

О. В. Войцехівський
В. О. Попов
Н. Д. Дорохова

СТІЙКІСТЬ РІВНОВАГИ ВИСОТНИХ ДИМОВИХ ТРУБ НА ФУНДАМЕНТАХ МІЛКОГО ЗАКЛАДАННЯ

Вінницький національний технічний університет

Розглянуто принципи розрахунку стійкості рівноваги димових труб на фундаментах мілкового закладання з урахуванням аеродинамічних особливостей їх ствола, кренів та нерівномірності тиску під подошвою, розроблено алгоритм розрахунку подібних споруд, виведено аналітичні співвідношення, які дозволяють оцінити запас стійкості споруди від перекидання.

На прикладі залізобетонної висотної димової труби без футерівки доведена висока ймовірність появи граничного стану втрати стійкості. Узагальнено методи підвищення надійності споруд від перекидання.

Ключові слова: промислові димові труби, оптимізація конструкцій, стійкість рівноваги, крен, перекидання.

Вступ

Димові труби є відповідальними висотними інженерними спорудами для утилізації відпрацьованих пічних газів. Типова залізобетонна димова труба (рис. 1). складається з циліндричного чи конічного ствола (поз. 1), улаштованого на фундаментах (поз. 2) та футерованого плиткою або вогнетривкою цеглою, сервісних драбин (поз. 6) та світофорних майданчиків (поз. 3), а також приєднаних до ствола газоходів (поз. 4) із системою блискавкозахисту (поз. 5).

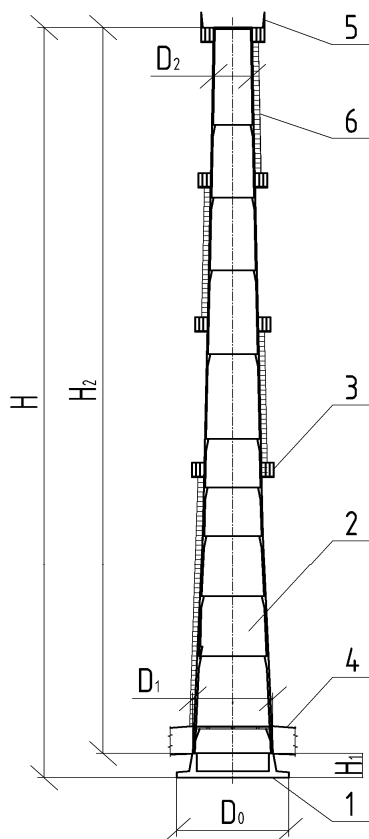


Рисунок 1 – Конструкція залізобетонної димової труби: а – конструктивна схема труби, б – реальна висотна димова труба Харківської ТЕС з залізобетонним стволом

На сьогодні існують жорсткі вимоги по допустимій концентрації продуктів горіння у атмосфері. Димова труба забезпечує вимоги цих норм, відводячи небезпечні речовини на велику висоту з розсіюванням їх на якомога більшу площу, задля чого їх стволи повинні бути якомога вищими. Із збільшенням висоти зростає швидкісний напір вітру, що призводить до квадратичного зростання тиску на конструкції труб і, відповідно, суттєвого збільшення згинальних та перекидних моментів.

У більшості сучасних літературних джерел ствол димової труби, при розрахунку, розглядається як жорстко защемлена у ґрунті консольна балка змінної жорсткості [5, 7]. Однак для висотних димових труб, як споруд з малою, у порівнянні з висотою, основою, небезпечним є стан понаднормативних кренів і, як наслідок, втрата стійкості рівноваги.

Згідно з [1, с. 74] з умов раціонального проектування для димових труб використовують фундаменти мілкового закладання у вигляді круглої чи полігональної плити або плити кільцевого перерізу. Згідно з чинними нормами тиск під фундаментами повинен бути вищий нуля, тобто відрив підшви фундаментів від основи не допускається. Габарити фундаментів призначають такими, щоб співвідношення мінімального тиску на ґрунт під одним, менш завантаженим, краєм фундаментів (f_2) був не меншим 0,25 від максимального тиску (f_1), рис. 2, а). Однак, зрозуміло, що в момент можливого перекидання ця умова не виконується.

Питання стійкості рівноваги димових труб на плитах прямокутної форми детально розглянуто у [2]. Однак такий частинний випадок форми фундаментів не може задовольнити потреби інженерів, що конструюють споруди раціональної форми.

Основна частина

Методика збору вітрових навантажень на ствол димової труби, з врахуванням аеродинамічних особливостей ствола детально описані у [1, С. 44 – 54, 65 – 70].

При роботі реальних труб фундамент опирається на ґрунт певної кінцевої жорсткості. Втрата стійкості рівноваги відбувається внаслідок дії горизонтальних сил (вітрових впливів) та монтажних неточностей. Процес реального перекидання споруд на нежорсткій основі є надзвичайно складним та супроводжується випором ґрунту в різні боки під більш завантаженою частиною фундаментів, позаграничною роботою ґрунту безпосередньо під фундаментною плитою, частковим відривом плити від основи, тощо. Постає задача створення математичної моделі роботи конструкції димової труби з урахуванням складної сукупності деформацій ґрунту. При аналітичному моделюванні, урахувати всі ці ефекти неможливо, тому для цієї оціночної задачі скористаємося певними припущеннями (припущення про лінійну деформацію ґрунту під впливом навантажень та про відсутність випорів ґрунту, припущення про абсолютну жорсткість фундаментів та про відсутність ефекту їх бічного защемлення ґрунтом, припущення про розташування миттєвої осі обертання споруди в момент перекидання по осі опорної платформи, вісь O_2O_2 , рис. 2).

Внаслідок нерівномірного стискання ґрунту межа стискаємої товщі розташована по осі O_1O_1 рис. 2,б). Розглянемо граничний стан димої труби з циліндричним плитним фундаментом в момент перекидання. Підходи, математичного опису граничного стану частково описані у [3]. Ґрунт, що zdeформував під поверхнею O_1OO_1 , створює реакцію опору R_z . Кут повороту фундаментної плити φ , і, відповідно, вертикальної геометричної осі споруди, ствол якої умовно будемо вважати абсолютно жорстким, у момент перед самим перекиданням, причому $\varphi \rightarrow 0$. Припускаємо, що ґрунт деформує пружно, тобто напруження f пропорційно зв'язані з деформаціями під опорною поверхнею z через коефіцієнт жорсткості C : $f = C \cdot z = C \cdot x \cdot \varphi$. Для малих φ зміщення осі перекидання від габариту $s \approx z_{\max} \cdot \varphi = \Delta h \cdot \varphi$. Момент реакції опору ґрунту $M_z = R_z \cdot a$, де a – координата по Ox розташування центра ваги заштрихованого кругового сегмента. Оскільки $\varphi \rightarrow 0$ при розрахунку зміщення центра мас димої труби по вертикалі можна не враховувати.

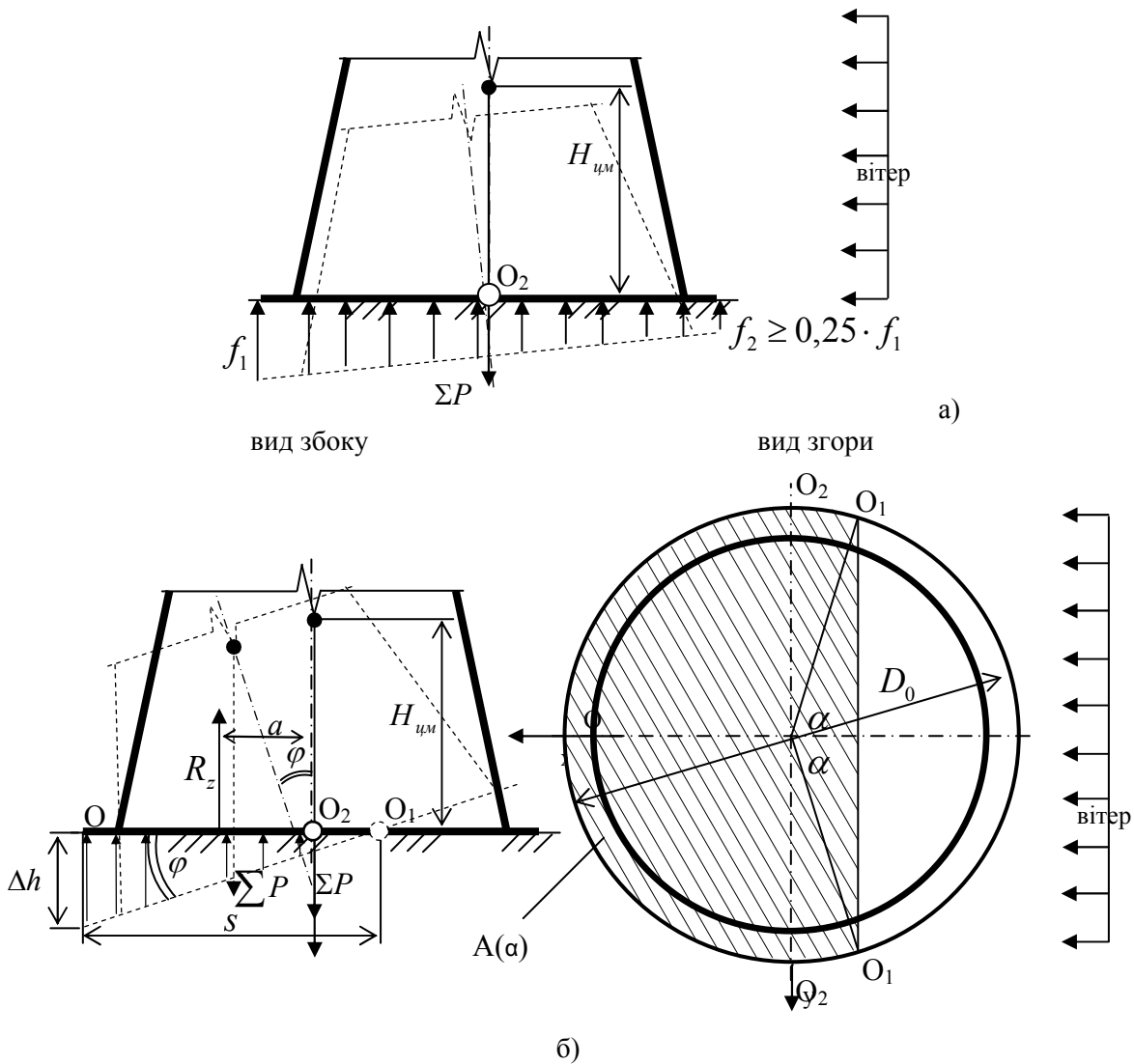


Рисунок 2 – Модель основи димової труби на пружному ґрунті:
а – при нормальній роботі, б – в момент граничного стану втрати стійкості рівноваги

Стан миттєвої рівноваги моментів та сил описується формулами (1) та (2) відповідно:

$$\sum M_{O_2O_2} : M_P - M_z + M_{cm} = 0, \quad (1)$$

$$\sum Z : \sum P - R_z = 0. \quad (2)$$

На рис. 2,б заштрихована ділянка ґрунту O_1OO_1 площею $A = A(\alpha)$ під плитою, що стискається.

З умови пружності ґрунту витікає, що епюра напружень f має вигляд аналогічний епюрі деформацій z . Рівнодійну R_z можна знайти, виконавши інтегрування виразу $R_z = C \cdot \varphi \int_0^s y(x) \cdot x dx$,

де $y(x)$ – ширина платформи в залежності від координати x , або за співвідношенням $R_z = C \cdot \varphi \cdot A(\alpha) \cdot (s(\alpha) - D_0/2 + a(\alpha))$. Момент M_z знаходимо з виразу $M_z = C \cdot \varphi \cdot A(\alpha) \cdot a(\alpha) \cdot (s(\alpha) - D_0/2 + a(\alpha))$. Горизонтальне зміщення центра мас димової труби наближено становить $\Delta_{cm} \approx H_{cm} \cdot \varphi$.

З попередніх міркувань та з рівностей (1) та (2) випливають співвідношення (3) та (4) для знаходження критичного моменту втрати стійкості рівноваги:

$$M_P = C \cdot \varphi \int_0^s y(x) \cdot x dx \cdot a(\alpha), \quad (3)$$

$$C \cdot \varphi \int_0^s y(x) \cdot x dx = \sum P. \quad (4)$$

Ці вирази також можуть бути записані у вигляді (5) та (6) – системи з трьма невідомими – M_p , φ і α :

$$M_p = (C \cdot A(\alpha) \cdot a(\alpha) \cdot (s(\alpha) - D_0 / 2 + a(\alpha)) - \sum P \cdot H_{цм}) \cdot \varphi, \quad (5)$$

$$C \cdot \varphi \cdot A(\alpha) \cdot (s(\alpha) - D_0 / 2 + a(\alpha)) = \sum P. \quad (6)$$

Вирази (5) та (6) справедливі у випадку, якщо момент M_p призводить до відриву фундаментів від поверхні. До відриву рівняння рівноваги, яке описує стан зображений на рис. 2,а), має форму (7):

$$\sum P \cdot H_{цм} \cdot \varphi + M_p = c \cdot \varphi \cdot I_{O_2-O_2}, \quad (7)$$

де $I_{O_2-O_2}$ – момент інерції плити відносно центра ваги підшови фундаментів. Для фундаментів у вигляді кола $I_{O_2-O_2} = \pi \cdot D_0^4 / 64$.

Граничний момент M_{pu0} та кут φ_{u0} , при якому відбувається перехід напруженого стану ґрунту під підшовою від трапецеїдальної форми (рис. 2,а) до трикутної (рис. 2,б) можна визначити за формулами (8) та (9):

$$M_{pu0} = \sum P \cdot D_0 / 8, \quad (8)$$

$$\varphi_{u0} = \frac{\sum P \cdot D_0}{8 \cdot (\pi \cdot C \cdot D_0^4 / 64 - \sum P \cdot H_{цм})}, \quad (9)$$

Узагальнюючі вирази (5 – 6) отримуємо аналітичне рішення залежності M_p та φ від параметру α , яке справедливе не тільки для фундаментів круглого перерізу, а й для плит будь-якої форми.

$$M_p = \sum P \cdot \left(a(\alpha) - \frac{H_{цм} \cdot \sum P}{C \cdot A(\alpha) \cdot (s(\alpha) - D_0 / 2 + a(\alpha))} \right). \quad (10)$$

$$\varphi = \frac{\sum P}{C \cdot A(\alpha) \cdot (s(\alpha) - D_0 / 2 + a(\alpha))}. \quad (11)$$

Аналіз функціоналу (10) доводить, що чим більшою є загальна вага ствола та діаметр основи фундаментної плити, тим більшим є запас стійкості рівноваги споруди, водночас, збільшення висоти ствола цей запас стійкості зменшує. На загальну вагу ствола впливає матеріал, з якого виготовлена димова труба та наявність футерівки. Сталеві труби, наприклад, у порівнянні з аналогічними залізобетонними, будуть володіти меншим запасом стійкості рівноваги, через значно меншу погонну вагу. Власної ваги склопластикових високих труб при баштовій конструктивній схемі взагалі не достатньо для утримання від перекидання, тому вони можуть бути влаштовані за щогловою конструктивною схемою, або зводиться у металевому обрамлюючому каркасі.

Зрозуміло також, що чим менше жорсткість ґрунту (C), тим більший крен φ і, відповідно, менший перекидний момент M_p може сприйняти споруда.

Очевидно існує раціональне співвідношення висоти ствола до розмірів основи фундаментів з урахуванням перелічених вище конструктивних особливостей та деформаційних властивостей ґрунту.

Оціночний розрахунок запасу стійкості рівноваги та зміщення осі перекидання S від краю підшови в момент перекидання виконаємо для реальної димової труби з залізобетону, не футерованої, яка побудована на узбережжі Чорного Моря поблизу м. Южне (III вітровий район, тип місцевості – I) з такими конструктивними параметрами. Глибина закладання підшови фундаментів $H_1 = 5,2$ м, діаметр основи $D_0 = 20,5$ м, висота ствола $H_2 = 150,1$ м, верхній та нижній діаметри усіченого конуса ствола $D_1 = 14,6$ м, $D_2 = 6,8$ м, товщина стінки

ствола – змінна – від 350 мм (поблизу основи) 200 мм (в верхній частині) загальна вага споруди з фундаментами без врахування коефіцієнтів запасу $\Sigma P = 5 \cdot 10^4$ кН, висота центра мас ствола над рівнем підшоши $H_{цм} = 41,8$ м). Граничне значенням жорсткості піщаного ґрунту, який улаштовано під підшовою $C \approx 1 \cdot 10^8$ Па / м. Встановлений термін експлуатації труби – 30 років [1, додаток В], $\gamma_{fm} = 0,9$ [1, табл. 9.1].

Збір вітрових навантажень виконуємо за методикою, викладеною у [8]. Після усіх перетворень, з врахуванням коефіцієнтів динамічності споруди отримуємо момент вітрових сил, що прагне перекинути споруду $M_{pw} = 152\ 512$ кН · м.

Згідно з вимогами чинних норм [4] та [9] допустимі монтажні крени осі димової труби складають 1/500 від висоти. Цей початковий крен може призвести до зміщення центра мас ствола від вертикалі, і, у сукупності із вітровим впливом – до збільшення перекидного моменту. Момент від початкового крена $M_{ph} = \frac{\Sigma P \cdot H_{цм}}{500} = \frac{5 \cdot 10^4 \cdot 41,8}{500} = 4180$ (кН · м).

Граничний момент зовнішніх сил, що може призвести до перекидання споруди $M_{pu} = M_{pw} + M_{ph} = 152\ 512 + 4\ 180 = 156\ 692$ (кН · м).

Граничний M_{pu0} при якому відбувається перехід напруженого стану ґрунту під підшовою від трапецеїдалної форми до трикутної за формулою (8) становить $M_{pu0} = 5 \cdot 10^4 \cdot 20,5/8 = 128\ 125$ (кН · м). Кут, що відповідає цьому моменту становить $\varphi_{u0} = 0,0085^\circ$.

Умова $M_{pu} = 156\ 692$ кН · м $>$ $M_{pu0} = 128\ 125$ кН · м не виконана. Максимальний тиск під підшовою при цьому складатиме $f_1 = 337$ кПа, мінімальний $f_2 = -34$ кПа. Умова співвідношення тисків $f_2 / f_1 \geq 0,25$ не виконана, умова відсутності відриву підшоши $f_2 > 0$ – не виконана. Отже, споруда такої висоти в цих кліматичних умовах має бути більш важкою, тобто, з футерівкою. Подальші розрахунки показують, що футерівка вогнетривкою цеглою всередині ствола товщиною 380 мм для цієї димової труби має бути до відмітки не менше + 65,0 м.

Оцінимо граничне значення стабілізаційного моменту, виходячи з припущення про абсолютно жорстку основу та умовний упор поблизу фундаментів у т. О $M_{stab} = \frac{\Sigma P \cdot D}{2} = \frac{5 \cdot 10^4 \cdot 20,5}{2} = 512\ 500$ (кН · м). Добре видно, що $M_{stab} = 512\ 500$ кН · м більш ніж у 3 рази більший за граничний момент $M_{pu} = 156\ 692$ кН · м. При розрахунку споруди на стійкість від перекидання обов'язково необхідно враховувати коефіцієнт запасу стійкості, який для димових труб складає $\gamma = 1,5$ [1]. Отже, ймовірність перекидання споруди низька, однак повністю не виключена. Ясно, що граничний стан перекидання при дії моменту $M_p = M_{pu} \cdot \gamma$ все ж таки може наступити, з причин понаднормативних деформацій ґрунту.

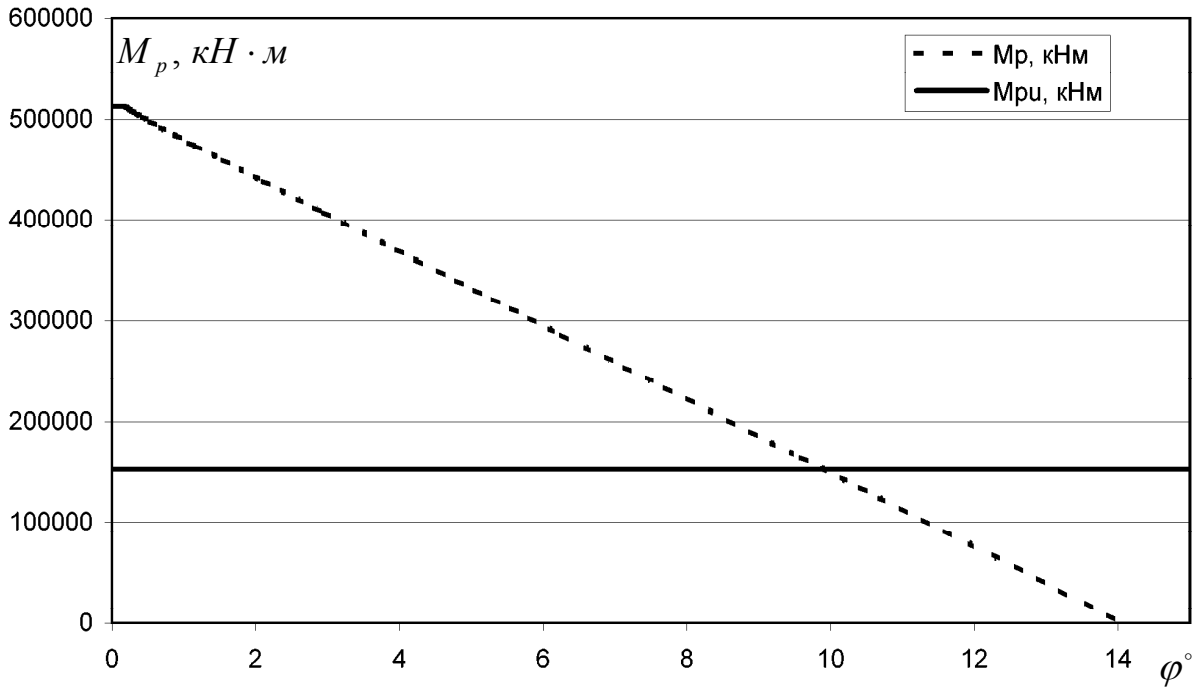
Трансцендентну систему рівнянь (10) та (11) зручніше вирішувати відносно невідомого параметра α (див. рис. 2, б). Невідомі функції $A(\alpha)$, $a(\alpha)$ та $s(\alpha)$ при круглій платформі будуть мати вигляд:

$$A(\alpha) = D_0^2 \cdot (2 \cdot (\pi - \alpha) + \sin(2\alpha)) / 8, \quad (12)$$

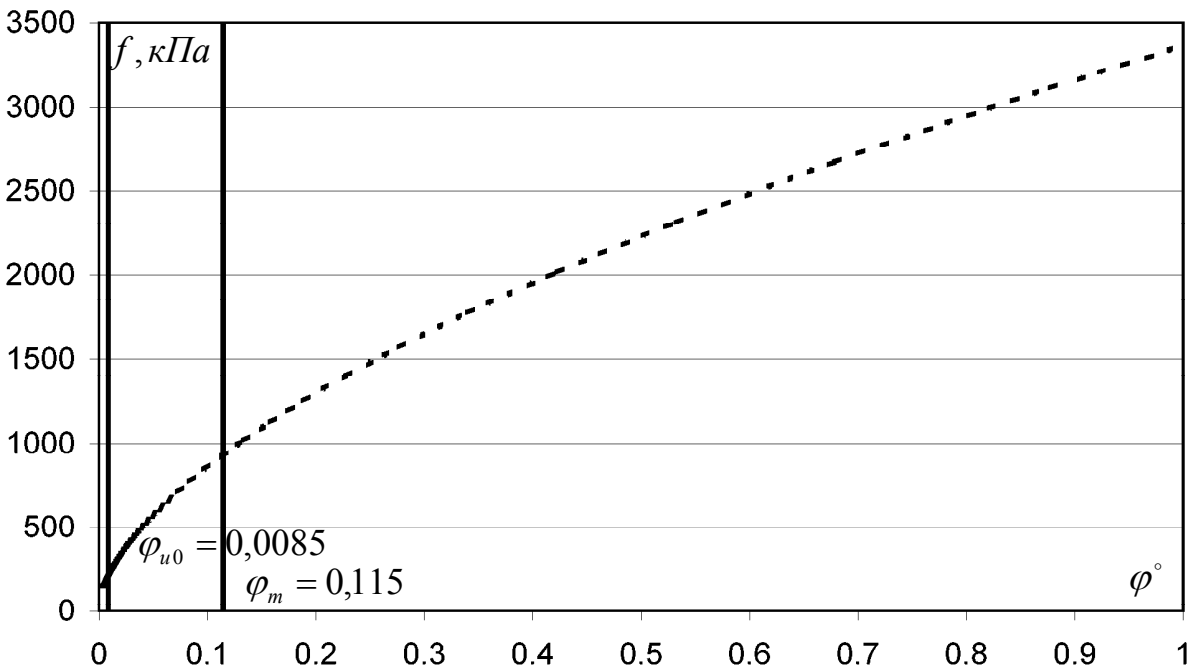
$$a(\alpha) = \frac{D_0}{2} + \frac{4}{3} \cdot \frac{\sin^3(\alpha)}{2 \cdot \alpha - \sin(2\alpha)}, \quad (13)$$

$$s(\alpha) = D_0 \cdot (1 + \cos(\alpha)) / 2. \quad (14)$$

Підставивши вихідні дані та співвідношення (12) ... (14) у рівняння (10), (11) та розв'язуючи їх відносно φ та M_p чисельними методами отримуємо графік $M_p(\varphi)$, зображений на рис. 3, який наближається до свого максимуму $M_{stab} = 512\ 500$ кН · м при $\varphi \rightarrow 0$.

Рисунок 3 – Графік залежності перекидного моменту від кута крену фундаментів, $M_p(\varphi)$

Добре видно, що при крені близько $9,5^\circ$ споруда втрачає стійкість при розрахунковому значенні вітрових впливів $M_{pu} = 156\,692$ кН·м.

Рисунок 4 – Розподіл максимального тиску під подошвою фундаментів f в залежності від крену плити φ

Чисельні дослідження $M_p(\varphi)$ доводять, що найбільш істотно на стійкість споруди впливає співвідношення D_0/H_{cm} . Для нашого випадку $D_0/H_{cm} = 20,5/41,8 = 0,49$. При зменшенні співвідношення до $D_0/H_{cm} = 0,43$, втрата стійкості відбувається при крені $8,1^\circ$. При найменшому розмірі фундаментної плити $D_0 = D_1 = 14,6$ м, $D_0/H_{cm} = 0,35$, втрата стійкості від зовнішніх впливів відбувається вже при крені $5,7^\circ$. Виявленню раціонального співвідношення D_0/H_{cm} будуть присвячені наступні наукові роботи.

Цікавим є характер розподілу тисків на ґрунт у граничному стані перекидання. При кренах $\varphi \leq 1^\circ$, тиск на ґрунт знаходиться у розумних межах (до 3,5 МПа). Далі – нелінійно зростає аж до нескінченності. Вже при монтажному крені, який рівний $1/500 = 0,115^\circ$, тиск під подошвою зростає до 0,950 МПа, а при крені всього у 1° , – тиск становить не менше 3,3 МПа, що перевищує міцність навіть щільних крупнозернистих пісків (який на глибині подошви 5,2 м складає – 2,4...3,0 МПа). Таким чином, втрата стійкості димової труби супроводжується крайовими структурними змінами ґрунту навіть при незначних кренах споруди. Тут необхідно зробити уточнення, що розподіли $f(\varphi)$ та $M_p(\varphi)$, показані, відповідно на рис. 4 та рис. 3, наведені виключно для умов конкретної димової труби у м. Южному. Для труб з іншими геометричними параметрами на інших ґрунтах ці графіки будуть іншими.

Висновки

- На основі проведених аналітичних досліджень та виконаних аеродинамічних розрахунків реальних димових труб виявлено, що граничний стан втрати стійкості рівноваги є цілком можливим для труб з легких матеріалів (металу та скляпластику), а також, для дуже високих труб (більше 100 м).
- В результаті аналізу напружено-деформованого стану системи основа-фундамент-споруда виведені аналітичні співвідношення, які дозволяють оцінити запас стійкості димових труб, улаштованих на круглих плитах мілкового закладання.
- Виявлено, що на стійкість рівноваги димових труб найбільше чинить вплив співвідношення діаметра фундаментної плити до висоти центра мас споруди $D_0 / H_{цм}$. Чим більше це співвідношення, тим більший запас стійкості споруди.
- Виведені аналітичні залежності дозволяють оцінити граничний кут крена подошви фундаментів мілкового закладання, при якому втрата стійкості неминуча.
- Проведено дослідження впливів крайових тисків від крену ствола димової труби. Доведено, що втрата стійкості димової труби супроводжується крайовими структурними змінами ґрунту навіть при незначних кренах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Дымовые трубы: традиции и инновации: монография / В. М. Асташкин, В. С. Жолудов, А.З. Корсунский и др.; под ред. д-ра техн. наук, проф. В. М. Асташкина и канд. техн. наук А. З. Корсунского. – Челябинск: Издательский центр ЮурГУ, 2011. – 496 с.
2. Пановко Я.Г., Губанова И.И. Устойчивость и колебания упругих систем: Современные концепции, парадоксы и ошибки. 3-е изд., М.: Наука. Гл. ред. физико-математической литературы, 1979, – 384 с.
3. Попов В.О. Безфундаментні башти-атракціони з високоточним стовбуром. Монографія / В.О. Попов, І.П. Кондратенко, А.П. Ращепкін. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. – 208 с.
4. Котельні. ДБН В.2.5-77:2014. [На заміну СНиП II-35-76 «Котельные установки»]. [Чинний від 2015-01-01] – К.: Мінбуд України, 2014. – 49 с. – (Державні будівельні норми України).
5. Аэродинамический расчет котельных установок (нормативный метод) / под ред. С.И. Мочана. – 3-е изд. – Л.: Энергия, 1977. – 256 с.
6. Дужих Ф.П. Промышленные дымовые и вентиляционные трубы: справочное издание / Ф.П. Дужих, В. П. Осоловский, М. Г. Ладыгичев; под ред. Ф. П. Дужих. – М.: Теплотехник, 2004. – 464 с.
7. Попов В.О. Моделювання напружено-деформованого стану елементів підсилення димової труби висотою 150 м для раціонального проектування. Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. / В. О. Попов, Білоус О. О., Власко А. А Науково-технічний збірник. Вінниця, ВНТУ, 2015-1. С. 6 – 12.
8. Навантаження і впливи. Норми проектування. ДБН В.1.2-:2006. [На заміну СНиП 2.01.07-85 (крім розділу 10)]. [Чинний від 2007-01-01] – К. : Мінбуд України, 2006. – 71 с. – (Державні будівельні норми України).
9. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. ДСТУ Б В.1.2-3:2006. Введ. 3 1 січня 2007 р. на заміну розділу 10 СНиП 2.01.07-85. К.: Мінбуд України, 2006. – 10 с.

Войцехівський Олександр Владиславович – к.т.н., доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет.

Попов Володимир Олексійович – к.т.н., доцент кафедри будівництва, міського господарства та архітектури, Вінницький національний технічний університет.

Дорохова Наталія Дмитрівна – студентка Вінницького національного технічного університету.

O. Voicehivsky
V. Popov
N. Dorohova

STABILITY OF THE EQUILIBRIUM OF RAIL CONCRETE CHIMNEYS AT THE SHALLOW FOUNDATIONS

Vinnitsia National Technical University

Has been examined the principles of calculating stability of the equilibrium of chimneys on the foundations of shallow foundations subject to the aerodynamic features of their trunk, heels and irregularly pressure under the sole. Has been developed an algorithm for calculating similar structures, have been derived analytical functions that allow estimating the stability margins of structures from stalling.

On the example of concrete high-rise chimney without lining has been demonstrated the high probability of occurrence of the limiting state of loss of equilibrium stability. Has been performed generalization of methods for improving the reliability of structures from overturning.

Key words: industrial chimneys, optimization of structures, heel, stalling.

Voicehivsky Oleksandr – Ph.D. docent of department of civil engineering, architecture and municipal economy, Vinnitsia national technical university.

Popov Vladimir – Ph.D. docent of department of civil engineering, architecture and municipal economy, Vinnitsia national technical university.

Dorohova Nataliya – student, Vinnitsia National Technical University.

А.В. Войцеховский
В. А. Попов
Н. Д. Дорохова

УСТОЙЧИВОСТЬ РАВНОВЕСИЯ ВЫСОТНЫХ ДЫМОВЫХ ТРУБ НА ФУНДАМЕНТАХ МЕЛКОГО ЗАЛОЖЕНИЯ

Винницкий национальный технический университет

Рассмотрены принципы расчёта устойчивости равновесия дымовых труб на фундаментах мелкого заложения с учетом аэродинамических особенностей их ствола, кренов и неравномерности давления под подошвой, разработан алгоритм расчета подобных сооружений, выведены аналитические функции, которые позволяют оценить запас устойчивости сооружений от опрокидывания.

На примере конкретной высотной железобетонной дымовой трубы без футеровки доказана высокая вероятность возникновения предельного состояния потери устойчивости равновесия. Выполнено обобщение методов повышения надежности сооружений от опрокидывания.

Ключевые слова: промышленные дымовые трубы, оптимизация конструкций, устойчивость равновесия, крен, опрокидывание.

Войцеховский Александр Владиславович – к.т.н., доцент кафедры строительства, городского хозяйства и архитектуры, Винницкий национальный технический университет.

Попов Владимир Алексеевич – к.т.н., доцент кафедры строительства, городского хозяйства и архитектуры, Винницкий национальный технический университет.

Дорохова Наталья Дмитриевна – студентка, Винницкий национальный технический университет.