

**ПРИЗНАЧЕННЯ ПЛОЩ КІЛЬЦЕВОГО АРМУВАННЯ
ЗАЛІЗОБЕТОННИХ КІЛЬЦЕВИХ ОБІЙМ ПІДСИЛЕННЯ
ТОНКОСТІННИХ ОБОЛОНОК ЗА ВИСОТОЮ ДИМОВИХ ТРУБ**

**ASSIGNMENT OF CIRCUMFERENTIAL REINFORCEMENT AREA IN
REINFORCED CONCRETE RING JACKETS FOR STRENGTHENING
THIN-WALLED SHELLS OVER THE HEIGHT OF CHIMNEYS**

Гладишев Д.Г., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-3978-8600 (Національний університет “Львівська політехніка”, м. Львів)

Hladyshev D.H., Ph.D., associate professor, ORCID: 0000-0003-3978-8600, (Lviv Polytechnic National University, Lviv)

Розглянутий аналіз особливостей з прийняття площ кільцевого армування у залізобетонних кільцевих об'ємах підсилення на довільній за висотою ділянці тонкостінних залізобетонних оболонок димових труб, який підтвердив необхідність врахування зміни перепаду температур та товщини оболонок.

Chimneys are an integral part of many industrial enterprises. The main structural element of industrial monolithic exhaust stacks is a thin-walled reinforced concrete shell with a thermal insulation layer and internal lining. The study of the influence of flue gas temperature fluctuations on the stress-strain state of ring sections in the thin-walled reinforced concrete shell is highly relevant, as it is directly related to the area of circumferential reinforcement in these sections and its effect on the width of vertical crack openings. The justification of the adequacy of adopting circumferential reinforcement areas is based on regulatory limits for the width of external vertical cracks.

In this article, the author carried out an analysis of the influence of circumferential reinforcement areas of the thin-walled shell of a chimney on the width of vertical crack openings by modelling the structural parameters (variation of shell thickness) of an existing 120 m high chimney of the Kyiv ST-2 at four different flue gas temperature levels.

During long-term operation of chimneys, their structural elements undergo various types of damage, which creates the need for strengthening. A well-proven method is the strengthening of the chimney shaft with additional reinforced concrete circumferential jackets, which can be installed at any height of the chimney. As a result of such strengthening, the overall thickness of the thin-walled reinforced concrete shell increases. Referring to studies of other researchers who carried out strengthening of the 120 m chimney shaft of

the Mariupol Iron and Steel Works with a reinforced concrete jacket, the author confirmed his statements regarding the influence of changes in shell wall thickness and circumferential reinforcement area on the width of vertical crack openings.

It is concluded that when specifying circumferential reinforcement areas in reinforced concrete jackets for strengthening monolithic chimneys, it is necessary to take into account both the variations of flue gas temperature differences and the thickness of the thin-walled reinforced concrete shell along the height.

Ключові слова:

Димова труба, тонкостінна залізобетонна оболонка, підсилення, армування, обійма.

Chimney stack, thin-walled reinforced concrete shell, strengthening, reinforcement, concrete jacket.

Вступ. Основним конструктивним елементом витяжних монолітних залізобетонних труб є тонкостінна залізобетонна оболонка (далі ТЗО) з різними геометричними параметрами, яка на собі несе вагу теплоізоляції та футерування різних типів і видів. Тому ТЗО труб одночасно виконують несучі та огорожуючі функції від зовнішнього середовища.

Геометрія димових труб у різних виробничих процесах залежить від необхідного відводу диму та газів із різними температурами і ступенями агресивності в атмосферу з урахуванням екології оточуючого середовища.

Дослідження кількісного і якісного аналізу стану ТЗО в багатошарових конструкціях стовбурів труб на вплив перепадів температур вихідних газів на зміну напружено-деформованого стану кільцевих перерізів в ТЗО логічно пов'язані з площею армування перерізів кільцевою арматурою та її впливом на ширину розкриття вертикальних тріщин з бажанням її обмеження.

За довготривалу експлуатацію димових труб її ТЗО та інші конструктивні елементи отримують різні пошкодження корозійного характеру, у результаті чого виникає необхідність у підсиленні труби. Одним із методів підсилення є застосування додаткових кільцевих обійм.

Обґрунтуванням достатності прийняття площ кільцевого армування у залізобетонних кільцевих обіймах підсилення, розташованих на довільних за висотою дефектних ділянках ТЗО димових труб, як і в самих ТЗО, є нормативні обмеження за шириною розкриття зовнішніх вертикальних тріщин $w_{кр.в}$: 0,1 мм у верхній 1/3 частині їхньої висоти; 0,2 мм в середній частині та 0,2-0,3 мм в нижній частині.

Аналіз останніх досліджень. Тріщини в стінках димових труб серйозно впливають на їхню довговічність, знижуючи жорсткість ТЗО та спричиняючи посилену корозію арматури та бетону. Існує багато причин появи тріщин, але основними, як зазначають автори [1, 2] у своїх роботах, є температурні

напруження та будівельні дефекти. У статті [3] логічно зазначено, що термографічні випробування стінок оболонок труб дуже корисні для моніторингу змін в ній перепадів температур, як сигналізатор зростаючих проблем з їх довговічністю.

Багато досліджень проведено у напрямку пошуку ефективних методів підсилення споруд баштового типу. Автори [4, 5] на основі моделювання вказують, що кращою альтернативою підсилення монолітних димових труб є залізобетонні обійми. Але у своїй праці [4] автори не роблять акцент на площі кільцевого армування обійми, навіть при збільшенні загальної товщини оболонок у два рази за рахунок підсилення. А у дослідженні [5] не розглянуто вплив перепадів температур в стінках прийнятих для моделювання оболонок та в межах прийнятих для аналізу зовнішніх конструкцій з її підсилення на зміну площ кільцевого армування обійм.

Також відомі публікації [6, 7], в яких описані конструктивні особливості підсилення димових труб залізобетонними обіймами, проте в них не розглядається підхід до прийняття площ кільцевого армування і не вказано, чи були проведені перевірки на обмеження ширини розкриття вертикальних тріщин в обіймі та на їх обмеження згідно норм.

Мета дослідження. Перевірити вплив площ кільцевого армування стінок ТЗО в монолітних димових трубах, на ширину розкриття вертикальних тріщин. Визначити підхід до призначення площ кільцевого армування у залізобетонних обіймах підсилення.

Задачею дослідження є довести логіку підходу що до призначення площ кільцевого армування залізобетонних кільцевих обійм підсилення тонкостінних залізобетонних оболонок димових труб.

Результати досліджень. Перевірка впливу площ кільцевого армування ТЗО монолітних димових трубах, прийнятих у старих типових проектах, на ширину розкриття зовнішніх вертикальних тріщин, а також призначених площ кільцевого армування у залізобетонних обіймах підсилення, які періодично застосовуються для дефектних ділянок ТЗО, виконана, за розробленою автором програмою в середовищі Microsoft Excel на основі діючих до теперішнього час норм [8], через моделювання конструктивних параметрів за висотою димової труби $H=120$ м Київської СТ-2.

Димова труба збудована за типовим проектом 1969 року, та введена в експлуатацію у 1979 році. Обстеження димової труби за участі автора [9] було виконане після 23 років з початку її експлуатації. Отримані дані були необхідні для перевірних розрахунків ТЗО стовбура труби для розроблення проекту з її реконструкції.

Стовбур димової труби монолітний залізобетонний, конічного обрису із нахилами $i=0,05$ від відм. 0,000 до відм. 20,000, $i=0,04$ від відм. 20,000 до відм. 45,000, $i=0,025$ від відм. 45,000 до відм. 75,000, $i=0,015$ від відм. 75,000 до відм. 120,000. Зовнішні діаметри труби змінюються від 6,62 м в оголовку до 10,5 м в основі труби. Товщина стінок стовбура змінюється від 160 мм в оголовку до

350 мм в основі труби, товщина консолей 410 мм в оголовку до 550 мм внизу труби (рис. 1). Проектна марка монолітного бетону ТЗО труби М300 (клас С20/25).

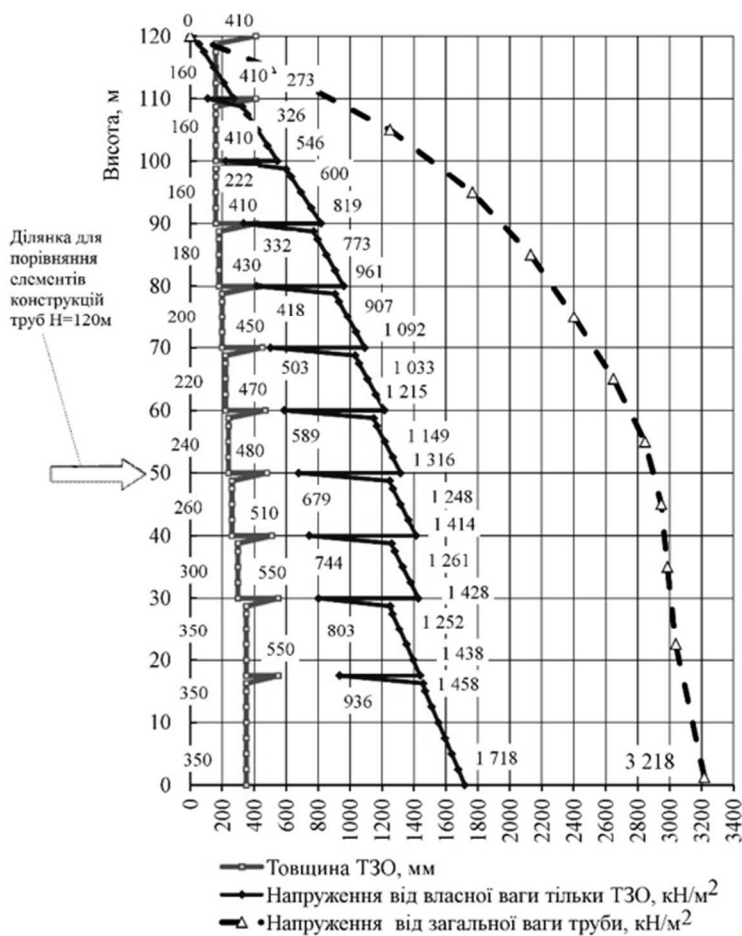


Рис. 1. Зміна товщини стінки ТЗО труби Київської СТ-2 та рівні напружень в бетоні стін ТЗО від власної ваги та від загальної ваги труби (стрілкою вказана ділянка для подальшого порівняння кільцевого армування в стінці ТЗО на ділянці консолю та у кільцевій обіймі труби [7])

При розрахунках враховано чотири рівня температури вихідних газів та суттєву зміну геометричних параметрів і фізико-механічних характеристик матеріалів в межах кільцевих перерізів за висотою труби, а саме: діаметри і товщини стінок ТЗО, параметри утеплювача і футерування на різних

відмітках. В типовому проєкті димової труби прийняте кільцеве армування стінок ТЗО арматурою $\varnothing 12A-III$ із кроком 200 мм ($A_s=5,65 \text{ см}^2$ на 1 м висоти), яке практично і визначає ширину розкриття вертикальних тріщин, як в стінках, так і в консолях оболонки труби.

Виконані розрахунки перепадів температур Δt між окремими шарами стовбура труби і за товщиною стінок ТЗО та по її висоті, в середині кожного барабану футерування, відмітки 22,500; 35,000; 45,000; 55,000; 65,000; 75,000; 95,000; 105,000; 115,000 і перекриття на відм. 18,400 (рис. 2.а). Також розрахунки проведені і по консольних ділянках на відмітках 30,000; 40,000; 50,000; 60,000; 70,000; 80,000; 90,000; 100,000; 110,000 (рис. 2.б).

Для визначення рівнів Δt , розглянутий вплив перепадів між чотирма рівнями температур вихідних газів: $t_6=120^\circ\text{C}$, 160°C , 185°C , 225°C і фіксованою температурою зовнішнього повітря $t_{\text{зовн.}}=-21^\circ\text{C}$.

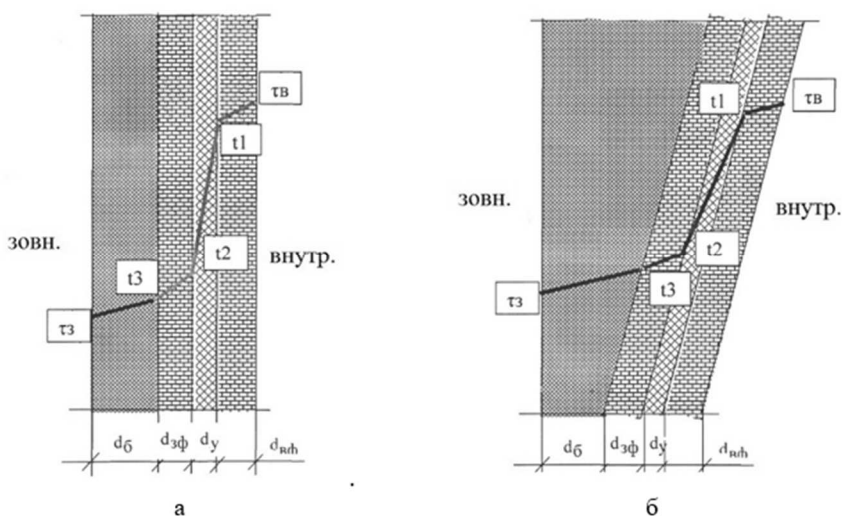


Рис. 2. Розподіл температур за проєктним конструктивним рішеннями стовбура (а) та консолей (б) димової труби Київської СТ-2

На рисунку 2 та у розрахунках прийняті наступні позначення:

- d_6 - товщина залізобетонного стовбура труби;
- $d_{\text{вф}}$ - товщина внутрішнього футерування зі звичайної цегли 0,12 м;
- d_y - товщина утеплювача з напівжорстких мінераловатних плит ($\gamma=2,65 \text{ кН/м}^3$); для стовбура 0,05-0,08 м, для консолей 0,03 м;
- $d_{\text{зф}}$ - товщина зовнішнього футерування зі звичайної цегли 0,25 м до відм. 30,000 м, вище – 0,12 м;
- t_6 - температура на поверхні внутрішнього футерування;
- t_1 - температура на внутрішній поверхні утеплювача;
- t_2 - температура на зовнішній поверхні утеплювача;

t_3 - температура на внутрішній поверхні бетону стовбура труби;

t_3 - температура на зовнішній поверхні бетону стовбура труби;

За виконаними розрахунками побудовані графіки температурних перепадів Δt по висоті труби (рис. 3, 4), з врахуванням проектних конструктивних рішень її стовбура, для чотирьох середніх температур t_{cp} вихідних газів.

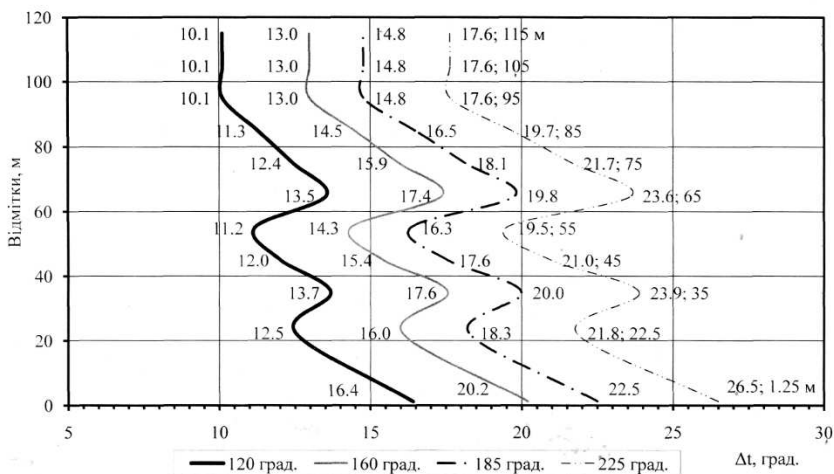


Рис. 3. Загальні розрахункові дані перепаду температур Δt в стінці ТЗО за висотою труби при різних рівнях температури вихідних газів

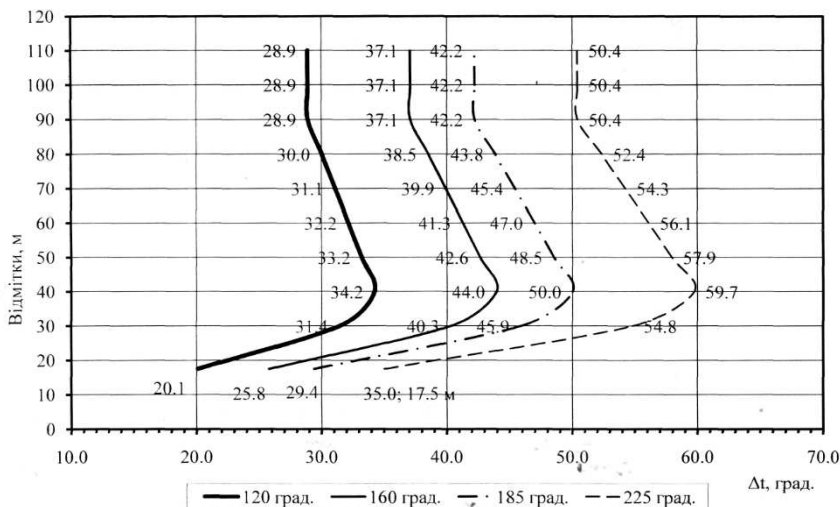


Рис. 4. Загальні розрахункові дані перепаду температур Δt в консольях стовбура за висотою труби при різних рівнях температури вихідних газів

За результатами виконаних розрахунків побудований графік (рис. 5) зміни ширини розкриття вертикальних тріщин w_{crc} в стінках тзо від температурних перепадів δt за її висотою при проектних конструктивних особливостях стовбура труби для чотирьох середніх температур t_{cp} вихідних газів. графік фіксує дані з ширини розкриття вертикальних тріщин у стовбурі та в консолях за висотою тзо для фіксованих температур вихідних газів.

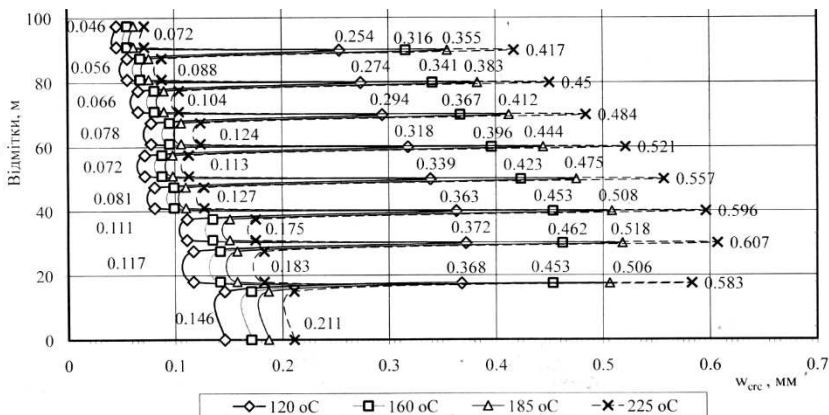


Рис. 5. Розрахункові ширини розкриття вертикальних тріщин за висотою ТЗО труби при різних рівнях температури вихідних газів (ширина розкриття тріщин в стовбурі - $w_{crc} < 0,2$ мм та в консолях - $w_{crc} \geq 0,25$ мм)

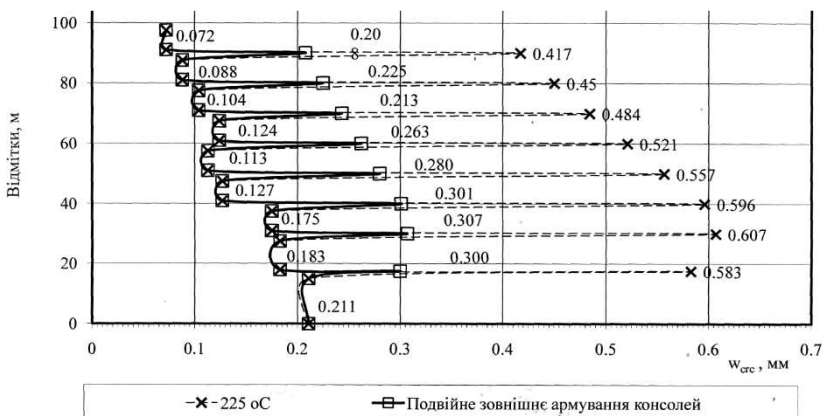


Рис. 6. Ширина розкриття тріщин в проектному рішенні димової труби по консольних ділянках при подвійному кільцевому армуванні від проектного рівня

Графік на рисунку 6 дає приклад обмеження ширини вертикальних тріщин від 0,2 мм до 0,3 мм в межах висот консольних ділянок ТЗО при дворовозовому

Для обґрунтування отриманих розрахункових даних по трубі $n=120$ м київської ст-2 використаний матеріали іншого дослідження [7], в якому поданий спосіб з підсилення дефектної ділянки димової труби. в даній роботі описані основні характеристики пошкодження стовбура залізобетонної димової труби $n=120$ м лпц-1700 мариупольського металургійного комбінату та повне конструктивне рішення її підсилення кільцевою залізобетонною обіймою на відм. 11,500 (рис. 7, 8). на цій відмітці, товщина стінки труби становить 0,3 м, товщина утеплювача з мінераловатних плит 0,12 м, футерування стовбура до відм. 10,000 має товщину 250 мм, вище – 120 мм. в цій трубі прийняте типове кільцеве армування стінок тзо арматурою $\varnothing 12a$ -iii із кроком 200 мм ($a_s=5,65$ см² на 1 м висоти), яке таке саме, як і у нашому випадку для труби київської ст-2.

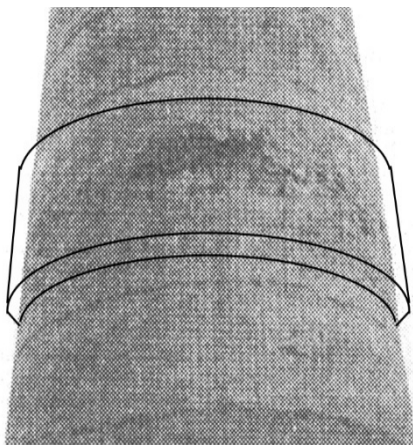


Рис. 7. Пошкоджена ділянка стовбура
ТЗО димової груби на відм. 11.500
(фото авторів [7])

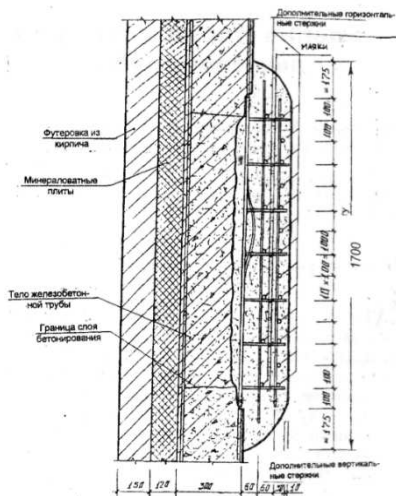


Рис. 8. Вертикальний переріз залізобетонної кільцевої обійми підсилення на пошкодженій ділянці ТЗО (рисунок авторів [7])

Димова труба була споруджена у 1959 році за типовим проектом. Автори роботи [7] у 1999 році, після довготривалої 40 річної експлуатації цієї труби, виконали комплексне інженерне її обстеження.

Стовбур димової труби виконаний з бетону марки М250 (клас С15/20). Внутрішній діаметр вихідного жерла труби 7 м, зовнішній діаметр стовбура у основи труби 11,81 м. Температура димових газів в трубі 250°C. Димові гази середньо агресивні до розчину муру футеровки і бетону стовбура.

При оцінці технічного стану стовбура димової труби, автори [7] виявили найбільш небезпечне пошкодження на ділянці ТЗО з відм. 11,500 (рис. 7), яке проявилось ще у 1997-1998 роках. Це пошкодження характеризується сколюваннями бетону пониженої міцності, втратою стійкості з випинанням стрижнів вертикальної арматури. Наслідками були зміна кута нахилу ТЗО з переломом її осі на цьому рівні.

Виконані авторами [7] перевірні розрахунки показали, що вертикальні і горизонтальні перерізи по усій висоті стовбура труби, за винятком пошкодженої ділянки, мають достатній запас несучої здатності. Підсилення стовбура ТЗО на рівні дефектної ділянки було запропоноване і виконане кільцевою залізобетонною обіймою (рис. 8).

В кільцевій обіймі встановлена додаткова вертикальна арматура $\varnothing 16$ -АІІ, яка відгинами була приєднана до кожного стрижня вертикальної арматури труби, що мала крок біля 120 мм (рис. 8). Обійма армована двома рядами кільцевої арматури: зовнішня сітка має крок стрижнів 100 мм ($10\varnothing 12A$ -ІІІ на 1 пог. м, $A_{s,s}=11,3 \text{ см}^2$); внутрішня сітка має крок стрижнів 200 мм ($5\varnothing 12A$ -ІІІ на 1 пог. м, $A_{s,e}=5,65 \text{ см}^2$). Загальна товщина кільцевого перерізу складає 480 мм, куди входять товщина стовбура труби 300 мм та товщина обійми 180 мм. Віддаль від поверхні обійми до осі кільцевої арматури першої сітки 60 мм, другої – 120 мм. Зовнішній діаметр обійми 8,0 м.

виконане порівняння взаємозв'язку, між результатами розрахунків різних площ кільцевого армування за товщиною консолі 480 мм на відм. 50,000 (рис. 1, 4, 6) стінки тзо труби $n=120$ м київської ст-2 та кільцевого перерізу обійми підсилення труби $n=120$ м маріупольського металургійного комбінату, загальною товщиною 480 мм (рис. 8), при практично однакових рівнях температур вихідних газів (225°C, 250°C), за необхідністю прийняття площ кільцевого армування із забезпеченням ширини розкриття вертикальних тріщин не більше 0,2 мм.

розрахунок консолі на відм. 50,000 (рис. 1) показав, що при площі кільцевого армуванні $a_{s,s}=5,65 \text{ см}^2$ стовбура тзо на її ділянці дає ширину розкриття вертикальних тріщин 0,557 мм (рис. 6), а при армуванні $a_{s,s}=11,3 \text{ см}^2$ – ширина 0,280 мм (рис. 6).

У роботі [7] доцільно прийнята площа ($10+5\varnothing 12A$ -ІІІ на 1 пог. м, $A_{s,s}=11,3+5,65 \text{ см}^2$) дворядного кільцевого армування обійми, яка у 1,5 рази перевищує площу армування стовбура, прийняту для розрахунку на

ділянці консолі на відм. 50,000 труби Київської СТ-2, і забезпечує нормативну ширину розкриття вертикальних тріщин 0,2 мм, але в межах консолей цієї труби слід спостерігати іншу ширину їх розкриття.

Висновки. На базі отриманих в процесі дослідження даних можна зробити наступні висновки:

1. Перепади температур Δt при проектному складі стовбура труби, для різних рівнів температур вихідних газів, коливаються і поступово зменшуються за висотою труби, як в межах барабанів футерування (рис. 3), так і по консольних ділянках (рис. 4).

2. Перепади температур Δt на всіх консольних ділянках ТЗО значно більші ніж в стовбурі ТЗО в межах барабанів футерування.

3. Прийнята в типовому проекті однакова площа кільцевого армування стінок ТЗО, не залежно від суттєвих перепадів їх товщини за її висотою, викликає значні нерівномірні температурні розширення за висотою оболонки та відповідну нерівномірну ширину розкриття вертикальних тріщин.

4. Ширину розкриття тріщин на консольних ділянках в стінках ТЗО за висотою стовбура димової труби, можна суттєво зменшити до нормативного рівня за рахунок улаштування більш ніж подвійної площі кільцевого армування консольних ділянок від проектного рішення з врахуванням відмінності їх товщини від товщини самих стінок ТЗО.

Наведена у роботі [7] конструкція підсилення труби, у якому збільшена практично втричі площа кільцевого армування обійми підсилення, відносно проектною площі кільцевого армування стінки ТЗО з врахуванням збільшення впливу загальної товщини обійми, підтверджує проведені розрахунки з впливу зміни товщини стінок ТЗО та площ кільцевого армування на ширину розкриття вертикальних тріщин.

5. При призначенні площ кільцевого армування у залізобетонних обіймах підсилення монолітних димових труб обов'язково потрібно враховувати зміни перепаду температур та товщини ТЗО в місцях улаштування цих обійм по висоті.

1. Lei Wang, Xing-yan Fan. Failure cases of high chimneys: A review // Engineering Failure Analysis. 2019. No. 105. P. 1107-1117. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.07.032>.

2. Ubysz A., Tamrazyan A. Phenomenon of cracks in chimney walls // Journal of Physics: Conference Series. 2019. No. 1425, 012028. doi:10.1088/1742-6596/1425/1/012028.

3. Maj M., Ubysz A. The effects of thermal overload in chimney caused by insulation damage // Journal of Physics Conference Series. 2020. No. 1706(1):012198. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1706/1/012198>.

4. Selcuk K., Gursoy G. Structural retrofitting of a reinforced concrete chimney // International Journal of Advanced Engineering Research and Science. 2017. No. 4(12). P. 108-113. <https://doi.org/10.22161/ijaers.4.12.18>.

5. Murat Bikce. Investigation of the effective strengthening techniques in chimney type structures // International Conference on Natural Science and Engineering (ICNASE'16). 2016. P. 755-763.

6. Колесник А.В., Радько Ю.М., Роханский О.О. Особенности усиления аварийной железобетонной дымовой трубы высотой 100 м в условиях эксплуатации // Коммунальное хозяйство городов. Технические науки. 2002. Харьков. № 39. С. 190-194.

Kolesnik A.V., Radko Yu.M., Rokhanskii O.O. Osobennosti usileniya avariinnoi zhelezobetonnoi dimovoi trubi visotoi 100 m v usloviyakh ekspluatatsii // Kommunalnoe khozyaistvo gorodov. Tekhnicheskie nauki. 2002. Kharkov. № 39. S. 190-194.

7. Корсун В.И., Калмыков Ю.Ю., Машенко А.Н., Дудка В.Б. Опыт усиления ствола железобетонной дымовой трубы // Баштові споруди: матеріали, конструкції, технології. 2003. Мakiївка. №39, том 2. С. 187-190.

Korsun V.I., Kalmikov Yu.Yu., Mashchenko A.N., Dudka V.B. Opit usileniya stvola zhelezobetonnoi dimovoi trubi // Bashtovi sporudy: materialy, konstruksii, tekhnolohii. 2003. Makiivka. №39, tom 2. S. 187-190.

8. СНиП 2.03.04-84. Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях повышенных и высоких температур. Нормы проектирования. – М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1985.

SNiP 2.03.04-84. Betonnie i zhelezobetonnie konstruksii, prednaznachennye dlya raboty v usloviyakh povishennikh i visokikh temperatur. Normy proektirovaniya. – M.: TsITP Gosstroya SSSR, 1985.

9. Гладышев Д.Г. Дослідження технічного стану будівель, споруд та їхніх елементів: монографія / Д.Г. Гладышев, Г.М. Гладышев. Львів: Видавництво Львівської політехніки. 2012. 304 с.

Hladyshev D.H. Doslidzhennia tekhnichnoho stanu budivel, sporud ta yikhnikh elementiv: monohrafiia / D.H. Hladyshev, H.M. Hladyshev. Lviv: Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki. 2012. 304 s.