МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

На здобуття премії Президента України для молодих учених 2024 року

СТВОРЕННЯ НАДІЙНИХ ТА ЖИВУЧИХ ЗЕРНОСХОВИЩ В УМОВАХ ВІЙНИ ТА СВІТОВОЇ ПРОДОВОЛЬЧОЇ КРИЗИ

МАХІНЬКО Наталія Олександрівна – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерних технологій будівництва та реконструкції аеропортів Факультету наземних споруд і аеродромів Національного авіаційного університету, Міністерства освіти і науки України.

Обґрунтування теми дослідження:

Негативні воєнне вторгнення в Україну порушили баланс функціонування світової агропродовольчої системи, викликавши масштабну продовольчу кризу та наблизили мільйони людей до голодної смерті.

Викликом часу стало для українських аграріїв виростити, зберегти та забезпечити збут зернових культур в умовах воєнного стану, адже «воєнними цілями» країни-агресора стають зерносховища, продовольчі склади, транспортні термінали.

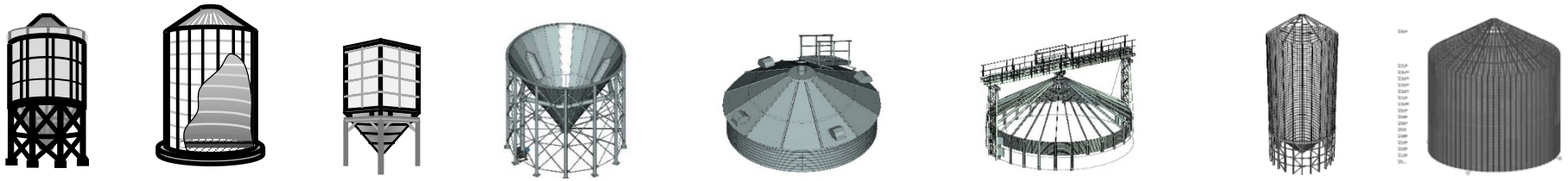
Для України, як аграрної держави, **збереження та відновлення силосних парків є одним з найважливіших стратегічних завдань**, що забезпечить не лише продовольчу безпеку країни, але й її експортний потенціал.

Цільове значення:

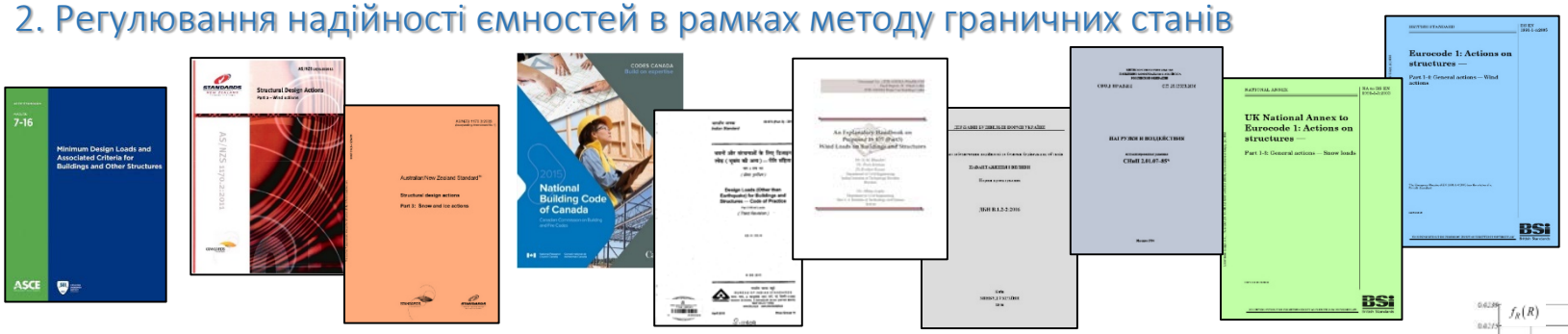
розробка та впровадження у сферу сільськогосподарського будівництва новітніх науково-технічних рішень із проєктування та зведення надійних та живучих зерносховищ, працюючих в проектних та особливих умовах воєнного часу для забезпечення безперервної роботи елеваторів та стабільного та рівномірного експорту базисної продукції.

Напрямки розробок:

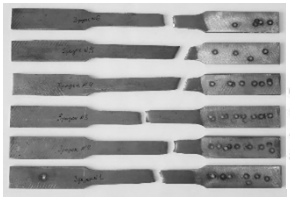
1. Споруди зерносховищ. Огляд конструктивних форм і аналіз методів розрахунку.

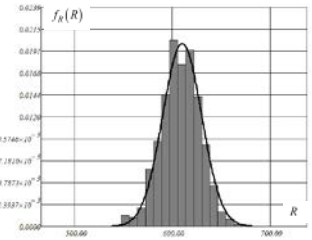


2. Регулювання надійності ємностей в рамках методу граничних станів

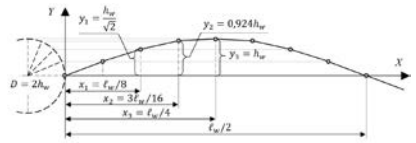


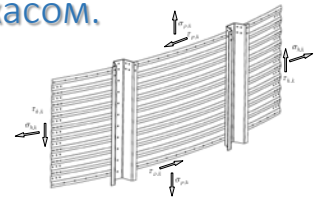
3. Робота високоміцних сталей в конструкціях силосних ємностей.

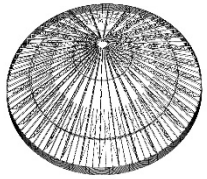




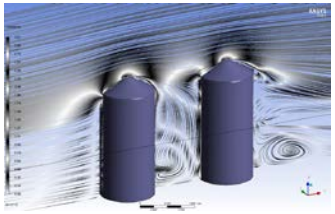
4. Надійність вертикальних циліндричних ємностей з гнучким зовнішнім каркасом.

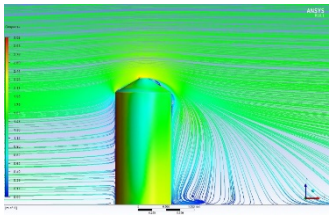


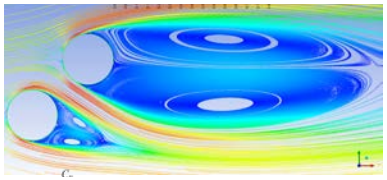




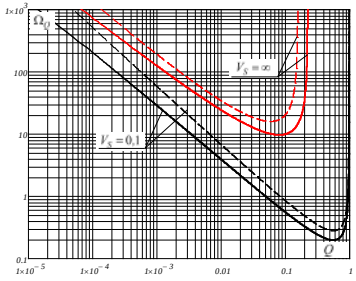
5. Моделювання вітрових впливів на силоси та силосні парки.







6. Розрахунок надійності ємностей зберігання.



Завдання дослідження:

- **створення загальної методології розрахунку надійності конструкцій зерносховищ, що працюють в проєктних та особливих умовах воєнного часу;**

- науковий аналіз світових підходів проєктних та особливих навантажень на зерносховища та методи їх розрахунку;
- комплексне дослідження н.д.с. конусних покрівель циліндричних силосних ємностей різних розмірів та конфігурації;
- експериментальна оцінка вітрових впливів на ємності зберігання зерна у складі силосних парків;
- масштабне експериментальне дослідження параметрів міцності стале, що застосовуються для спорудження зерносховищ;
- розробка системи наукових методів встановлення параметрів н.д.с. циліндричного корпусу ємностей з урахуванням ряду їх конструктивних особливостей;
- аналіз надійності багатоболтових з’єднань силосних ємностей, утворених із болтів одного та різного класів міцності;
- економіко-ймовірнісний опис оптимальних рівнів надійності сталевих ємностей на основі мінімізації функцій сумарного ризику.

Наукова новизна:

- вперше розроблена методологія розрахунку надійності конструкцій зерносховищ при врахуванні стохастичних властивостей сталі та дії випадкових навантажень, на основі якої отримано аналітичні вирази для визначення імовірностей безвідмовної роботи конструкцій в умовах різного напружено-деформованого стану;

- на основі аналізу світових підходів з нормування навантажень вперше було виявлено основні чинники неузгодженості, які провокують найбільші суперечності при оцінці параметрів н.д.с. таких споруд;

- дістала подальшого розвитку статистична оцінка характеристик міцності сучасних будівельних сталей для виробництва ємностей зберігання на основі нових даних експериментальних випробувань різних класів сталі;

- набув подальшого розвитку методологічний підхід до розрахунку корпуса циліндричних ємностей зберігання як підкріпленої оболонки обертання на осесиметричне та несиметричне навантаження, який, на відміну від попередніх, враховує конструктивні особливості реальних споруд та дозволяє встановлювати параметри н.д.с. як в листах корпусу, так і в стрижневих елементах підкріплення;

- набула подальшого розвитку система оцінки внутрішніх зусиль окремих елементів каркасу конічних покрівель циліндричних ємностей зберігання різного діаметру, що дозволило сформулювати загальну аналітичну методику їх розрахунку на міцність та деформативність при дії атмосферних та технологічних навантажень;

- вдосконалено систему принципів чисельного моделювання вітрових впливів на зерносховища у складі силосних парків та отримані нові результати щодо величини вітрових впливів на їх корпус та покрівлю;

- вперше сформульована концепція імовірнісного розрахунку багатоболтових з’єднань листів корпусу циліндричних ємностей, утворених із болтів однакового та різних класів міцності;

- вдосконалено економіко-ймовірнісний підхід із визначення ризиків відмов зерносховищ, на основі якого отримані нові аналітичні залежності для оптимальних рівнів надійності їх конструкцій.

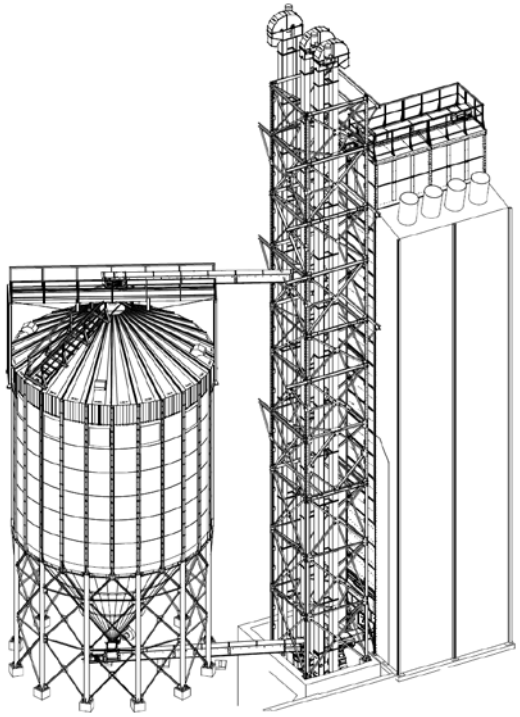
Основні науково-технічні результати:

Отримані експериментально-теоретичні результати **розвивають науковий напрям розрахунку надійності** для створення високонадійних та економічних будівельних конструкцій, а також можуть бути використані для широкого кола практичних задач проєктування чи перевірного розрахунку зерносховищ.

Унікальність й масштабність роботи обумовлена тим, що у перше з єдиних позицій надійності, живучості та економічної доцільності проаналізовані десятки конструктивних рішень сталевих зерносховищ світових виробників. Узагальнений та проаналізований інформаційний матеріал дозволив отримати **найоптимальніші на сьогодні конструктивні рішення зерносховищ** для роботи в нормальних та особливих умовах воєнного часу.

Ці рішення, які активно впроваджуються вітчизняними виробниками силосів, не тільки забезпечують аграріїв України надійними та найекономічнішими у світі зерносховищами, але й служать науково-технічним базисом для створення єдиного інформаційного хабу із серійного проектування об’єктів сільськогосподарського сектору.

Практичне значення:



Отримані експериментально-теоретичні результати розвивають науковий напрям розрахунку надійності для створення високонадійних та економічних будівельних конструкцій, а також можуть бути використані для широкого кола практичних задач проєктування чи перевірного розрахунку сталевих ємностей для зберігання зерна:

- для вертикальних циліндричних ємностей різного діаметру від 4600 мм до 33000 мм була до 20% знижена металоємність завдяки впровадженню більш ефективних розрахунково-теоретичних рішень;

- виконані експериментальні випробування найбільш застосованих класів сталей для виробництва силосів та отримані статистичні характеристики їх міцності;

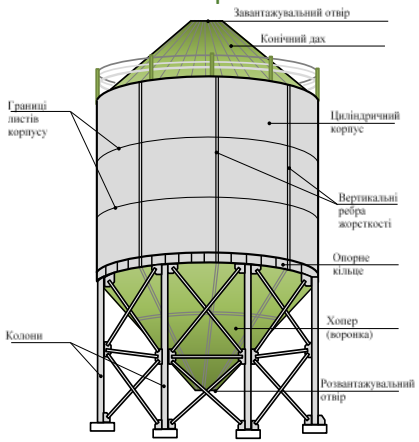
- за результатами комп’ютерного моделювання вітрових впливів на сталеві циліндричні ємності створено інформаційний базис аеродинамічних характеристик, на якому стає можливим вирішення широкого кола прикладних задач, що виходять за межі даної роботи.

Техніко-економічні показники:

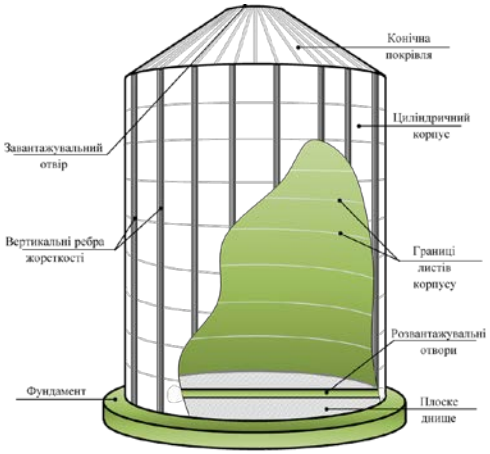
- В роботі виконаний масштабний аналіз проектних рішень сталевих зерносховищ провідних світових виробників, який дозволив розробити інтегральну шкалу економічної ефективності за групами конструктивних елементів.
- На базі розроблених методик та експериментальних випробувань були запропоновані нові технічні рішення із застосуванням сталей високої міцності, які дозволили зменшити металоємність зерносховищ до 25%. Це досягається не тільки за рахунок раціонального конструювання і принципу максимальної концентрації металу у найбільш напружених елементах, але й за рахунок поєднання в конструкціях зерносховищ декількох класів високоміцних сталей.
- Для різних конструкцій зерносховищ розроблена економіко-ймовірнісна шкала оптимальної надійності їх експлуатації в нормальних та особливих умовах воєнного часу.

Пошук нових конструктивних рішень зерносховищ

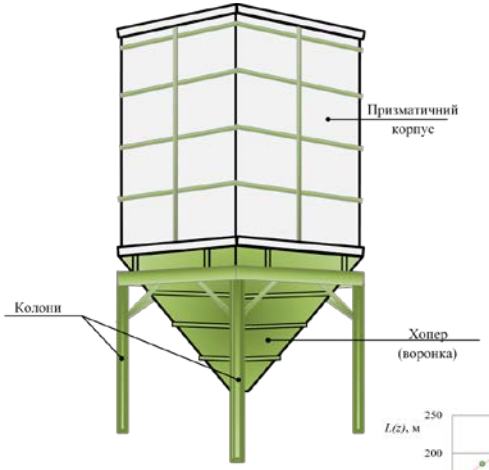
Ємність зберігання з конічним хопером



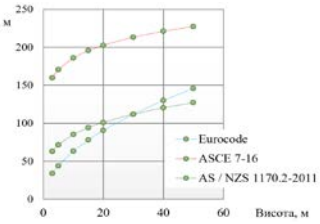
Ємність зберігання з плоским днищем



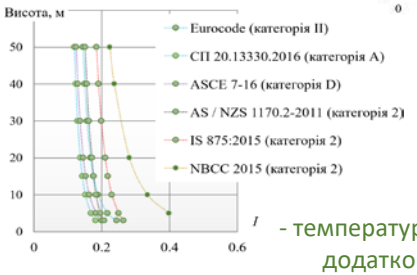
Типова конструкція призматичної ємності зберігання



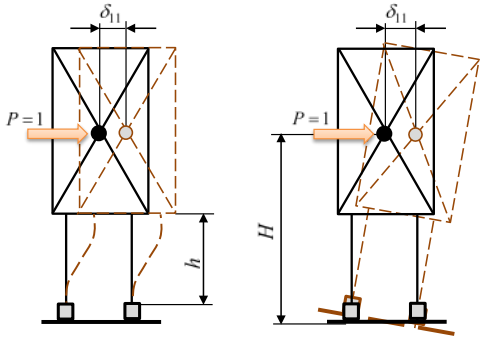
Дослідження основних груп навантажень та аналіз їх нормування



- вітрові навантаження

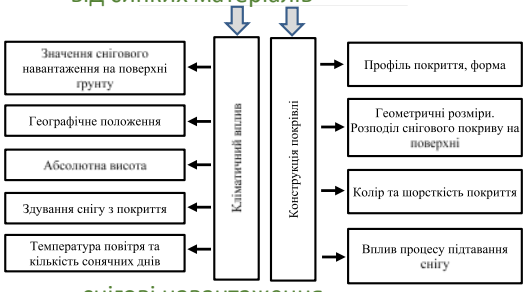


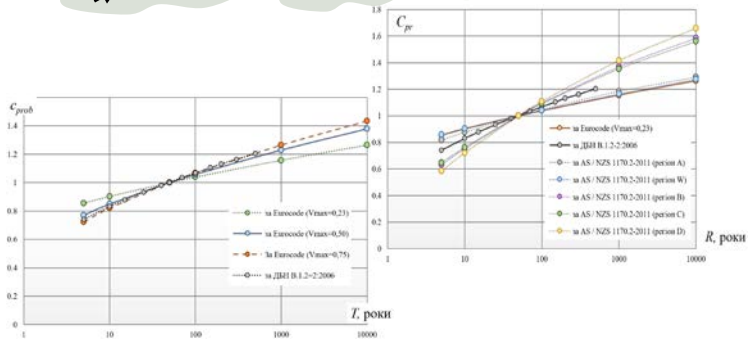
- температурні, сейсмічні та інші додаткові навантаження



- від сипких матеріалів

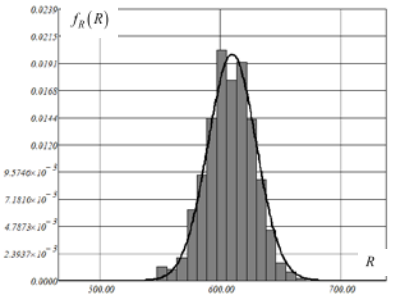
- снігові навантаження





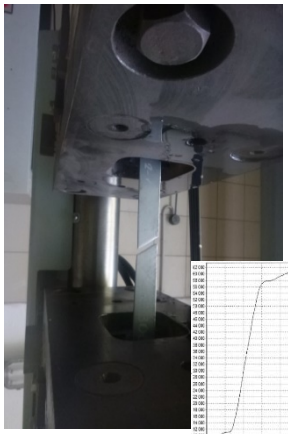
Експериментальні дослідження властивостей сталей для виробництва

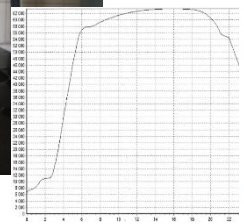
Серія зразків сталі після руйнування

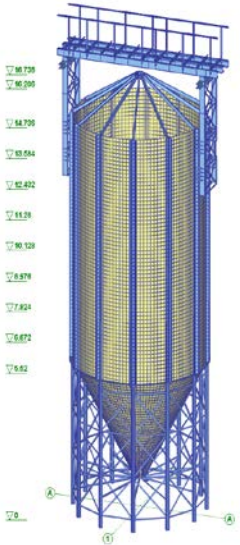


Гістограма розподілу границі текучості сталі класу S 550

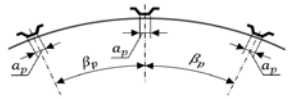
Процес фізико-механічного випробування сталевих зразків на розривній машині Р-50М2





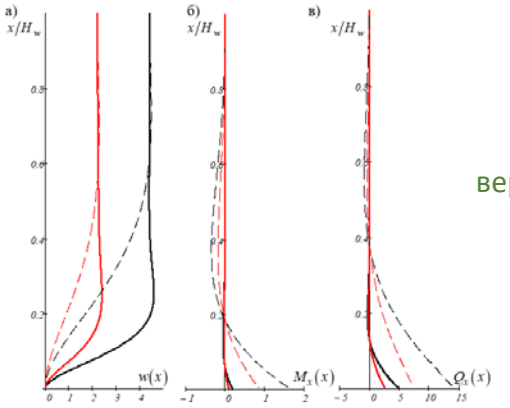


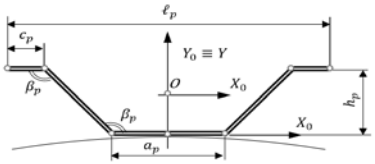
Розрахунок ємностей з плоским днищем, як оболонок обертання змінної жорсткості при осесиметричному навантаженні



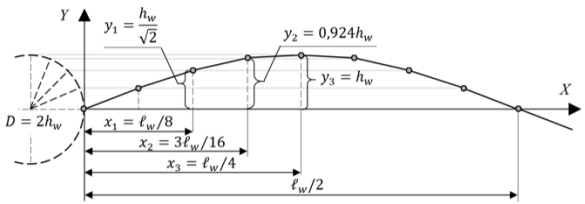
Графіки прогинів (а), погонних згинальних моментів (б) та погонних поперечних сил (в)

Варіанти панелей для дослідження жорсткісних характеристик

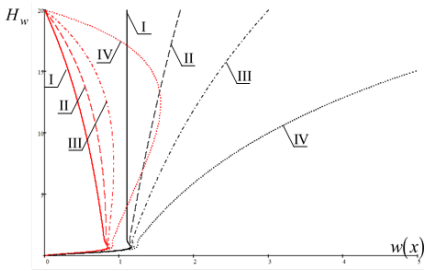


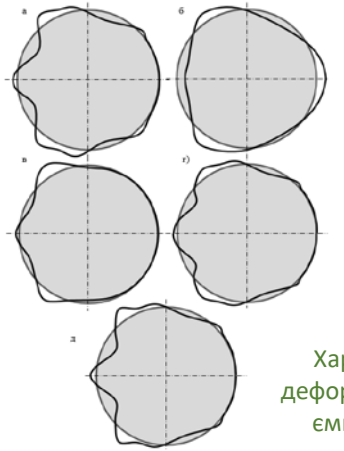


До визначення геометричних характеристик вертикального ребра та переходу до еквівалентної оболонки



Варіанти панелей для дослідження жорсткісних характеристик

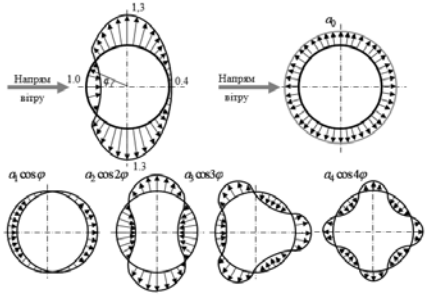




Характер деформування ємностей

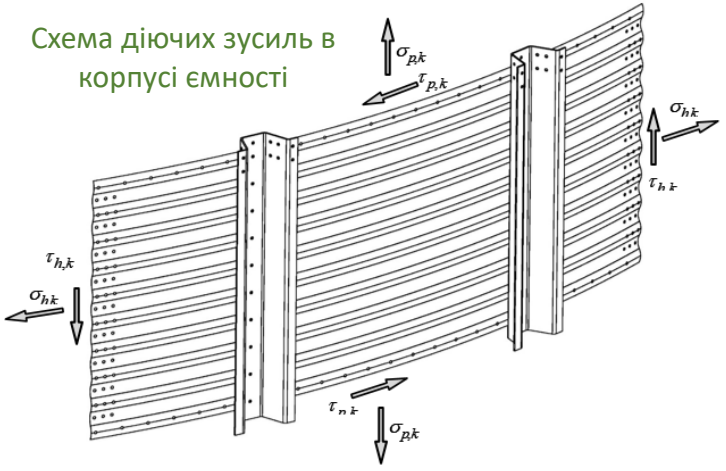
Дослідження впливу несиметричного квазірівномірного навантаження

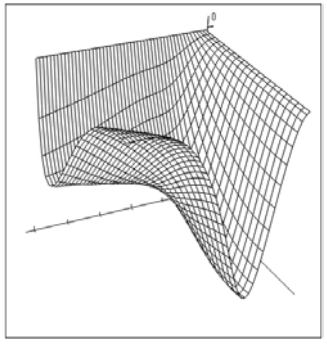
№	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6	a_7	a_8	ξ_p	ξ_h	ξ_s
5	-0,380	0,326	0,686	0,478	0,040	н	н	н	н	8,01	0,77	1,32
6	-0,380	0,337	0,686	0,489	0,040	-0,114	н	н	н	5,27	0,72	1,37
			0,690	0,489	0,044	-0,114	-0,048	н	н	3,63	0,70	1,42
			0,690	0,490	0,044	-0,113	-0,048	-0,016	н	2,88	0,70	1,44
			0,692	0,490	0,046	-0,113	-0,046	-0,016	-0,021	1,65	0,69	1,45

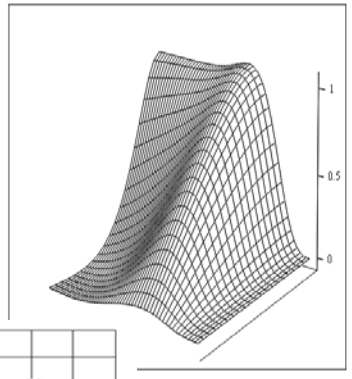


Розкладення в ряд аеродинамічного коефіцієнту вітрового тиску за периметром циліндричної ємності

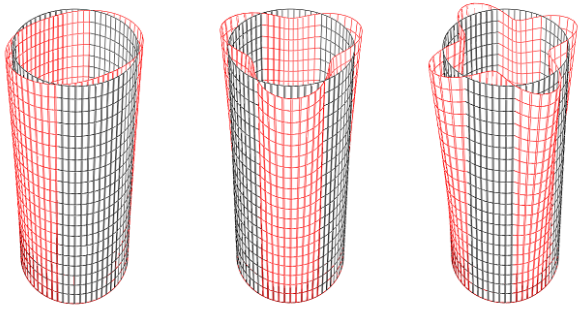
Схема діючих зусиль в корпусі ємності

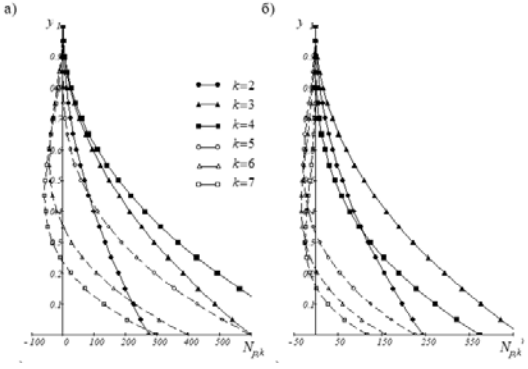




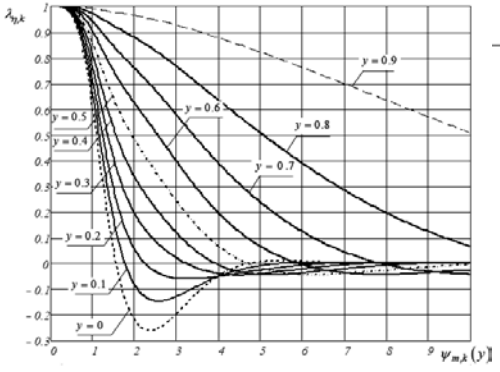


Просторовий характер деформування ємностей при різних гармоніках тригонометричного косинус розкладення

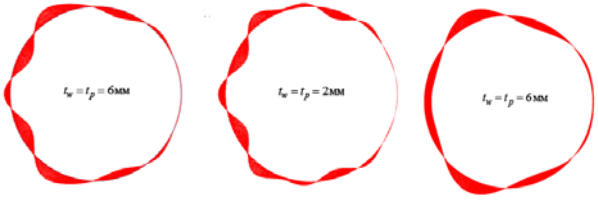




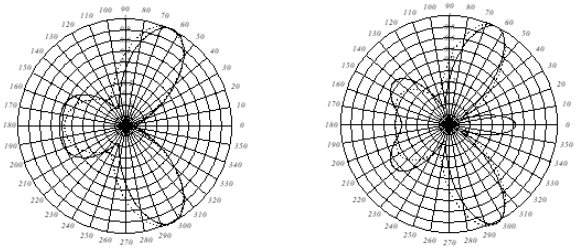
Поздовжні зусилля у вертикальних ребрах ємності



Ізометричне представлення та номограми розрахункових функцій



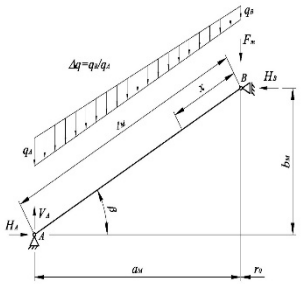
Переміщення точок корпусу ємності

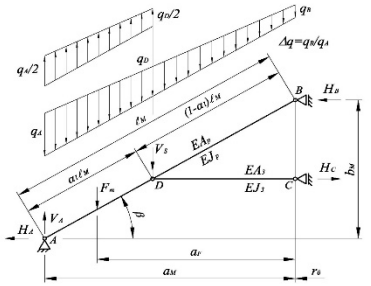


Представлення реакцій ємностей в безрозмірних полярних координатах

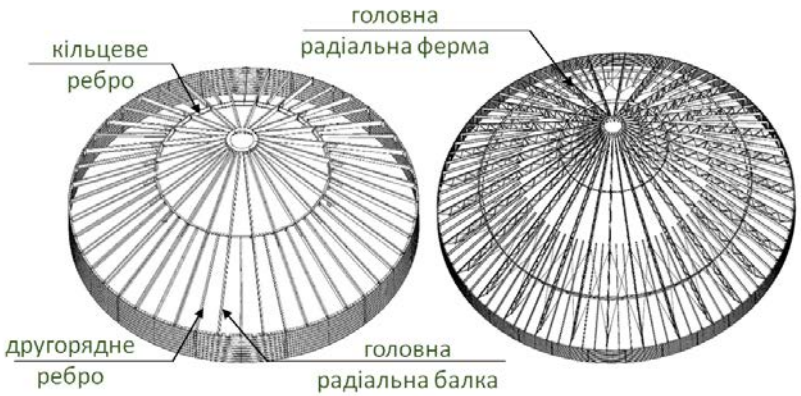
Розрахунок напружено-деформованого стану конусних покрівель

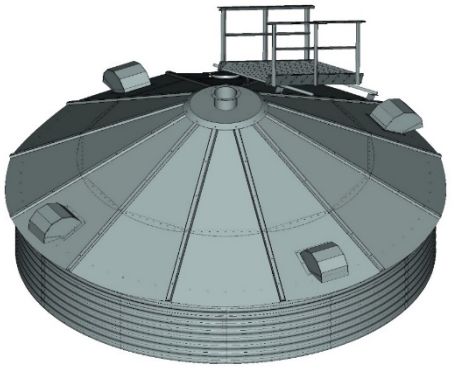
Розрахункові схеми

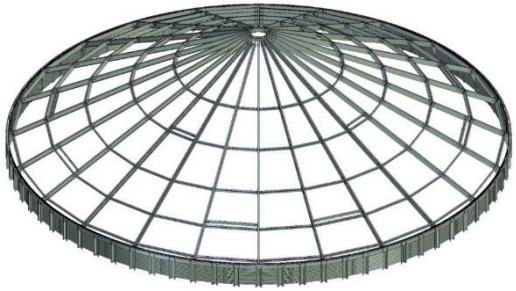




Типи покрівель







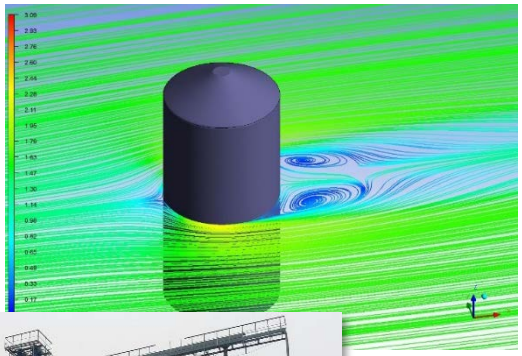
Внутрішні зусилля

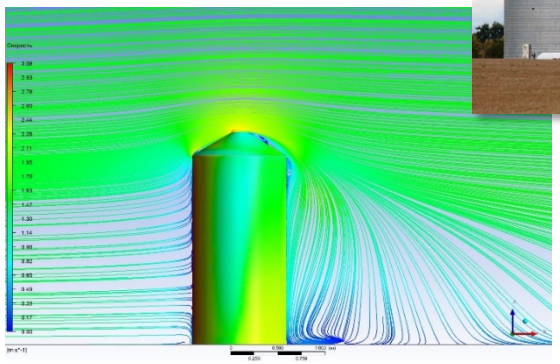
Функція зусилля	Вирази для зусилля
$V_A,\ H_A,\ H_B$	$V_A = \frac{q_A \ell_M}{2}(1+\Delta q) + F_m, \quad H_A = -H_B = \frac{6F_m(1-\Delta H) + q_A \ell_M (1+2\Delta q)}{6\,\mathrm{tg}\,\beta}$
$N_{q,F}(y)$	$-\sin\beta\left[\frac{H_A}{\mathrm{tg}\,\beta} + F_m + q_A \ell_M y\left(\Delta q + \frac{y}{2}(1-\Delta q)\right) + \Delta N\right]$
$Q_{q,F}(y)$	$q_A \ell_M \cos\beta\left[y\Delta q - \frac{1}{3}\left(\frac{1}{2} + \Delta q\right) + \frac{y^2}{2}(1-\Delta q) + \Delta Q\right]$
$M_{q,F}(y)$	$\frac{q_A \ell_M^2}{6} y \cos\beta (1-y)[1 + y(1-\Delta q) + 2\Delta q] + \Delta M$

Нерівномірно розподілене навантаження	
$N_{p,q}(y)$	$-q_A \ell_M \sin\beta\left(\frac{1+2\Delta q}{6\,\mathrm{tg}^2\,\beta} + y\Delta q + y^2\frac{1-\Delta q}{2}\right)$
$Q_{p,q}(y)$	$-q_A \ell_M \cos\beta\left(-\frac{1+2\Delta q}{6} + y\Delta q + y^2\frac{1-\Delta q}{2}\right)$
$M_{p,q}(y)$	$\frac{q_A \ell_M^2 \cos\beta}{6} y\left[1 + 2\Delta q - y\left(3\Delta q + y - y\Delta q\right)\right]$
Δ_{1q}	$\frac{q_A \ell_M^4}{720 EJ_M}\sin 2\beta\alpha_1(1-\alpha_1)\left[8(1+\alpha_1) + 3\alpha_1^2(\alpha_1 - 4) + \Delta q(1+\alpha_1)(7-3\alpha_1^2)\right]$

Моделювання вітрових впливів на силосні парки

Верифікаційні тести

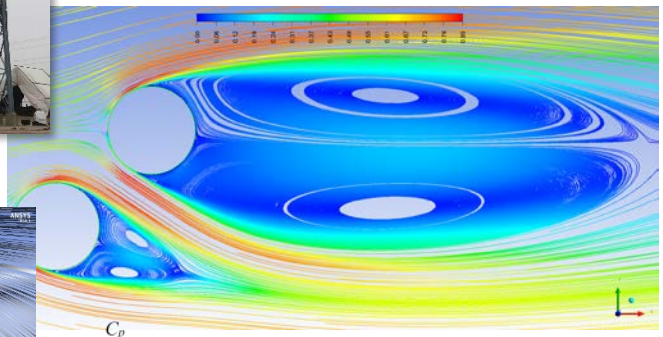


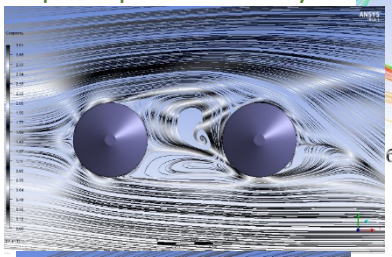


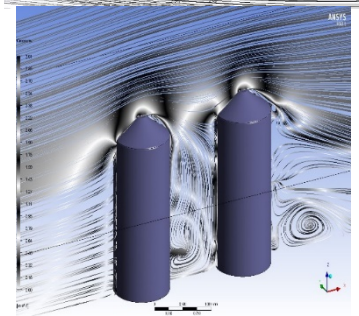
Ізометричні поля обтікання

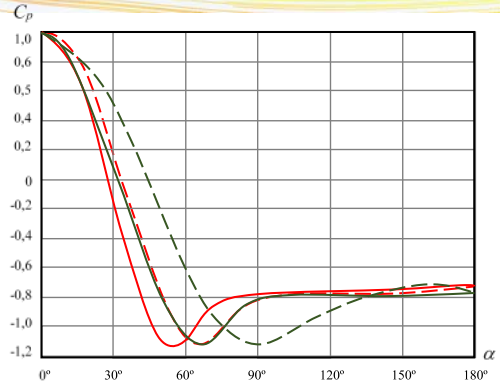
3D-моделювання просторового потоку

Ізометричні поля обтікання

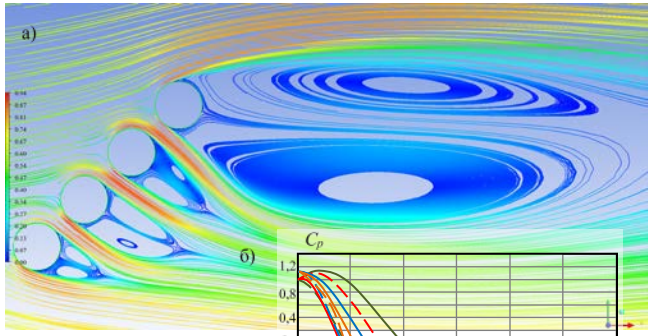


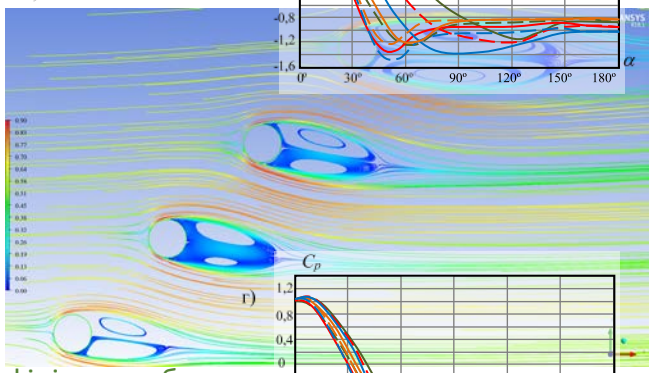






Графік зміни аеродинамічних коефіцієнтів





Коефіцієнти лобового опору

Серія, №	Безрозмірна центрована відстань		Дві ємності Re = 3900; D_w = 100 мм	
A.3	a/D_w	c/D_w	C_1	C_2
22	1,1	1,1	1,00210	0,762546
23	1,2	1,2	0,990585	0,783024
24	1,4	1,4	0,978033	0,807677

Імовірнісне представлення коефіцієнту критичного фактору

Резерв несучої здатності

$$\tilde{Y} = \tilde{R} - \tilde{S} \geq 0$$

Коефіцієнт критичного фактору

$$\tilde{K}_R = \tilde{S} / \tilde{R} \leq 1{,}0$$

узагальнене зусилля

узагальнена міцність

Коефіцієнт запасу

$$\tilde{\xi}_R = \tilde{R} / \tilde{S} \geq 1{,}0$$

Статистичні характеристики

математичне очікування ККФ

$$m_K = V_R p_S / V_S$$

Середньоквадратичне відхилення ККФ

$$\sigma_K \approx p_S \frac{V_R}{V_S} \sqrt{V_S^2 + V_R^2}$$

коефіцієнт варіації ККФ

$$V_K \approx \sqrt{V_S^2 + V_R^2}$$

Закони розподілу

I варіант

$$f_K(K_R) = \frac{1}{2\pi p_S V_R} \int_{-1/V_R}^{\infty} (1 + K_R V_R) \exp\left[-A_K(K_R) x^2 - 2B_K(K_R) x - C_K(K_R) \right] dx$$

$$A_K(K_R) = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{K_R^2}{p_S^2}\right), \quad B_K(K_R) = \frac{K_R}{2p_S}\left(\frac{K_R}{p_S V_R} - \frac{1}{V_S}\right), \quad C_K(K_R) = \frac{1}{2}\left(\frac{K_R}{p_S V_R} - \frac{1}{V_S}\right)^2$$

II варіант

$$f_K(K_R) = \frac{1}{K_R \sqrt{2\pi}} \int_{Z_0}^{1} D_K(K_R, Z) \exp\left\{ -0.5 \left[D_K(K_R, Z) - \frac{1}{V_R} \right]^2 \right\} dZ$$

$$D_K(K_R, Z) = \frac{p_S}{K_R}\left[\frac{1}{V_S} - 0.45 - 0.78 \ln(-\ln Z) \right], \qquad Z_0 = \exp\left[-\exp\left(\frac{1.282}{V_S} - 0.577 \right) \right]$$

Методика пошуку функції надійності

КРОК 1. Вибірка значень коефіцієнту критичного фактора

$$K_{R,i} = \frac{m_S}{m_R} \cdot \frac{1+\gamma_{S,i} V_S}{1+\gamma_{R,i} V_R} = m_K \cdot \gamma_{K,i}$$

Математичне очікування ККФ

$$m_K = \frac{m_S}{m_R}$$

виступає коефіцієнтом пропорційності

Вибірка значень ККФ

$$\gamma_{K,i} = \frac{1+\gamma_{S,i} V_S}{1+\gamma_{R,i} V_R}$$

обумовлює імовірнісні властивості

КРОК 2. Побудова полігону та функції розподілу

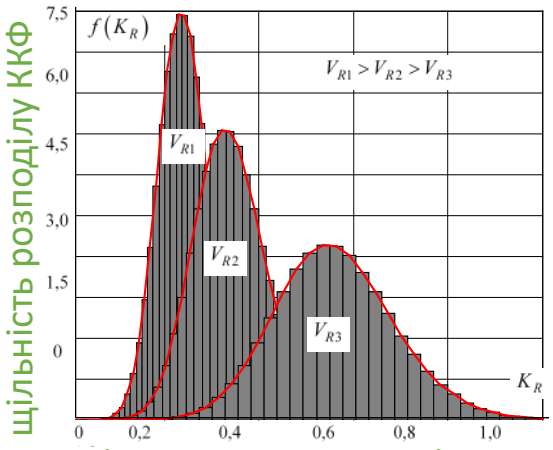
КРОК 3. Апроксимація дослідних даних в заданому діапазоні імовірностей

$$K_R = m_K \cdot \left(A_K y^2 + B_K y + C_K \right)$$

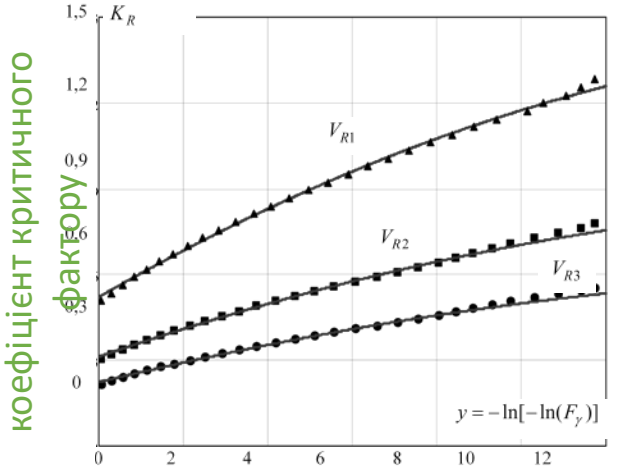
КРОК 4. Фактична імовірність безвідмовної роботи

$$y = \left[\sqrt{B_K^2 - 4A_K (C_K - 1/m_K)} - B_K \right] \Big/ (2A_K)$$

Класична шкала



Критична імовірнісна шкала



Імовірнісний розрахунок

❑Випадок центрального стиску

нормований вираз

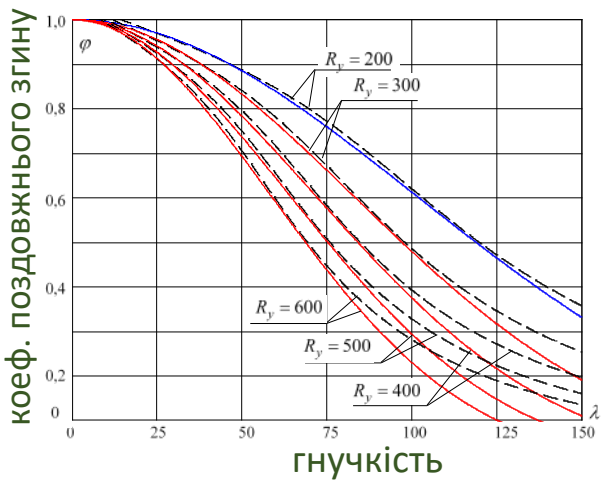
$$\tilde{R} \longrightarrow \varphi \cdot R_y$$

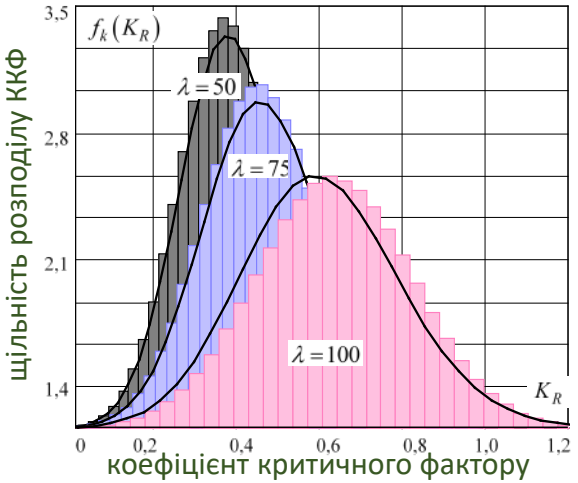
$$\varphi = \frac{E}{2\lambda^2 R_y}\left[\pi^2\left(1-\alpha+\beta\lambda\sqrt{\frac{R_y}{E}}\right)+\lambda^2\frac{R_y}{E}-\sqrt{\left(\pi^2\left(1-\alpha+\beta\lambda\sqrt{\frac{R_y}{E}}\right)+\lambda^2\frac{R_y}{E}\right)^2-39{,}48\lambda^2\frac{R_y}{E}}\right],$$

апроксимована залежність

$$\varphi = \exp\left(-\delta\cdot\frac{\lambda^{\xi}}{\pi^2}\cdot\frac{R_y}{E}\right)$$

параметри кривої стійкості





ККФ центрально-стисненого елемента

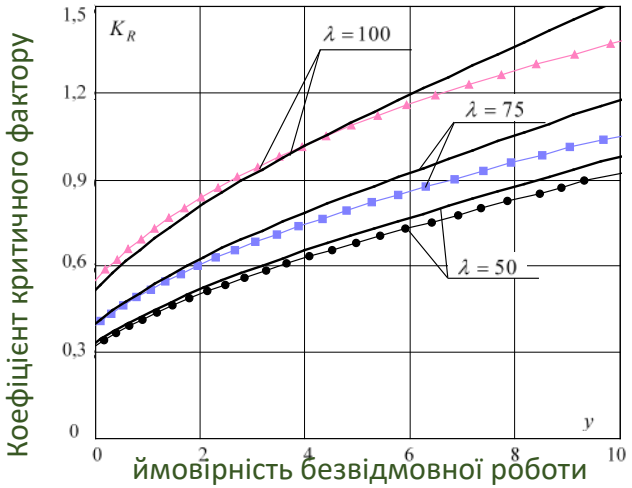
$$K_{R,i} = m_K \cdot \gamma_{K,i} \cdot \exp\left[\beta\cdot\frac{\lambda^2}{\pi^2}\cdot\frac{m_R}{E}\cdot\gamma_{R,i}V_R\right]$$

$$K_{R,i} = m_K \cdot \gamma_{K,i}$$

$$\exp(\bullet) \approx 1{,}0$$

математичне очікування ККФ стисненого елемента

$$m_K = \frac{m_S}{m_R}\cdot\exp\left(\beta\cdot\frac{\lambda^2}{\pi^2}\cdot\frac{m_R}{E}\right)$$



Імовірнісний розрахунок

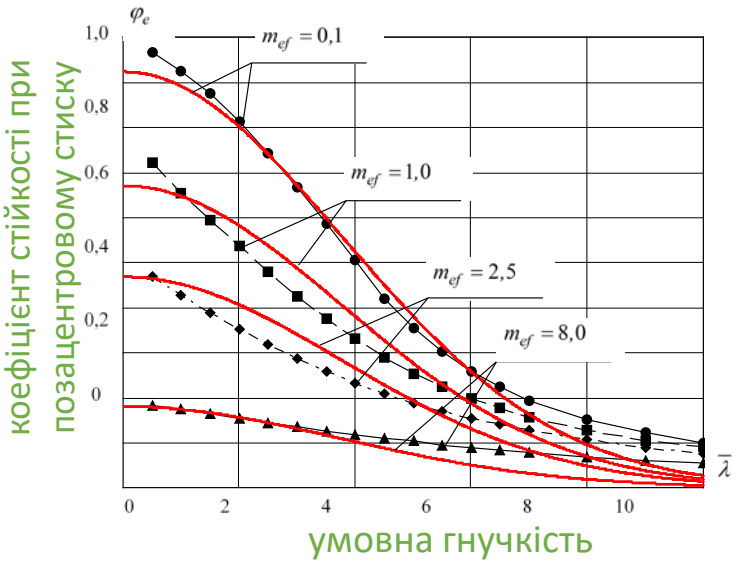
❑Позацентрово-стиснені елементи

Апроксимована залежність для коефіцієнта стійкості при позацентровому стиску

$$\varphi_e = \exp\left(-0{,}4\bar{\lambda}^2/\pi^2 - 0{,}4m_{ef}^{0.7}\right) = \exp\left(-0{,}4\bar{\lambda}^2/\pi^2\right)\cdot\exp\left(-0{,}4m_{ef}^{0.7}\right)$$

$\bar{\lambda} = \lambda\sqrt{R_y/E}$ — умовна гнучкість

приведений відносний ексцентриситет



ККФ позацентрово стисненого елемента

$$K_{R,i} = \frac{m_S}{m_R}\cdot\frac{1+\gamma_{S,i}V_S}{1+\gamma_{R,i}V_R}\cdot\exp\left(0{,}4m_{ef}^{0.7}\right)\cdot\exp\left[0{,}4\frac{\lambda^2}{\pi^2}\cdot\frac{m_R}{E}\cdot(1+\gamma_{R,i}V_R)\right] \Rightarrow K_{R,i} = m_K\cdot\gamma_{K,i}$$

Імовірність безвідмовної роботи конструкцій ємностей зберігання

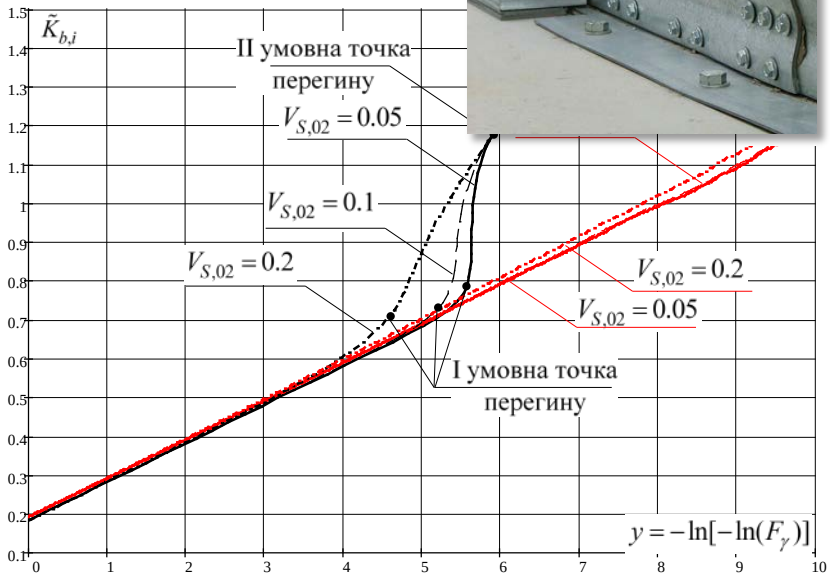
$$y = -\ln[-\ln(F_\gamma)] = \frac{\sqrt{\alpha_B^2 - 4\alpha_A^2(1-\alpha_C V_S - 1/m_K)} - \alpha_B}{2\alpha_A} \qquad F_\gamma = \exp\left[-\exp\left(\frac{\alpha_B - \sqrt{\alpha_B^2 - 4\alpha_A^2(1-\alpha_C V_S - 1/m_K)}}{2\alpha_A}\right)\right]$$

Оцінка надійності багатоболтових з’єднань листів корпусу

ККФ однорідного болтового з’єднання

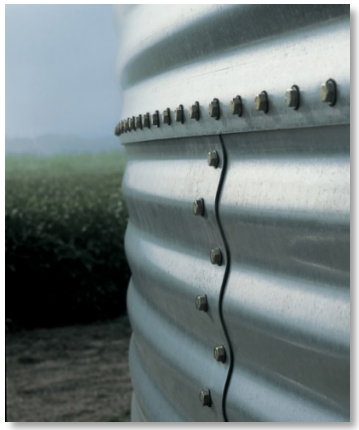
$$\tilde{K}_{b,i} = \frac{\tilde{S}_i}{\tilde{R}_{bs,i} \cdot A_b \cdot n} = \frac{1{,}273}{d_b^2 \cdot n} \cdot \frac{m_S}{m_{bs}} \cdot \frac{1 + V_S \tilde{\gamma}_{S,i}}{1 + V_{bs} \tilde{\gamma}_{bs,i}} = m_b \cdot \frac{1 + V_S \tilde{\gamma}_{S,i}}{1 + V_{bs} \tilde{\gamma}_{bs,i}}$$

нормована випадкова величина міцності болта



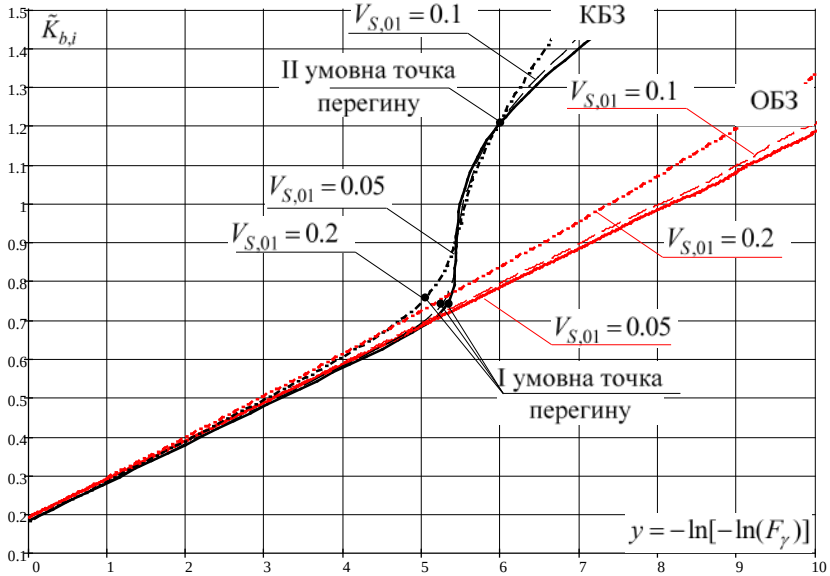
ККФ квазіоднорідного болтового з’єднання

$$\tilde{K}_{b,i} = \frac{1{,}273}{d_b^2} \cdot \frac{m_S \cdot (1 + V_S \tilde{\gamma}_{S,i})}{[m_{bs1} \cdot n_1 \cdot (1 + V_{bs1} \tilde{\gamma}_{bs1,i}) + m_{bs2} \cdot n_2 \cdot (1 + V_{bs2} \tilde{\gamma}_{bs2,i})]}.$$



Умови обчислення коефіцієнта критичного фактору

$$\tilde{K}_{b,i} = \begin{cases} \tilde{S}_i / (\tilde{S}_{01,i} + \tilde{S}_{02,i}), & if \quad \tilde{S}_i / \tilde{S}_{01,i} < 2 \ \wedge \ \tilde{S}_i / \tilde{S}_{02,i} < 2; \\ \tilde{S}_i / \tilde{S}_{01,i}, & if \quad \tilde{S}_i / \tilde{S}_{01,i} < 2 \ \wedge \ \tilde{S}_i / \tilde{S}_{02,i} \geq 2; \\ \tilde{S}_i / \tilde{S}_{02,i}, & if \quad \tilde{S}_i / \tilde{S}_{01,i} \geq 2 \ \wedge \ \tilde{S}_i / \tilde{S}_{02,i} < 2; \\ \tilde{S}_i / (\tilde{S}_{01,i} + \tilde{S}_{02,i}) & if \quad \tilde{S}_i / \tilde{S}_{01,i} \geq 2 \ \wedge \ \tilde{S}_i / \tilde{S}_{02,i} \geq 2. \end{cases}$$



ймовірність безвідмовної роботи

Економічний підхід до визначення оптимального рівня надійності

ризик відмови

ризик перевитрат матеріалів

інші витрати

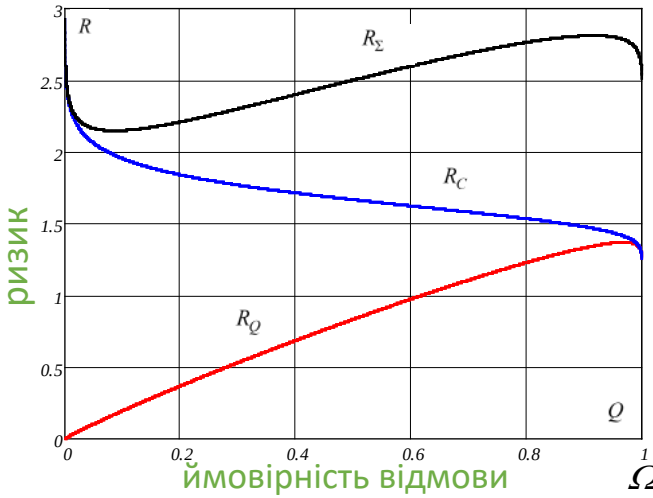
імовірність відмови

сумарний ризик → $R_\Sigma(Q) = R_C(Q) + R_Q(Q) = \alpha_C \cdot C_C + (\alpha_C \cdot C_C + C_G) \cdot Q = \alpha_C \cdot C_C \cdot [1 + Q \cdot (1 + \alpha_Q)]$

вартість ємності (металоємність)

вартість продукту зберігання

$\alpha_Q = \dfrac{C_G}{C_C}$



Площа поперечного перерізу як функція імовірності відмови

$$A_p(Q) = \frac{m_N}{m_R}\left\{A_K[\ln(-\ln(1-Q))]^2 - B_K \ln(-\ln(1-Q)) + C_K\right\}$$

параметр економічного збитку

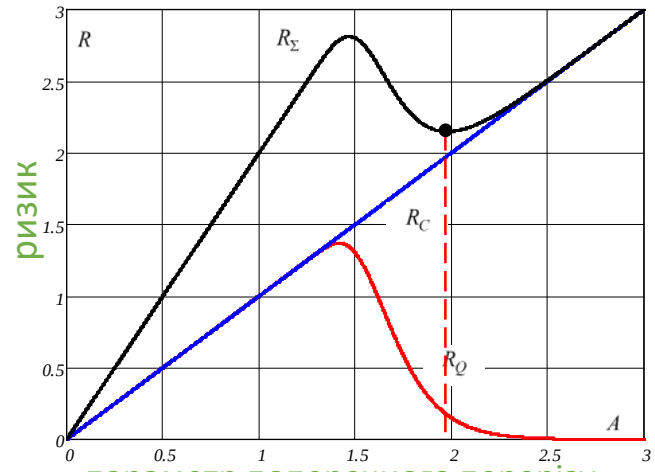
$$R_\Sigma(Q) = k_C \cdot \frac{m_N}{m_R} \cdot \left(1 + Q \cdot \Omega_Q\right) \cdot \left\{A_K y_Q^2 - B_K y_Q + C_K\right\},$$

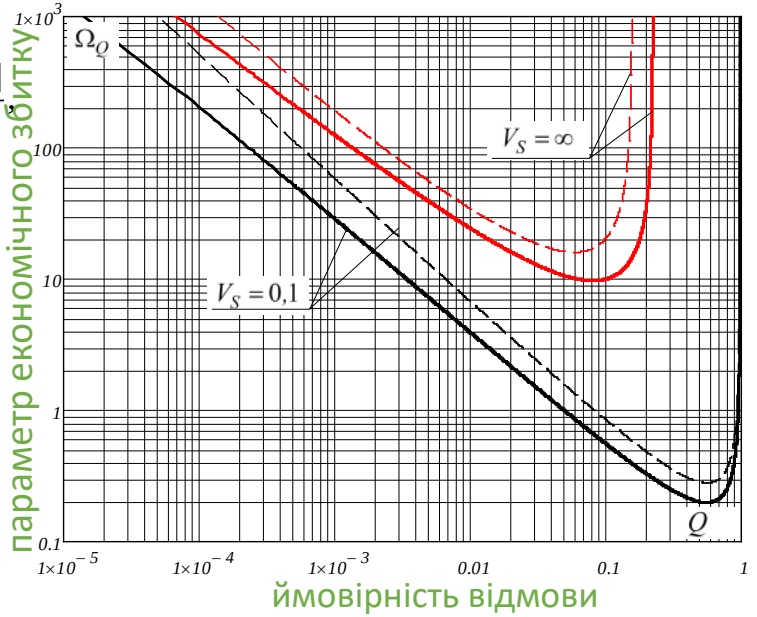
нормальний розподіл

$$\Omega_Q = \frac{1}{Q} \cdot \frac{\alpha_B - 2\alpha_A \ln[-\ln(1-Q)]}{V_S^{-1} - \alpha_B \ln[-\ln(1-Q)]}$$

розподіл Гумбеля

$$\Omega_Q = \frac{1}{Q} \cdot \frac{1}{V_S^{-1} - \ln[\ln(1-Q)]}.$$





Висновки:

- виявлено суттєві відмінності в методах оцінки основних параметрів вітрових впливів, що провокує значні розбіжності при кількісній оцінці значень вітрових навантажень (до 60%) на ємності зберігання за нормами різних країн при однакових вхідних параметрах. Встановлено, що основними чинниками неузгодженості є аеродинамічні характеристики (розбіжності до 30-50%) та частка пульсаційної складової вітрового навантаження (відрізняється у 1,2-1,7 рази в різних світових стандартах) для визначеного класу споруд;

- отримано нові дані, щодо статистичних характеристик (математичне сподівання та коефіцієнт варіації) умовної границі текучості і тимчасового опору, на якому стає можливим вирішення прикладних задач надійності сталевих ємностей зберігання;

- розроблено систему наукових методів встановлення параметрів напружено-деформованого стану елементів ємностей з урахуванням ряду їх конструктивні особливостей. Сформовано спрощений метод розрахунку параметрів синусоїдального профілю та доведено, що ефективність профілювання листів корпусу ємності при збільшенні їх товщини знижується. Для безреберних ємностей отримано нові аналітичні залежності для визначення прогинів, погонних згинальних моментів та погонних поперечних сил в ємностях з різним примиканням до основи при рівномірно розподіленому по периметру та висоті ємності навантаженні та експоненціальному навантаженні за формулою Янсена-Кенена;

- для типової розрахункової ситуації, коли на порожню ємність діє максимальний вітровий потік, рекомендована авторська аналітична методика для визначення всіх внутрішніх силових факторів по висоті ємності та отримано нові аналітичні вирази для трьох компонентів переміщення точок корпусу, а також нормальних та зсувних напружень;

Висновки:

- здійснено повну оцінку внутрішніх зусиль елементів каркасу та отримано систему аналітичних залежностей для оцінки параметрів напружено-деформованого стану конусних покрівель різних розмірів та конфігурації;

- розроблено точну числову модель дво- та тривимірного турбулентного потоку повітря. На основі виконаних верифікаційних тестів створено спеціальну методику із побудови кінцево-елементних сіток в задачах моделювання вітрових впливів на циліндричні ємності, яка реалізована у параметричному вигляді. На основі виконаного масштабного експерименту із моделювання вітрових впливів на ємності зберігання зерна вперше сформовано спеціальний аеродинамічний атлас, в якому наведені графіки розподілу коефіцієнта вітрового тиску по поверхні ємностей для переважної більшості реальних компоновок силосних парків;

- сформульована авторська методологія розрахунку конструкцій ємностей зберігання зерна на надійність в рамках якої для визначення статистичних характеристик коефіцієнта критичного фактору (закон розподілу, математичне сподівання та коефіцієнт варіації) використано імітаційну процедуру Монте-Карло, у якій, на відміну від попередніх досліджень, при моделюванні випадкових величин міцності та навантажень використано вибірки великого об’єму. Розроблена інженерна методика визначення показника імовірності безвідмовної роботи конструкцій ємностей, що працюють в умовах згину, осьового й позацентрового стиску або розтягу при стохастичних властивостях зовнішніх впливів та параметрів міцності сталі;

- сформульована концепція імовірнісного розрахунку багатоболтових з’єднань листів корпусу циліндричних ємностей, утворених із болтів однакового та різних класів міцності;

- виконано економіко-ймовірнісний опис оптимальних рівнів надійності сталевих конструкцій ємностей, який базується на основі мінімізації функцій сумарного ризику.