validation method have been used to verify the adequacy of the model, along with the estimation of the mean squared error (MSE) and mean absolute error (MAE). The final regression model for the  $k_w$ coefficient quite accurately corresponds to the data obtained through numerical simulation.

Keywords: modelling, shell, buckling, critical pressure, wind flow, regression, reduction coefficient, Open FOAM.

#### УДК 004.942:539.3:624.04

*Єгоров С.А., Кучеренко О.С.* Циліндричні оболонки у вітровому потоці: регресійний аналіз коефіціснта приведення // Опір матеріалів і теорія споруд: наук.-тех. збірн. – К.: КНУБА. – 2025. – Вип. 114. – С. 165-172.

Розглядається задача комп'ютерного моделювання тонкостінних оболонкових структур у потоці вітру та досліджується питання переходу від нерівномірного вітрового тиску до еквівалентного рівномірного за допомогою коефіцієнта приведення.

Табл. 4. Іл. 5. Бібліогр. 16 назв.

*Yehorov Y.A., Kucherenko O.Ye.* Cylindrical shells in a wind flow: regression analysis of the wind pressure distribution coefficient // Strength of Materials and Theory of Structures: Scientific-and-technical collected articles. – K.: KNUBA. – 2025. – Issue 114. – P. 165-172.

The study focuses on computer modeling of thin-walled shell structures in a wind flow, and on the problem of transforming of non-uniform wind pressure into equivalent uniform one using a reduction coefficient. Tab. 4. Fig. 5. Ref. 16.

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри металевих конструкцій ЄГОРОВ Євгеній Аркадійович Адреса робоча: ННІ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Архітектора Олега Петрова 24a, м. Дніпро, 49005, Україна E-mail: evg\_egorov@ukr.net ORCID ID: http://orcid.org/0009-0003-0242-0260

Автор (науковий ступінь, вчене звання, посада): кандидат технічних наук (PhD), старший науковий співробітник КУЧЕРЕНКО Олександр Євгенович

Адреса робоча: Інститут технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України, вул. Лешко-Попеля 15, м. Дніпро, 49005, Україна

E-mail: akch7@cryptolab.net

ORCID ID: http://orcid.org/0009-0008-6534-8178