

УДК 624.971.2

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КИРПИЧНОЙ КЛАДКИ СТОЛОВ ДЫМОВЫХ ТРУБ ПРИ СОВМЕСТНОМ ДЕЙСТВИИ НАГРУЗОК ОТ СОБСТВЕННОГО ВЕСА, ВЕТРА И ВОЗДЕЙСТВИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

ЯРОВОЙ Ю. Н.^{1*}, к. т. н., проф.,

ЛУКАШЕНКО О. Э.^{2*}, к. т. н., доц.,

ПЕРЕПЕЛИЦА Е. А.^{3*}, асп.

^{1*}Кафедра строительной механики, Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, ул. Сумская, 40, Харьков, 61002, Украина, тел. +38 (057) 752-91-64, e-mail: yarov.58@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0633-424X

^{2*}Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, ул. Сумская, 40, Харьков, 61002, Украина, тел. +38 (057) 700-01-63, e-mail: hisi22zx@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2949-3078

^{3*}Кафедра строительной механики, Харьковский национальный университет строительства и архитектуры, ул. Сумская, 40, Харьков, 61002, Украина, тел. +38 (057) 752-91-64, e-mail: ekaterina-perepelica@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0574-0038

Аннотация. Постановка проблемы. В Украине в настоящее время находится в эксплуатации свыше 3 000 кирпичных дымовых труб. Срок эксплуатации большинства труб превышает 20 лет, около 20 % дымовых труб эксплуатируются более 50 лет. Обследование технического состояния дымовых труб, оценка их несущей способности, а также разработка рекомендаций по обеспечению дальнейшей эксплуатации являются актуальной исследовательской задачей. Действующих нормативных документов, регламентирующих расчет и проектирование стволов кирпичных и железобетонных дымовых труб, в Украине нет. В справочной литературе и ведомственных строительных нормах расчетная схема ствола дымовой трубы принята в виде консольного стержня с жестким защемлением. В расчетах рекомендуется учитывать продольно-поперечный изгиб от действия ветровой нагрузки и собственного веса, а также крен фундамента. Проверка прочности кладки ствола трубы выполняется отдельно для горизонтальных и вертикальных сечений. Для горизонтальных сечений – на продольную силу и изгибающий момент (собственный вес и ветровая нагрузка), для вертикальных сечений – на температурные усилия вследствие перепада температуры по толщине стенки ствола. Данный подход не отображает в полной мере реальную работу кладки стволы дымовых труб, которая находится в сложном напряженном состоянии. **Цель.** Выполнить сравнительный расчет стволы кирпичных дымовых труб различных высот, проанализировать факторы, влияющие на напряженно-деформированное состояние кладки. **Вывод.** Предложено выполнять расчет кладки для плоского напряженного состояния на температурные воздействия в упругой стадии с учетом совместной работы кладки и стяжных колец, при этом учитывать тангенциальные и продольные температурные напряжения. Предложенный расчет позволяет определять момент образования трещин силового и температурного характера. Применение предложенного подхода требует уточнения НДС кладки стволы труб при плоском напряженном состоянии с помощью численных и экспериментальных моделей, а также выбора и обоснования критерия прочности.

Ключевые слова: ствол кирпичной дымовой трубы; продольно-поперечный изгиб; стяжное кольцо; температурные напряжения; предварительное натяжение; плоское напряженное состояние; критерии прочности

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ЦЕГЛЯНОЇ КЛАДКИ СТОББУРІВ ДИМОВИХ ТРУБ ЗА СПІЛЬНОЇ ДІЇ НАВАНТАЖЕНЬ ВІД ВЛАСНОЇ ВАГИ, ВІТРУ І ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ

ЯРОВИЙ Ю. М.^{1*}, к. т. н., проф.,

ЛУКАШЕНКО О. Е.^{2*}, к. т. н., доц.,

ПЕРЕПЕЛИЦЯ К. О.^{3*}, асп.

^{1*}Кафедра будівельної механіки, Харківський національний університет будівництва та архітектури, вул. Сумська, 40, Харків, 61002, Україна, тел. +38 (057) 752-91-64, e-mail: yarov.58@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0633-424X

^{2*}Кафедра залізобетонних і кам'яних конструкцій, Харківський національний університет будівництва та архітектури, вул. Сумська, 40, Харків, 61002, Україна, тел. +38 (057) 700-01-63, e-mail: hisi22zx@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2949-3078

^{3*}Кафедра будівельної механіки, Харківський національний університет будівництва та архітектури, вул. Сумська, 40, Харків, 61002, Україна, тел. +38 (057) 752-91-64, e-mail: ekaterina-perepelica@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0574-0038

Анотація. Постановка проблеми. В Україні наразі перебувають в експлуатації понад 3000 цегляних димових труб. Термін експлуатації більшості труб перевищує 20 років, близько 20 % димових труб експлуатуються понад 50 років. Обстеження технічного стану димових труб, оцінювання їх несної здатності, а також розроблення рекомендацій щодо забезпечення подальшої експлуатації, - актуальне дослідницьке завдання. Чинних нормативних документів, що регламентують розрахунок і проектування стоббурів цегляних і

залізобетонних димових труб, в Україні немає. У довідковій літературі та відомчих будівельних нормах розрахункова схема стовбура димової труби прийнята у вигляді консольного стержня із жорстким закріпленням. У розрахунках рекомендується враховувати позовжньо-поперечний згин від дії вітрового навантаження і власної ваги, а також крен фундаменту. Перевірка міцності кладки стовбура труби виконується окремо для горизонтальних і вертикальних перетинів. Для горизонтальних перетинів - на позовжню силу і згинальний момент (власна вага і вітрове навантаження), для вертикальних перетинів - на температурні зусилля внаслідок перепаду температури по товщині стінки стовбура. Такий підхід не відображає повною мірою реальної роботи кладки стовбурів димових труб, яка перебуває в складному напруженому стані. **Мета.** Виконати порівняльний розрахунок стовбурів цегляних димових труб різних висот, проаналізувати чинники, що впливають на напружено-деформований стан кладки стовбурів. **Висновок.** Запропоновано виконувати розрахунок кладки для плоского напруженого стану на температурні впливи в пружній стадії з урахуванням спільної роботи кладки і стяжних кілець, при цьому враховувати тангенціальні і позовжні температурні напруження. Запропонований розрахунок дозволяє визначити момент утворення тріщин силового і температурного характеру. Застосування запропонованого підходу вимагає уточнення НДС кладки стовбурів труб у плоскому напруженому стані за допомогою числових та експериментальних моделей, а також вибору й обґрунтування критерію міцності.

Ключові слова: *стовбур цегляної димової труби; позовжньо-поперечний згин; стяжні кільця; температурні напруження; попередній натяг; плоский напружений стан; критерії міцності*

STRESS-STRAIN STATE OF MASONRY OF CHIMNEY TRUNKS FROM DEAD LOAD, WIND LOAD AND TEMPERATURE EFFECT

YAROVYU Yu. N.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Prof.*,

LUKASHENKO O. Ye.^{2*}, *Cand. Sc. (Tech.), Ass. Prof.*,

PEREPELICA E. A.^{3*}, *post-graduate*

^{1*}Department of Structural Mechanics, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, 40, Sumska str., Kharkiv 61002, Ukraine, tel.+38 (057) 752-91-64, e-mail: yarov.58@mail.ru, ORCID ID: 0000-0003-0633-424X

^{2*}Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, 40, Sumska str., Kharkiv 61002, Ukraine, tel.+38 (057) 700-01-63, e-mail: hisi22zx@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-2949-3078

^{3*}Department of Structural Mechanics, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, 40, Sumska str., Kharkiv 61002, Ukraine, tel.+38 (057) 752-91-64, e-mail: ekaterina-perepelica@mail.ru, ORCID ID: 0000-0002-0574-0038

Summary. Formulation of the problem. Nowadays there are more than 3000 masonry chimneys in Ukraine. The life of most chimneys is more than 20 years, about 20 % of the chimneys are operated for more than 50 years. Inspection of the technical condition of the chimneys, evaluation of their load-carrying capacity and design of recommendations for further work of chimneys is an actual research task. There are no actual normative documents about calculation and design of masonry and reinforced concrete chimneys in Ukraine. In reference literature and normative documents, the design scheme of the chimney trunk is adopted in the form of a cantilever beam. In the calculation it is recommended to take into account the longitudinal-transverse bending from the action of the wind load and its own weight, as well as the roll of the foundation. Strength test of the trunk is performed separately for horizontal sections and for vertical sections. For horizontal sections it is performed for longitudinal force and bending moment from its own weight and wind load, for vertical sections - for temperature forces after the temperature drop along the thickness of the barrel wall. This approach doesn't fully reflect the real work of the masonry, which is in a complicated state of stress. **Purpose.** To perform a comparative calculation of the various trunks of masonry chimney, analyze the factors affecting the stress-strain state of the masonry trunks. **Conclusions.** It is proposed carry and calculation of the masonry trunks for the temperature impact in elastic stage with regard to join work masonry and clamping rings, taking into account not only the tangential, but also the longitudinal temperature stresses and analyze the work of the masonry in the plane stress state. Proposed calculation makes it possible to determine the moment of formation of force and temperature cracks in the masonry. It is necessary to clarify the stress-strain state and criteria of the trunks strength of masonry chimney under a two-dimensional stress state with the help of numerical and experimental models.

Keywords: *trunks of masonry chimney; longitudinal bending; clamping rings; thermal stress; pretension; two-dimensional stress state; strength theory*

Постановка проблеми. В Україні в настоящее время находится в эксплуатации свыше 3 000 кирпичных дымовых труб. Срок эксплуатации большинства труб превышает 20 лет, около 20 % дымовых труб эксплуатируются более 50 лет.

Обследование технического состояния дымовых труб, оценка их несущей способности, а также разработка рекомендаций по обеспечению дальнейшей эксплуатации являются актуальной исследовательской задачей.

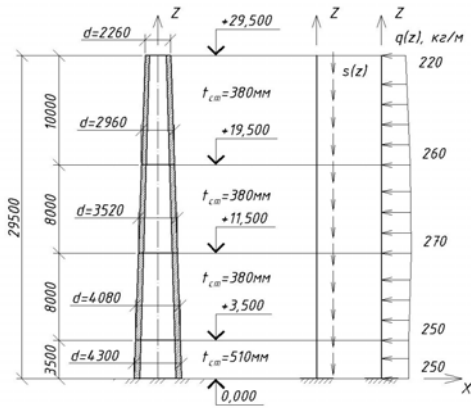


Рис. 1. Расчетная схема ствола кирпичной дымовой трубы $H=29,5$ м

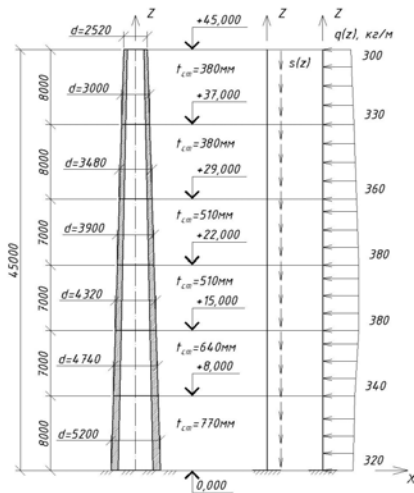


Рис. 2. Расчетная схема ствола кирпичной дымовой трубы $H=45,0$ м

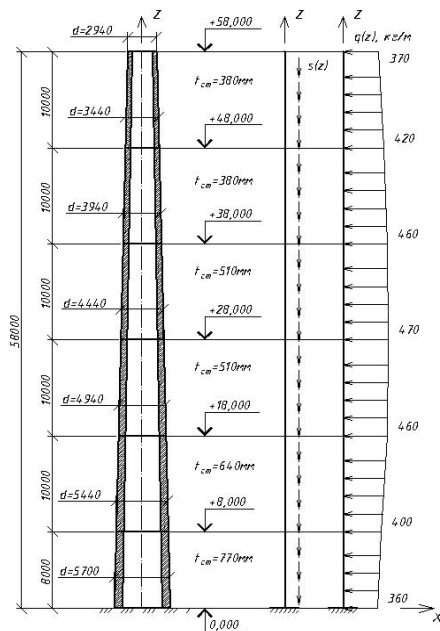


Рис. 3. Расчетная схема ствола кирпичной дымовой трубы $H=58,0$ м

Нормативных документов, регламентирующих расчет и проектирование стволов кирпичных и железобетонных дымовых труб, в Украине нет. Рекомендательный характер носят ведомственные строительные нормы [2; 3] для железобетонных труб, справочник С. А. Семенцова [7] – для кирпичных. Методики расчета кирпичных дымовых труб изложены в работах [4; 5].

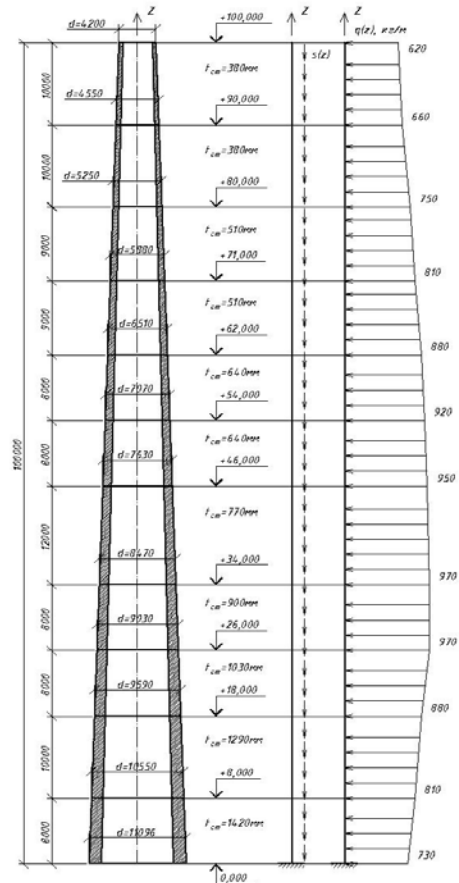


Рис. 4. Расчетная схема ствола кирпичной дымовой трубы $H=100,0$ м

Расчетная схема ствола дымовой трубы принимается в виде жестко защемленного консольного стержня. В расчете рекомендуется учитывать продольно-поперечный изгиб от действия ветровой нагрузки и собственного веса, а также крен фундамента.

Проверка прочности ствола трубы выполняется отдельно для горизонтальных и вертикальных сечений. Для горизонтальных сечений – от продольной силы и изгибающего момента (собственный

вес кладки, ветровая нагрузка), для вертикальных сечений – от температурных воздействий вследствие перепада температуры по толщине стенки ствола. При этом в расчете не учитывается объемное НДС кладки.

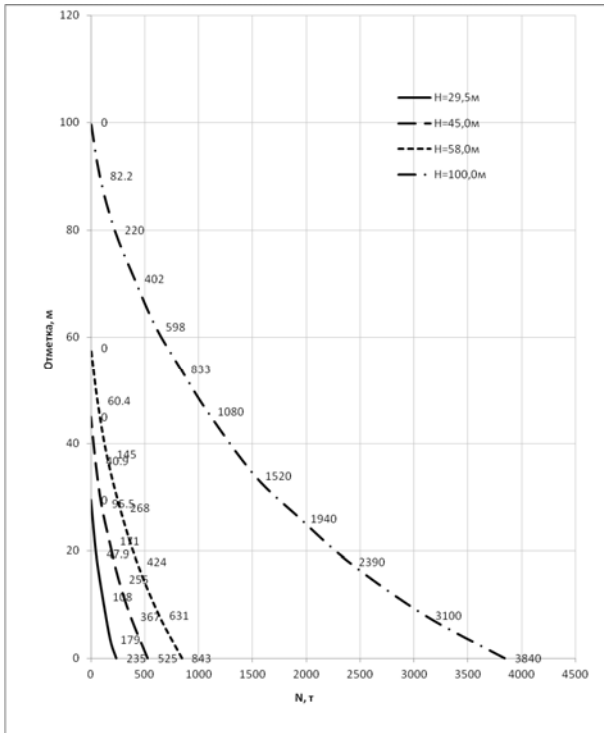


Рис. 5. Эпюры продольных сил N_z , т

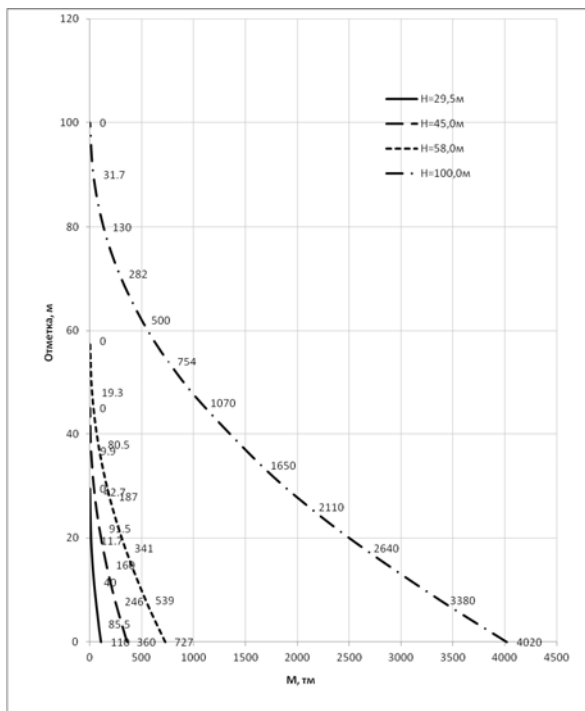


Рис. 6. Эпюры изгибающих моментов M_x , т·м

Методика сбора нагрузок, расчета прочности и ресурса стволов дымовых и вентиляционных промышленных труб рассмотрена в работе В. Г. Сатьянова [8].

В работах [6; 10] выполнен обзор и анализ критериев прочности для каменной кладки, работающей в условиях плоского напряженного состояния.

Цели и задачи. Выполнить сравнительный расчет стволов кирпичных дымовых труб различных высот, проанализировать факторы, влияющие на напряженно-деформированное состояние кладки.

Изложение материала. Выполнен сравнительный расчет стволов четырех кирпичных дымовых труб различной высоты (рис. 1–4). Кладка труб выполнена из кирпича глиняного керамического марки 100, на сложном растворе марки 50.

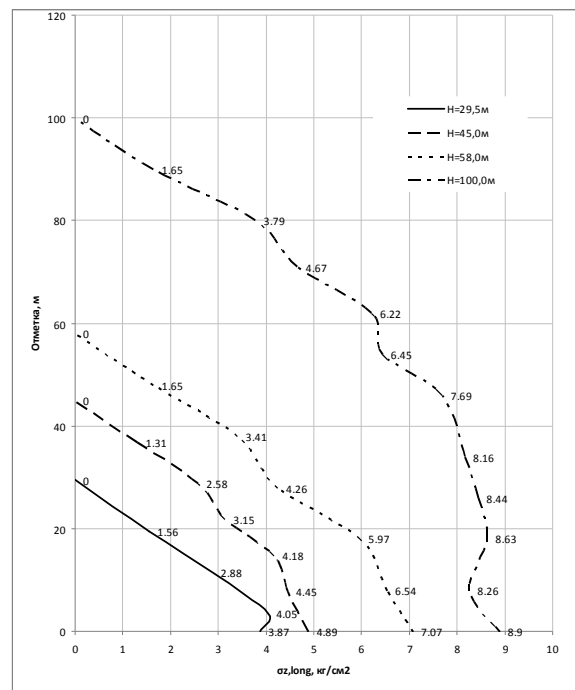


Рис. 7. Эпюры нормальных напряжений $\sigma_{z, long}$ в горизонтальных сечениях от продольных сил, кг/см²

Статический расчет стволов дымовых труб выполнен методом конечных элементов в ПК Лира. Для учета продольно-поперечного изгиба расчет выполнен в геометрически нелинейной постановке. Крен фундамента учтен введением податливой опоры. Жесткость опоры определена по методике [1]. Эпюры

продольных сил N_z и изгибающих моментов M_x представлены на рисунках 5; 6.

Эпюры нормальных напряжений от продольных сил $\sigma_{z,long}$ и изгибающих моментов $\sigma_{z,bend}$ представлены на рисунках 7, 8.

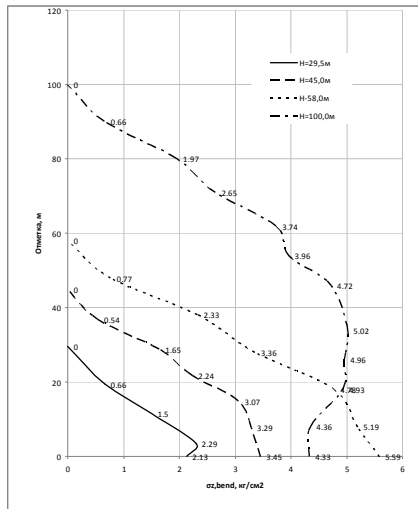


Рис. 8. Эпюры нормальных напряжений $\sigma_{z,bend}$ в горизонтальных сечениях от изгибающих моментов, $кг/см^2$

Внутренний диаметр устья трубы определяется в результате гидравлического расчета, а также из технологических требований (не менее 800 мм). Толщина стенок ствола должна быть кратной половине кирпича и не менее одного кирпича (250 мм). Для труб малой высоты эти требования являются определяющими, условия прочности горизонтальных сечений выполняются с запасом.

Диаметр и толщина стенок стволов высоких труб определяются по результатам статического расчета. Соответственно значения нормальных напряжений в горизонтальных сечениях от собственного веса и ветровой нагрузки, как правило, тем выше, чем выше дымовая труба (см. рис. 7, 8).

Выполнен расчет кладки стволов дымовых труб на температурные воздействия. Перепад температур по толщине стенок стволов принят до 100 °С. При таком температурном воздействии напряжения в кладке не превышают предела упругости. Решение получено как для толстостенного цилиндра с перепадом

температур по толщине стенки, внешним давлением от предварительного напряжения стяжных колец и дополнительного давления в зоне контакта наружной поверхности цилиндра и стяжных колец вследствие температурных деформаций толстостенного цилиндра. Решение приведено в [9]. Данное решение позволяет определить напряжения в продольном, радиальном и тангенциальном направлениях. Эпюры температурных продольных $\sigma_{z,t}$ и тангенциальных напряжений $\sigma_{\theta,t+p}$ представлены на рисунках 9; 10.

Значения температурных напряжений для труб различных высот при одинаковом температурном режиме отличаются несущественно. Тангенциальные напряжения по высоте труб меняются скачкообразно вследствие резкого перепада толщин стенок по высоте ствола.

Радиальными напряжениями в кладке можно пренебречь, т. к. они значительно меньше продольных (σ_z) и тангенциальных (σ_θ). Таким образом, кладка стволов кирпичных дымовых труб находится в двухосном напряженном состоянии (см. рис. 11).

Расчет и оценка несущей способности отдельно горизонтальных и вертикальных сечений стволов труб не позволяет учесть эффект двухосного напряженного состояния (сжатия с растяжением), см. рисунках 11.

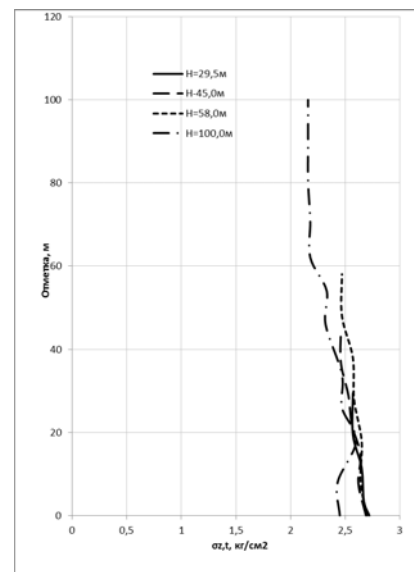


Рис. 9. Эпюры продольных температурных напряжений, $\sigma_{z,t}$ $кг/см^2$

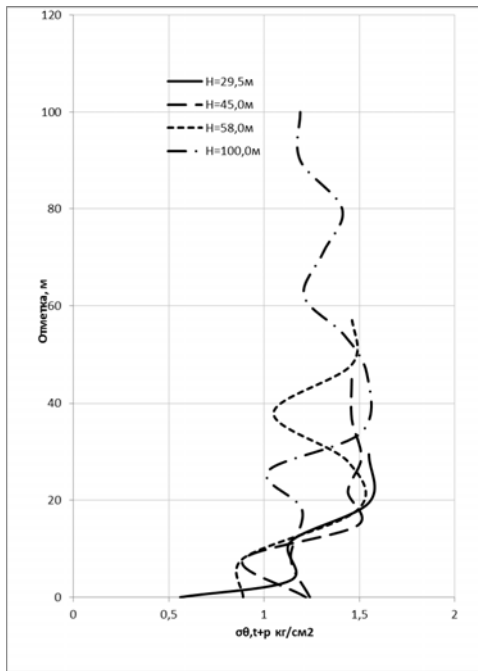


Рис. 10. Эпюры тангенциальных напряжений от перепада температуры по толщине ствола и воздействия тяжёлых колец, $\sigma_{\theta,t+p}$ кг/см²

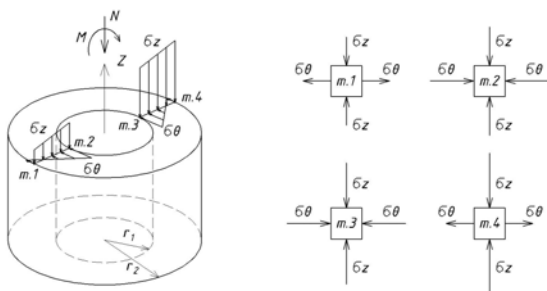


Рис. 11. Схема напряжений в кирпичной кладке ствола дымовой трубы

Так для трубы $H = 58,0$ м в сечении на отметке 0,000 м продольные напряжения составляют $\sigma_{z,long} = 7,07$ кг/см², $\sigma_{z,bend} = 5,59$ кг/см², $\sigma_{z,t} = 2,56$ кг/см²,

тангенциальные напряжения – $\sigma_{\theta,t+p} = 1,11$ кг/см².

Эквивалентные растягивающие напряжения в соответствии с критерием прочности Мора:

$$\sigma_{eq.} = \sigma_1 - \frac{R_t}{R} \sigma_3 =$$

$$= \sigma_{\theta,t+p} - \frac{R_t}{R} (-\sigma_{z,long} - \sigma_{z,bend} + \sigma_{z,t}) = 2,19 \text{ кг/см}^2,$$

что на 49 % больше, чем тангенциальные температурные растягивающие напряжения.

Выводы. 1. Предложено выполнять расчет кладки стволов дымовых труб на температурные воздействия в упругой стадии с учетом совместной работы кладки и тяжёлых колец. При этом учитывать как тангенциальные, так и продольные температурные напряжения и анализировать работу кладки в плоском напряженном состоянии.

2. Выполнен сравнительный расчет стволов кирпичных дымовых труб различных высот. Показано изменение уровня напряжений в горизонтальных и вертикальных сечениях в зависимости от высоты трубы.

3. Предложенный расчет позволяет определить момент образования трещин силового и температурного характера в кладке.

4. Для обоснования выбора критерия прочности кладки стволов дымовых труб необходимо уточнение НДС кладки с помощью численных моделей и проведения экспериментальных исследований.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Виноградов В. В. Моделирование работы башенных сооружений дымовых труб в системе "ствол–фундамент–основание" / В. В. Виноградов, Е. А. Перепелица // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2015. – Вып. 68. – С. 99–107. – Режим доступа: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vhad_2015_68_20.
2. Указания по расчету железобетонных дымовых труб : ВСН 286-72 / М-во монтаж. и спец. строит. работ СССР. – Изд. офиц. – Москва, 1972. – 27 с.
3. Указания по расчету железобетонных дымовых труб : ВСН 286-90 / М-во монтаж. и спец. строит. работ СССР. – Изд. офиц. – Москва, 1990. – 73 с.
4. Милонов В. М. Армокипичные дымовые трубы (Исследование работы кладки и метод расчета труб) / В. М. Милонов ; под ред. В. И. Мурашева. – Москва : Госстройиздат, 1960. – 112 с.
5. Милонов В. М. Исследование температурных усилий в кирпичных дымовых трубах / В. М. Милонов, А. И. Семенов // Исследования по жароупорному железобетону и армокипичным конструкциям / под ред. В. И. Мурашева. – Москва, 1959. – С. 307–340.

6. Орлович Р. Б. Критерии прочности, применяемые в зарубежной практике расчета и проектирования каменных конструкций / Р. Б. Орлович, В. Н. Деркач // Известия вузов. Строительство. – 2011. – № 6. – С. 101–106.
7. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Каменные и армокаменные конструкции / под общ. ред. С. А. Семенцова, В. А. Камейко. – Москва : Стройиздат, 1968. – 176 с.
8. Методика расчета нагрузок, прочности и ресурса стволов дымовых и вентиляционных промышленных труб / В. Г. Сат'янов, Н. А. Хапонен, П. Б. Пилипенко, В. А. Французов, С. В. Сат'янов. – Москва : Универсум, 2005. – 264 с.
9. Яровой Ю. Н. Напряженно-деформированное состояние кирпичной кладки стволов дымовых труб в зонах установки стяжных колец / Ю. Н. Яровой, Е. А. Перепелица // Строительная механика и расчет сооружений. – 2016. – № 1. – С. 7–13.
10. Hegemier G. A. Behavior of concrete masonry under biaxial stresses / G. A. Hegemier, R. O. Nunn, S. K. Arga // Proceedings of the North American Masonry Conference, August 14-16, 1978, University of Colorado, Boulder, Colo / National Science Foundation (U.S.), Masonry Society ; editors and conference co-chairmen : James L. Noland, James E. Amrhein. – Boulder, Colorado, 1978. – P. 76–84.

REFERENCES

1. Vinogradov V.V. and Perepelica E.A. *Modelirovanie raboty bashennykh sooruzhenij dymovykh trub v sisteme «stvol-fundament-osnovanie»* [Modelling behaviour of tower structures of chimneys in the system "shaft-foundation-base"]. *Vestnik Har'kovskogo nacional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta* [Bulletin of the Kharkiv National Automobile and Highway University]. 2015, iss. 68, pp. 99–107. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vhad_2015_68_20. (in Russian).
2. *Ukazaniya po raschetu zhelezobetonnykh dymovykh trub: VSN 286-72* [Departmental Building Codes 286-72. Guidelines for the calculation of reinforced concrete chimneys]. Ministerstvo montazhnykh i special'nykh stroitel'nykh rabot SSSR [Ministry of installation and special construction works of the USSR]. Moskva, 1972, 27 p. (in Russian).
3. *Ukazaniya po raschetu zhelezobetonnykh dymovykh trub: VSN 286-90* [Departmental Building Codes 286-90. Guidelines for the calculation of reinforced concrete chimneys]. Ministerstvo montazhnykh i special'nykh stroitel'nykh rabot SSSR [Ministry of installation and special construction works of the USSR]. Moskva, 1990, 73 p. (in Russian).
4. Milonov V.M. *Armokirpichnye dymovye truby (Issledovanie raboty kladki i metod rascheta trub)* [Reinforced brick chimneys (Study of masonry work and method of chimneys calculating)]. Moskva: Gostrojizdat, 1960, 112 p. (in Russian).
5. Milonov V.M., Semenov A.I. *Issledovanie temperaturnykh usilij v kirpichnykh dymovykh trubax* [Research of temperature forces in brick chimneys]. *Issledovaniya po zharoupornomu zhelezobetonu i armokirpichnym konstrukciyam* [Researches on heat-resistant reinforced concrete and reinforced-brick structures]. Moskva, 1959, pp. 307–340. (in Russian).
6. Orlovich R.B. and Derkach V.N. *Kriterii prochnosti, primenyaemye v zarubezhnoj praktike rascheta i proektirovaniya kamennykh konstrukcij* [Strength criteria used in foreign practice of calculation and design of stone structures]. *Izvestija vuzov. Stroitel'stvo* [News of universities. Building]. 2011, no. 6. pp. 101–106. (in Russian).
7. Semencov S.A. and Kamejko V.A., eds. *Spravochnik proektirovshhika promyshlennykh, zhilykh i obshhestvennykh zdaniy i sooruzhenij. Kamennye i armokamennye konstrukcii* [Handbook of the designer of industrial, residential and public buildings and structures. Stone and reinforced structures]. Moskva: Strojizdat, 1968, 176 p. (in Russian).
8. Sat'yanov V. G., Xaponen N.A., Pilipenko P.B., Francuzov V.A. and Sat'yanov S.V. *Metodika rascheta nagruzok, prochnosti i resursa stvolov dymovykh i ventilyacionnykh promyshlennykh trub* [Method for loads, strength and resource calculating of the trunks of smoke and ventilation industrial chimneys]. Moskva: Universum, 2005, 264 p. (in Russian).
9. Yarovoj Yu. N. and Perepelica E.A. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie kirpichnoj kladki stvolov dymovykh trub v zonax ustanovki styazhnykh kolec* [Stress-strain state of masonry of chimney trunks in zones of clamping rings installation]. *Stroitel'naya mexanika i raschet sooruzhenij* [Structural mechanics and design of structures]. 2016, no. 1, pp. 7–13. (in Russian).
10. Hegemier G.A., Nunn R.O., Arga S.K. *Behaviour of concrete masonry under biaxial stresses*. Proceedings of the North American Masonry Conference, August 14-16, 1978, University of Colorado, Boulder, Colorado, 1978, pp. 76–84.

Рецензент: Дерев'янюк В. М., д-р т. н., проф.

Надійшла до редколегії: 10.03.2017 р. Прийнята до друку: 17.03.2017 р