УДК 539.3

О.О. Лук'янченко, канд. техн. наук
О.М. Рудинок, канд. техн. наук
Г.Р. Ашмаріна

ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМИ ЗАПОБІГАННЯ ПОДАЛЬШОГО РУЙНУВАННЯ ЦЕГЛЯНОЇ ДИМОВОЇ ТРУБИ

Розроблена методика розрахунку несучої здатності цегляної димової труби з урахуванням локальних руйнувань її стовбура при сумісній дії вітру, власної ваги та нагрівання відвідними газами. Проблема запобігання подальшого руйнування труби та забезпечення її безаварійної експлуатації вирішується за допомогою стяжних кілець, які встановлюються по всій висоті стовбура труби до усунення виявлених пошкоджень. В роботі виконаний розрахунок несучої здатності реальної цегляної димової труби з локальними руйнуваннями її стовбура, визначені розрахункові сили натягу стяжних кілець, надані рекомендації до їх встановлення.

Димові труби відносяться до складних спеціальних інженерних споруд баштового типу. Вони є невід'ємною частиною промислових підприємств і теплових електростанцій. В даний час на промислових підприємствах України експлуатується більше 5000 цегляних і металевих димових труб, призначених як для створення тяги, так і для відводу у верхні шари атмосфери і подальшого розсіювання шкідливих газів і газоповітряних сумішей [1,2,3]. Цегляні труби використовуються для відведення димових газів різного ступеня агресивності в широкому діапазоні температур. При технічно грамотній експлуатації вони є найбільш довговічними, бо мають основну перевагу - простоту їх ремонту, який не вимагає спеціальних пристосувань і будівельних механізмів. Питання забезпечення безаварійної експлуатації димових труб є актуальною, бо вихід їх з ладу може призвести не тільки до зупинки виробництва з великими економічними втратами, а і до людських жертв. Димові труби знаходяться під безперервною дією вітрових навантажень, що викликають помітні коливання і пов'язані з ними знакозмінні напруження. В результаті впливу атмосферних опадів і відвідних агресивних газів найбільш пошкодженими є оголовки труб. Перепад температур по товщині труби, вибухи газової суміші "хлопка", удари блискавки, локальні руйнування цегли, нерівномірні осідання основ під фундаментом труби, одностороннє зволоження зовнішньої поверхні труби викидами пари та води найбільш пошкоджують стовбури труб. Тому обов'язковим є технічний нагляд за станом конструкцій: контроль технологічних режимів їх експлуатації, загальний або частковий огляд, планове або позапланове обстеження елементів конструкцій,

© Лук'янченко О.О., Рудинок О.М., Ашмаріна Г.Р.

своєчасне виявлення та усунення їх дефектів і пошкоджень. При реконструкції цегляної кладки стовбурів димових труб для запобігання їх подальшого руйнування рекомендується до закладання виявлених тріщин провести установку стяжних кілець та їх натяг.

В статті представлена методика розрахунку несучої здатності цегляної димової труби з урахуванням локальних руйнувань її стовбура при сумісній дії вітру, власної ваги та нагрівання відвідними газами, визначення сил натягу стяжних кілець. Алгоритм методики складається з:

- визначення геометричних та механічних характеристик стовбуру труби і його половини;
- визначення розрахункового вітрового навантаження;
- побудови епюр згинальних моментів і перерізуючих сил від дії вітру;
- визначення нормальних напружень від дії вітру, що виникають на поверхні цільної труби, та труби, складеної з двох окремих її половин;
- визначення дотичних напружень від дії вітру, що виникають в середині цільної труби;
- визначення розтягуючих зусиль в стяжних кільцях на 1 пог. м висоти стовбура, з умови рівності дотичних напружень силам тертя, що виникають між половинами стягнутої скобами труби;
- визначення розтягуючих зусиль в стяжних кільцях на 1 пог. м висоти стовбура від нагрівання ствола відвідними газами;
- визначення необхідної відстані між стяжними кільцями і сил їх натягу з урахуванням рекомендованої відстані між ними.

Наведений алгоритм реалізуємо для цегляної димової труби, конструкція стовбура якої представлена на рис. 1. Кладка стовбура виконана із цегли марки М100 на розчинах марки М25 на відмітках від 5,0 *м* до 55,0 *м* та М50 на інших відмітках.

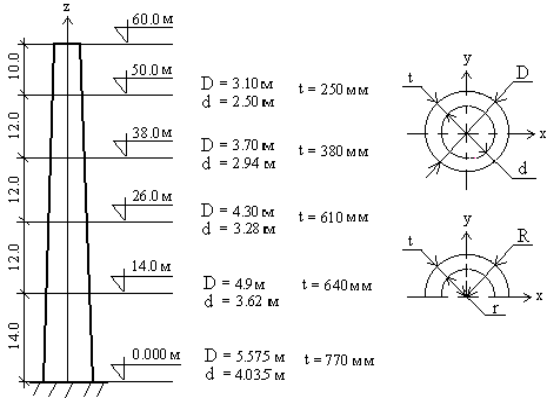

Рис. 1. Конструкція стовбура цегляної димової труби

Геометричні та механічні характеристики димової труби та її половини зведені в табл. 1.

Таблиця 1

Відмітки h, *м*	D, м	d, м	Площа поперечного перерізу F, $м^2$		Момент інерції J_x, $м^4$		Момент опору W, $м^3$	
			цільної труби	половини труби	цільної труби	половини труби	цільної труби	половини труби
0,50	5,575	4,03	11,626	5,813	35,046	3,666	12,343	2,961
14,0	4,900	3,62	8,565	4,283	20,238	1,936	8,110	1,878
26,0	4,300	3,28	6,072	3,036	11,307	1,075	5,163	1,132
38,0	3,70	2,94	3,963	1,982	5,635	0,532	2,990	0,594
50,0	3,10	2,50	2,639	1,319	2,664	0,251	1,688	0,279

Розрахунок вітрового навантаження, що діє на конструкцію димової труби, виконуємо згідно [4]. Нормативну статичну складову вітрового навантаження $q_н$ визначаємо за формулою

$$q_н = q_0 \cdot k \cdot c\,, \tag{1}$$

де q_0 − швидкісний напір вітру на висоті 10 *м* над поверхнею землі, що приймається в залежності від району (для II району q_0 = 400 $Н/м^2$), k − коефіцієнт, що враховує зміну швидкісного напору по висоті в залежності від типу місцевості (для типу місцевості А: ≤5*м* k = 0,75; ≤10*м* k =1; ≤20*м* k =1,25; ≤40*м* k =1,5; ≤60*м* k =1,7), c − аеродинамічний коефіцієнт, який приймається відповідно до вказівок [4] (для димової труби круглого перерізу c = 0,6).

Розрахункове значення статичної складової вітрового навантаження q_p визначаємо за формулою

$$q_p = q_н \cdot \gamma\,, \tag{2}$$

де $q_н$ − нормативна статична складова вітрового навантаження, γ − коефіцієнт надійності за навантаженням (приймаємо γ = 1,4).

Визначаємо розрахункове значення статичної складової вітрового навантаження на 1 *пог.м* висоти димової труби. Отримані результати зводимо в табл. 2.

На рис. 2 представлені розрахункові статичні складові вітрового навантаження на одиницю поверхні та одиницю довжини стовбура труби.

Обчислені моменти та перерізуючи сили, які виникають в трубі від дії статичної складової вітрового навантаження, представлені на рис. 3.

Таблиця 2

Відмітки h, *м*	Коефіцієнт, що враховує зміну швидкісного напору вітру, k	Діаметр димової труби D, *м*	Нормативна статистична складова вітрового навантаження, $q_н$, *Н/м²*	Розрахункова статистична складова вітрового навантаження q_p	
				на од. поверхні, *Н/м²*	на од. довжини труби, *Н/м*
0,50	0,75	5,575	180	252	1404,9
5,00	0,75	5,35	180	252	1348,2
10,0	1,0	5,075	240	336	1705,2
20,0	1,25	4,60	300	420	1932,0
40,0	1,5	3,50	360	504	1764,0
60,0	1,7	1,75	408	571	999,6

Нормальні напруження від дії вітру, що виникають на поверхні цільної труби, обчислюємо за формулою

$$\sigma_B = M / W, \qquad (3)$$

де M − згинальний момент від дії вітру; W − момент опору димової труби.

Нормальні напруження від дії вітру, що виникають на поверхні труби, з урахуванням опору двох окремих її половин визначаються згідно формули

$$\sigma_B = M \cdot y_{max}(y_ц) / 2J_x, \qquad (4)$$

де y_{max} − відстань від центра ваги половини труби до крайньої точки поверхні труби, $y_ц$ − координата центра ваги половини труби, J_x − момент інерції половини димової труби.

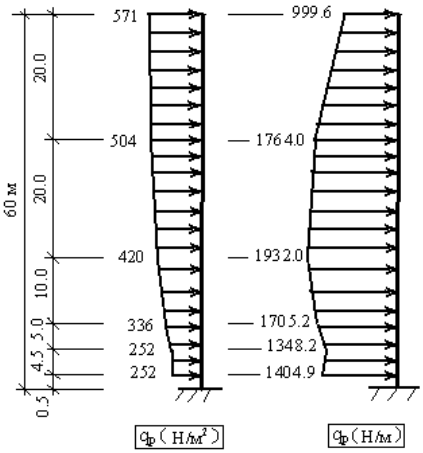

Рис. 2. Розрахункове вітрове навантаження

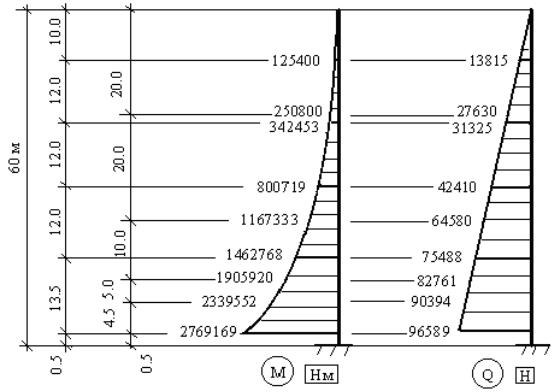

Рис. 3. Епюри згинальних моментів і перерізуючих сил

Визначаємо нормальні напруження від власної ваги для цільної труби за формулою

$$\sigma = N / F , \qquad (5)$$

де N − повздовжні зусилля в цільній трубі від власної ваги; F − площа поперечного перерізу димової труби.

На рис. 4 представлені навантаження від власної ваги стовбура труби та епюра повздовжніх зусиль. Значення отриманих напружень наведені в табл. 3.

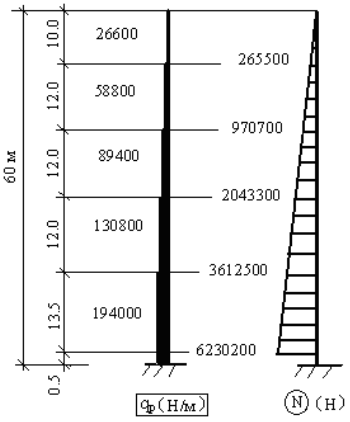

Рис. 4. Навантаження від власної ваги і епюра повздовжніх зусиль

Таблиця 3

Відмітки h, *м*	$y_{max} / y_ц$, *м*	Згинальний момент M, *кНм*	Повздовжні зусилля від власної ваги N, *кН*	Нормальні напруги від вітрового навантаження σ_B, *МПа*		Нормал. напруж. від власної ваги σ, *МПа*
				цільна труба	з урах. опору двох половин	
0,50	1,245/1,543	2769,17	6230,2	± 0,2243	+0,4702/-0,5827	-0,5359
14,0	1,084/1,366	1462,77	3612,5	± 0,1804	+0,4095/-0,5160	-0,4218
26,0	0,936/1,214	800,72	2043,3	± 0,1551	+0,3486/-0,4521	-0,3365
38,0	0,789/1,061	342,45	970,7	± 0,1145	+0,2539/-0,3410	-0,2449
50,0	0,655/0,895	125,40	265,5	± 0,0743	+0,1636/-0,2235	-0,1006

Нормальне від'ємне максимальне сумарне навантаження, яке виникає в кладці димової труби з тріщинами, становить: 0,5827+0,5359 = 1,12 *МПа*, а це менше розрахункового опору стиску кладки із цегли марки М100 на розчинах марок М25 (М50), яке дорівнює 1.4 ÷ 1.7 *МПа*. Умова міцності кладки на стиск задовольняється.

Димова труба з тріщинами являє собою дві її половини, цегляна кладка яких не сприймає розтягуючих зусиль, а значить, не може забезпечити міцність труби. Розрахунок показав (табл. 3), що існують позитивні (розтягуючи) значення нормальних сумарних напружень на відмітках 26,0 *м* і вище, що не припустимо. Тому необхідно зробити певні дії для забезпечення її роботи як цільної конструкції. Для цього пропонується встановити стяжні кільця, сили натягу яких необхідно розрахувати з умови рівності сил тертя, що виникають між половинами труби, та дотичним напруженням в цільній трубі від дії вітру.

Сумарні розтягуючи зусилля в стяжних кільцях на 1 пог. м висоти стовбура труби визначаємо за формулою

$$N = N_B + N_t , \tag{6}$$

де N_B − розтягуючи зусилля від вітрового навантаження, N_t − розтягуючи зусилля від нагрівання ствола відвідними газами.

Від вітрового навантаження розтягуючи зусилля в стяжних кільцях на 1 пог. м висоти стовбура труби визначаємо за формулою

$$N_B = \tau \cdot t / f , \tag{7}$$

де τ − дотичні напруження, що виникають в поперечному перерізі труби вздовж осі z (рис. 1) від дії вітру, f − коефіцієнт тертя (для вологих поверхонь − цегла по цеглі $f = 0{,}3$), t − товщина стінки труби на відповідних відмітках.

Дотичні напруження отримаємо з виразу

$$\tau = Q \cdot S_x / 2t \cdot J_x , \tag{8}$$

де Q − перерізуючи сили від дії вітру (рис. 3), t − товщина стінки димової труби, J_x − момент інерції суцільної труби, S_x − статичний момент половини труби, який визначаємо за формулою

$$S_x = F \cdot y_ц , \tag{9}$$

F − площа поперечного перерізу половини труби, $y_ц$ − координата центра ваги половини труби.

Отримані результати розрахунку представлені в табл. 4.

Розрахунок стяжних кілець на теплові зусилля в кладці ствола, що виникають від нагріву стовбура відвідними газами здійснюємо згідно [4,5,6].

Таблиця 4

Відмітки h, *м*	Статичний момент половини труби S_x, $м^3$	Товщина стінки труби t, *м*	Перерізу-ючі сили Q, *кН*	Дотичні напруження τ, *МПа*	Розтягуючі зусилля в стяжних кільцях N_B, *кН*
0,50	8,969	0,77	96,589	0,01605	41,195
14,0	5,851	0,64	75,489	0,01705	37,333
26,0	3,686	0,61	42,410	0,01133	23,037
38,0	2,103	0,38	31,325	0,01538	19,481
50,0	1,181	0,25	13,815	0,01225	10,208

Дані для теплотехнічного розрахунку:

1. Температура газів, що відводяться $t_Г = 500^0$C.
2. Температура зовнішнього повітря (взимку) $t_B = -20^0$C.
3. Швидкість газів, що відводяться $V_Г = 2{,}7\text{-}3{,}0$ *м/с*.
4. Швидкість зовнішнього повітря $V_B = 5$ *м/с*.
5. Будівельний матеріал футерівки − шамотна нормальна цегла.
6. Теплоізоляція − прошивні мінераловатні мати.
7. Будівельний матеріал ствола − цегла глиняна звичайна марки М100 (розчин марки 2М5 на відмітках від 5,0 *м* до 55,0 *м*, на інших відмітках - марки М50).

Розтягуючи зусилля в стяжних кільцях на 1 пог. м висоти стовбура від нагрівання ствола відвідними газами визначаємо за формулою

$$N_t = 50\sigma^t_{кл} x, \tag{10}$$

де $\sigma^t_{кл}$ − теплове напруження в кладці, x − висота стиснутої зони кладки (відстань від внутрішньої грані стінки до нульової лінії напруження).

Різниця температур зовнішнього повітря і газів, що відводяться:

$$t_Г - t_B = 500\text{-}(-20) = 520\ ^0\text{C}. \tag{11}$$

Термічний опір на внутрішній поверхні ствола:

$$R_B = \frac{1}{2+13\sqrt{V_Г}} = 1/(2+13\sqrt{3}) = 0{,}047\ м^2\ ^0\text{C}/Вт. \tag{12}$$

Термічний опір по зовнішній поверхні ствола:

$$R_H = \frac{1}{2+13\sqrt{V_B}} = 1/(2+13\sqrt{5}) = 0{,}037\ м^2\ ^0\text{C}/Вт. \tag{13}$$

Термічний опір футерівки:

$$R_{ф} = \frac{\delta_{ф}}{\lambda_{ф}} = 0{,}113/0{,}93 = 0{,}121\ м^2\ {}^0\text{C}\ /Вт, \qquad (14)$$

де $\lambda_{ф}$ − коефіцієнт теплопровідності футерівки (згідно [5] дорівнює 0,81-0,93 *Вт/м* ^{0}C), $\delta_{Ф} = 113\ мм$ − товщина футерівки.

Термічний опір теплоізоляції

$$R_{Т} = \frac{\delta_{Т}}{\lambda_{Т}} = 0{,}06/0{,}07 = 0{,}86\ м^2\ {}^0\text{C}\ /Вт, \qquad (15)$$

$$R_{Т} = \frac{\delta_{Т}}{\lambda_{Т}} = 0{,}08/0{,}07 = 1{,}14\ м^2\ {}^0\text{C}\ /Вт,$$

де $\delta_{Т}$ − товщина теплоізоляції (на висоті > 38,0 *м* − 60 *мм*, на висоті < 38,0 *м* −80*мм*), $\lambda_{Т}$ − коефіцієнт теплопровідності теплоізоляції (згідно [5] приймається 0,07 *Вт/м* ^{0}C).

Термічний опір стінки стовбура:

$$R_{С} = \frac{\delta_{С}}{\lambda_{С}}\ м^2\ {}^0\text{C}\ /Вт, \qquad (16)$$

де $\delta_{С}$ − товщина стінки стовбура на різних відмітках (див. рис. 1), $\lambda_{С}$ − коефіцієнт теплопровідності стінки стовбура (згідно [5] дорівнює 0,81 *Вт/м* ^{0}C).

Питому тепловтрату стінки стовбура в зимовий час визначаємо за формулою

$$Q_{З} = \frac{t_{Г} - t_{В}}{R_{В} + R_{Ф} + R_{Т} + R_{С} + R_{Н}}\ Вт/м^2. \qquad (17)$$

Різниця температур на внутрішній і зовнішній поверхнях стінки стовбура обчислюємо згідно виразу

$$\Delta t = R_{С} Q_{З}. \qquad (18)$$

Висоту стиснутої зони кладки визначаємо за формулою

$$x = \delta_{С} \frac{i_{n} - 0.0006}{i_{n}}\ см, \qquad (19)$$

де i_{n} − відносне подовження кладки.

Теплове напруження в кладці знаходимо з виразу

$$\sigma_{кл}^{t} = (1 - e^{-n}) 1{,}1 R_{кл} \le R_{кл} / 1{,}9\ МПа, \qquad (20)$$

де коефіцієнт n визначаємо за формулою

$$n = \left[\frac{i_{n} - 0.0006}{1.1 R_{кл}} \right] E_{0}, \qquad (21)$$

$E_0 = \alpha R_{кл}$ − модуль пружності кладки; α – пружна характеристика кладки (згідно [6] для розчину марки М50 α=1000; для розчину марки М25 α=750); $R_{кл}$ − межа міцності кладки при стисненні (для кладки з цегли марки М100 на розчині марки М50 дорівнює 3 *МПа*, на розчині марки М25 − 2,5 *МПа*).

Отримані результати зводимо в табл. 5.

Таблиця 5

Відмітки h, *м*	Термічний опір стінки стовбура R_C, $м^2\,{}^0C/Вт$	Питома тепловтрата стінки $Q_З$, $Вт/м^2$	Висота стиснутої зони кладки x, *см*	Коефіцієнт n	Теплова напруга в кладці $\sigma_{кл}^t$, *МПа*	Розтягуючи зусилля в стяжних кільцях N_t, *кН*
0,50	0,95	226,58	17,7	0,1627	0,4963	43,926
14,0	0,79	243,56	10,0	0,0755	0,1989	9,945
26,0	0,75	248,81	9,6	0,0760	0,2013	9,662
38,0	0,47	286,50	-	-	-	-
50,0	0,31	314,19	-	-	-	-

Визначаємо розрахунковий переріз стяжних кілець на 1 пог. м висоти стовбура за формулою

$$F_a = \frac{N}{R_y \gamma_c}, \tag{20}$$

де R_y=190 *МПа* розрахунковий опір матеріалу стяжних кілець (згідно [6] для стяжних кілець рекомендується сталь марки ВСт3сп5), γ_c - коефіцієнт умови роботи, який враховує нерівномірну роботу стяжного кільця по периметру стовбура (згідно експериментальних даних дорівнює 0.7).

Приймаємо стяжні кільця перерізом 80×8 *мм* із сталі марки ВСт3сп5 з площею перерізу прийнятої смугової сталі кільця f_a=6,4 $см^2$ і кроком 1,5 *м*. Необхідну відстань між кільцями по висоті стовбура обчислюємо згідно виразу

$$a = \frac{f_a}{F_a}\ м. \tag{21}$$

Результати розрахунку зводимо в табл. 6.

Таблиця 6

Відмітки h, *м*	Сумарні розтягуючі зусилля на 1 пог.м. висоти труби N , *кН*	Розрахунковий переріз стяжних кілець F_a , $см^2$	Необхідна відстань між стяжними кільцями a , *м*
0,50	85,121	6,45	0,992
9,0	71,603	4,71	1,500
14,0	47,278	3,56	1,798
26,0	32,699	2,45	2,612
38,0	19,481	1,46	4,383
50,0	10,208	0,76	8,421

З розрахунку видно, що на висоті вище 9,0 *м* необхідна відстань між стяжними кільцями відповідає раніше ухваленому кроку 1,5 *м*. На висоті нижче 9,0 *м* при прийнятій площі перерізу кільця f_a = 6,4 $см^2$ прийнятий крок встановлених стяжних кілець більший за необхідну відстань 0,992 *м*. Тому на висоті до 9,0 *м* для забезпечення міцності труби з тріщинами необхідно зменшити крок стяжних кілець і прийняти рівним 0,75 *м*. Визначаємо силу натягу стяжних кілець, розташованих по всій висоті димової труби (табл. 7).

Таблиця7

Відмітки h, *м*	Відстані між стяжними кільцями a , *м*	Сила натягу стяжних кілець, *кН(Т)*
$0,50 \le h < 9,0$	0,75	64,9(6,49)
$9,0 \le h < 14,0$	1,5	71,6(7,16)
$14,0 \le h < 26,0$	1,5	39,5(3,95)
$26,0 \le h < 38,0$	1,5	18,8(1,88)
$38,0 \le h < 50,0$	1,5	6,7(0,67)
$50,0 \le h \le 60,0$	1,5	5,2(0,52)

Висновок. За допомогою розробленої методики вирішена проблема забезпечення безаварійної експлуатації та запобігання подальшого руйнування цегляної димової труби. Проведений розрахунок її напружено-деформованого стану при сумісній дії вітру, власної ваги та нагрівання відвідними газами. Надані рекомендації до встановлення стяжних кілець і сил їх натягу:

1. До висоти 9,0 *м* встановити додаткові стяжні кільця, таким чином, щоб відстань між встановленими раніше і додатковими кільцями було не більше 0,75 *м*. Натягнути стяжні кільця силами 6,49 *Т*.

2. Вище 9,0 *м* забезпечити натяг стяжних кілець, встановлених раніше з кроком 1,5 *м*, згідно табл. 7.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Строительство, материаловедение, машиностроение \\ Сб. научн. трудов. Вып. 43, – Днск, ПГАСА, 2007. – 628с.
2. *Яблонько Е. В.* Основные проблемы в эксплуатации дымовых труб // Молодой ученый. — 2011. — №9. — С. 65-68.
3. *А.В. Чернов, В.А. Волынцев* Кирпичные дымовые трубы, Государственное издательство литературы по строительству и архитектуре, М., 1955.
4. ДБН В.1.2-2:2006 Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования, К., 2006.
5. СНиП II-3-79** Строительная теплотехника. Нормы проектирования, М., 1979.
6. СНиП II-22-81 Каменные и армокаменные конструкции. Нормы проектирования, М., 1983.

Стаття надійшла до редакції 21.12.2012 р.

Лукьянченко О.А., Рудинок А.М., Ашмарина Г.Р.

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШЕГО РАЗРУШЕНИЯ КИРПИЧНОЙ ДЫМОВОЙ ТРУБЫ

Разработана методика расчета несущей способности кирпичной дымовой трубы с учетом локальных разрушений ее ствола при совместном действии ветра, собственного веса и нагрева отводными газами. Проблема предотвращения дальнейшего разрушения трубы и обеспечения ее безаварийной эксплуатации решается с помощью стяжных колец, которые устанавливаются по всей высоте ствола трубы до устранения выявленных повреждений. В работе выполнен расчет несущей способности реальной кирпичной дымовой трубы с локальными разрушениями ее ствола, определены расчетные силы натяжения стяжных колец, даны рекомендации по их установлению.

Lukianchenko O.O., Rudinok O.M., Ashmarina G.R.

SOLUTION OF TASK TO PREVENTING FURTHER DESTRUCTION OF BRICK CHIMNEY

The method for calculating the bearing capacity of a brick chimney with the local destruction of its trunk under the combined action of wind, dead weight and tap-off heating gases is developed. The problem of preventing further destruction the chimney and ensure its safe operation is achieved by clamping rings, which must be are installed throughout the height of the trunk before address the identified lesions. In the paper the bearing capacity of real brick chimney with local destruction of its trunk is investigated, the tension force of clamping rings are determined, the advices to their install are presented.