

МОДЕЛЮВАННЯ ДЕФОРМАЦІЙ ПОВЗУЧОСТІ ВИСОТНОЇ СПОРУДИ ПРИ ДІЇ СТАТИЧНОГО ВІТРОВОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Проаналізовано характер вітрового навантаження на висотну будівлю. Визначено величини деформацій повзучості висотної споруди, обумовлені напруженнями згину та зсуву, розглянуто їх сумісну дію в залежності від співвідношення «висота висотної споруди – її площа в плані». Запропоновано апроксимацію експериментальної кривої у світлі підходів теорії текучості.

Постановка проблеми. Однією з галузей народного господарства України, яка сьогодні інтенсивно розвивається, є будівництво. Особливу увагу приділяють зведенню висотних споруд, що пов'язано з дефіцитом вільних і придатних до забудови земельних ділянок, появою нових будівельних матеріалів, вдосконаленням будівельних технологій тощо [1–3]. Особливістю експлуатації висотних споруд, на відміну від поширених 5, 10 та 14-поверхових споруд, є підвищена небезпека як для мешканців самої висотної споруди, так і для мешканців навколишніх будинків [4, 5]. Одним з найважливіших чинників є безперервний і, очевидно, суттєвий вплив вітрового навантаження, яке буде спричиняти деформації форми висотної будівлі. Перевищення вказаних деформацій максимально допустимих значень може призвести до появи тріщин в конструкції споруди і навіть до її руйнування. Тому на сьогодні актуальними є дослідження про вплив вітрового (зокрема, статичного) навантаження на висотну споруду [6–9].

Розглянемо вплив статичного вітрового навантаження на висотну споруду. Очевидно, що буде мати місце миттєва пружна деформація та деформації повзучості, які розвиваються в часі. Ці деформації будуть спричиняти появу процесів, які впливають на стійкість висотної будівлі. Причинами виникнення небезпек, пов'язаних із втратою стійкості будівлі, можуть бути:

- деформації фундаменту висотної споруди, обумовлені повзучістю матеріалу фундаменту;
- деформації фундаменту внаслідок просідання ґрунту;
- нерівномірні деформації окремих частин будівлі, обумовлені розсіянням механічних характеристик конструкційного матеріалу;
- деформації конструкції самої висотної споруди внаслідок повзучості матеріалу будівлі;
- деформації окремих частин будівлі, викликані нерівномірністю розподілення маси висотної споруди по площині фундаменту.

Причиною останніх двох з указаних видів навантажень є, як правило, вітрове навантаження. Визначення його впливу, враховуючи складність просторової структури висотної споруди, характер з'єднань її елементів, нерівномірність властивостей матеріалу будівлі тощо представляє собою досить важку задачу, яку, очевидно, слід розв'язувати у світлі сучасних уявлень теорії повзучості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технологія вітру є досить молодою наукою не тільки на теренах колишнього СНД, а й у світі, і вплив вітрового навантаження на висотні споруди є недостатньо дослідженим і надзвичайно складним. Але на сьогодні достеменно відомо, що вплив вітрового навантаження на висотні споруди може перебивати динаміку землетрусів силою в 4–5 балів [9]. Також відомо, що з середини висоти висотних споруд 40 відсотків вітрових потоків на будівлю рухається вниз. Енергія цих потоків створює локальні вітрові навантаження на висотну будівлю (в першу чергу, на його фасади), і на рівні входу у висотні будівлі вітрові навантаження можуть бути подібними або більшими, ніж на висоті 100 м. При цьому розрізняють глобальне вітрове навантаження («структурний вітер») від локального навантаження на фасад («панельного» або «пульсаційного» навантаження). При структурному навантаженні в 1500 Н/м^2 локальне (панельне) навантаження може досягати 5000 Н/м^2 [9]. Саме локальне («панельне») навантаження при проектуванні фасадних конструкцій, елементів їх кріплення, вікон тощо.

В залежності від напрямку дії по відношенню до поверхні висотної споруди вітрове навантаження розглядають [10] як сукупність нормального тиску, прикладеного до зовнішньої поверхні споруди, сил тертя, направлених по дотичній до зовнішньої поверхні, нормального тиску, прикладеного до внутрішніх поверхонь будівель з проникними огороженнями, тимчасово чи постійно відкритими прорізами. Також вітрове навантаження можна розглядати, як нормальний тиск w_x , w_y , обумовлений загальним опором споруди в напрямку осей x і y і умовно прикладений до проекції споруди на площину, перпендикулярну відповідній осі.

Нормативне значення середньої складової вітрового навантаження w_m на висоті z над поверхнею землі визначають за формулою [10]:

$$w_m = w_0 k c, \quad (1)$$

де w_0 – нормативне значення вітрового тиску;

k – коефіцієнт, який враховує зміну вітрового тиску по висоті;

c – аеродинамічний коефіцієнт.

Нормативне значення пульсаційної складової вітрового навантаження w_p , зокрема для багатопверхових будівель з постійними по висоті шорсткістю, масою і шириною навітренної поверхні на висоті z допускається визначати за формулою [11,12]:

$$w_p = 1,4(z/h)\xi w_{pk}, \quad (2)$$

де w_{pk} – нормативне значення пульсаційної складової вітрового навантаження на висоті h верха споруди; для споруд та їх конструктивних елементів, у яких перша частота власних коливань є вищою за граничне значення власної частоти, визначається за формулою:

$$w_p = w_m \zeta v, \quad (3)$$

де ζ – коефіцієнт пульсацій тиску вітру на рівні z , який залежить від величини z та типу місцевості;

v – коефіцієнт просторової кореляції пульсацій тиску вітру.

На зміну швидкості вітрового потоку впливає багато факторів. Це і шорсткість поверхні землі, і стійкість атмосфери тощо. Для екстраполяції швидкості вітру на різних висотах використовують логарифмічну або ступеневу залежності. Відповідно до другої профіль швидкості буде описуватись рівнянням [12]:

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha, \quad (4)$$

де V_2 і V_1 – відповідно швидкості вітру на висотах h_2 і h_1 ;

α – безрозмірний показник степеня, значення якого залежить від швидкості вітру, стійкості атмосфери та шорсткості поверхні.

Одним з основних матеріалів в сучасному і, зокрема, у висотному будівництві є бетон, який має досить складну структуру, яка представляє собою [6]: просторову решітку з цементного каменю, заповнену зернами піску і щебеню різної крупності і форми і насичену великою кількістю капілярів, мікро- і макропор, які містять воду, пари і повітря. Оскільки міцність бетону, його однорідність та фізико-механічні властивості залежать від структури бетону, при підборі його складу необхідно враховувати призначення конструкції, яка виготовляється з цього бетону, умови його експлуатації та інші фактори. Такими фізико-механічними властивостями бетону для будівельних конструкцій є [7]: міцність, деформативність, морозостійкість, достатня густина, водонепроникність тощо. В залежності від характеру і тривалості дії навантаження розрізняють три види деформації бетону: при одноразовій дії короткочасного навантаження, при дії тривалого навантаження, при дії навантаження, яке багаторазово повторюється. При одноразовій дії короткочасно прикладеного навантаження в конструкції виникають первинні деформації бетону, які складаються з пружної та пластичної складових. Співвідношення між пружними і пластичними деформаціями залежить від швидкості навантаження: чим вона є вищою, тим меншим є значення пластичних деформацій, і при миттєвому навантаженні деформації стають пружними. Багаторазове повторення циклів навантаження і розвантаження конструкції призводить до поступового накопичення в ній пластичних деформацій. Коли пластичні деформації досягають граничного значення, бетон починає працювати гранично пружно. Але такий характер деформацій спостерігається лише при напруженнях, які не перевищують границі тривалості бетону. В протилежному випадку після деякого числа циклів завантаження пластичні деформації наростають необмежено і конструкція руйнується. При тривалій дії навантаження пластичні деформації бетону проявляються протягом тривалого часу. В перші 3–4 місяці вони зростають найбільш інтенсивно, а потім поступово зменшуються, продовжуються і прямують до деякого граничного значення [12]. Властивість бетону, яка характеризується зростанням пластичних деформацій під дією навантаження, прикладеного протягом тривалого часу, називають повзучістю. Повзучість бетону залежить від багатьох факторів: вона збільшується при збільшенні напружень в бетоні, водоцементного відношення і кількості цементу, зменшується повзучість при збільшенні віку бетону до моменту його завантаження, підвищенні вологості середовища, міцності і модуля пружності камінних заповнювачів.

Виділення невирішених раніше частин проблеми. Умови експлуатації висотної споруди визначають посилений вплив вітрового навантаження, наслідком чого будуть деформації споруди. Останні, при перевищенні певних допустимих значень, можуть спричинити небезпечні зміщення частин будівлі, навіть втрату нею стійкості. Тому важливим є прогнозування цих деформацій в залежності від параметрів висотної споруди та характеру вітрового навантаження. Також є важливими (і в даній роботі

використовувались) характеристики повзучості, які визначають відносну деформацію бетону при певних величинах навантаження.

Метою даної статті є визначення деформацій повзучості висотної споруди, викликаних постійно діючим вітровим навантаженням.

Основний матеріал дослідження. Розглянемо деформації повзучості, викликані даним розподіленим навантаженням. Очевидно, що вони будуть складатись з деформацій δ_M , викликаних моментом згину від розподіленого навантаження та деформацій δ_τ , викликаних дотичними напруженнями від того ж таки розподіленого навантаження [13, 14]:

$$\delta = \delta_M + \delta_\tau. \quad (5)$$

Маючи закон розподілення вітрового навантаження по висоті будівлі, отримуємо епюри поперечних сил і згинальних моментів як функцій від координати поперечного перерізу висотної споруди та величини розподіленого навантаження, використавши розрахункову схему дії розподіленого навантаження на консольно закріплену балку, тобто отримуємо залежності:

$$P = P(q, h), \quad (6)$$

$$M = M(q, h), \quad (7)$$

де P – поперечна сила в довільному поперечному перерізі;

M – момент згину в поперечному перерізі балки;

q – розподілене вітрове навантаження;

h – координата поперечного перерізу.

Дотичні напруження і напруження згину знайдемо з відповідних епюр, побудованих за формулами (6) і (7), [15]:

$$\tau = \frac{P}{S} = \frac{P}{S_2 - S_1}, \quad (8)$$

$$\sigma = \frac{M_{зг}}{W_2 - W_1}, \quad (9)$$

де S_2 – площа висотної будівлі в плані по габаритних розмірах;

$S_1 = 4S'$ – площа внутрішніх пустот квадратних поперечних перерізів;

W_2 – момент інерції поперечного перерізу будівлі по габаритних розмірах в плані;

$W_1 = 4W'$ – сумарний момент інерції внутрішніх пустот квадратного поперечного перерізу.

При цьому приймаємо профіль висотної споруди в плані наступний: квадрат стороною 60×60 м², зовнішні стіни є несучими, мають товщину 50 см, внутрішній простір розділений по осям симетрії несучими стінами, які мають теж товщину 50 см. Таким чином, внутрішній простір представляє собою 4 квадрати розмірами 29 метрів.

Потужність вітрового потоку, який проходить через поперечний переріз площею F , дорівнює [4]:

$$Q = (FV) \frac{\rho V^2}{2}, \quad (10)$$

де F – площа поперечного перерізу;

V – швидкість вітрового потоку;

$\rho V^2 / 2$ – кінетична енергія одиниці об'єму потоку.

Віднісши потужність з попередньої формули до ширини висотної будівлі a і швидкості вітрового потоку V , отримаємо закон зміни розподіленого навантаження по висоті будівлі:

$$q(h) = \frac{P}{aV} = h \frac{\rho V^2}{2}, \quad (11)$$

$$\tau(h) = -0,0039h + 1,2136, \quad (12)$$

$$\sigma(h) = 2 \cdot 10^8 h^3 + 10^{-6} h^2 - 0,006h + 1,1234, \quad (13)$$

Характер зміни напружень по висоті споруди представлено на рис. 1.

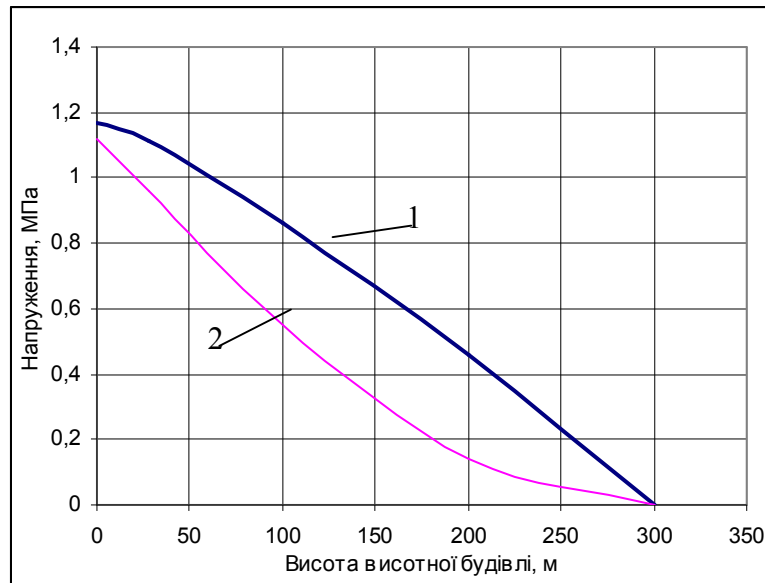


Рис. 1. Зміна напружень, викликаних вітровим навантаженням, по висоті висотної будівлі (1 – дотичні напруження, 2 – напруження згину)

Далі деформація елементарної ділянки dh буде визначатись відповідно дотичними і згинальними напруженнями:

$$da(h, \tau) = \tau(h) \frac{\delta(\tau)}{4,4} dh, \tag{14}$$

$$db(h, \tau) = \sigma(h) \frac{\delta(\tau)}{4,4} dh. \tag{15}$$

Сумарна елементарна деформація повзучості:

$$dc(h, \tau) = da(h, \tau) + db(h, \tau) = \tau(h) \frac{\delta(\tau)}{4,4} dh + \sigma(h) \frac{\delta(\tau)}{4,4} dh = \frac{\delta(\tau)}{4,4} (\tau(h) + \sigma(h)) dh. \tag{16}$$

Зміщення верхівки висотної споруди, викликане явищем повзучості бетону, визначимо за формулою:

$$c(h, \tau) = \frac{\delta(\tau)}{4,4} \int_0^H (\tau(h) + \sigma(h)) dh. \tag{17}$$

Підставивши вирази для $\tau(h)$ і $\sigma(h)$ з формул (12) і (13), отримаємо в кінцевому вигляді:

$$c(h, \tau) = \frac{\delta(\tau)}{4,4} \int_0^H (\tau(h) + \sigma(h)) dh = \frac{\delta(\tau)}{4,4} \int_0^H ((-0,0039h + 1,2136) + (2 \cdot 10^8 h^3 + 10^{-6} h^2 - 0,006h + 1,1234)) dh. \tag{18}$$

Для визначення деформацій повзучості використаємо дані експериментальних досліджень повзучості бетону, представлені І.П. Уліцьким в монографії [14]. Дослідні призми мали розміри перерізу 70×70 мм, 100×100 мм та 200×200 мм, але величина зусилля завантаження підбиралась таким чином, щоб напруження в бетоні призми було 4,4 МПа. На рис. 2 представлено результати досліджень [5] повзучості зразків пропареного бетону розмірів $70 \times 70 \times 315$ мм.

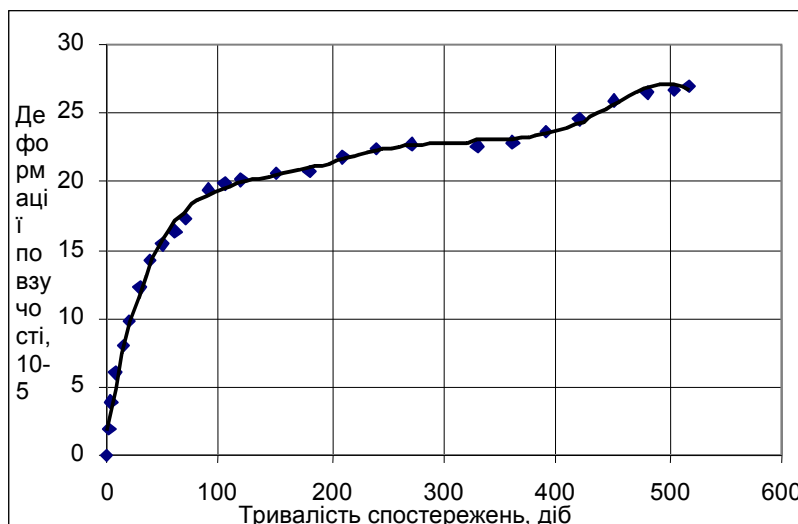


Рис. 2. Експериментальне дослідження деформацій повзучості бетону [5]

В результаті проведення розрахунків отримали, що сумарна деформація, викликана поперечними силами і напруженнями згину від вітрового навантаження, у напрямку, перпендикулярному осі висотної споруди, становить близько 3 см (висота споруди – 300 м, розміри будівлі в плані 60×60 м, тривалість деформації – 540 днів). Але поперечні розміри висотної споруди, за рекомендаціями, не повинні перевищувати 0,12Н, де Н – висота висотної споруди. Тоді для розмірів висотної споруди в плані $a = 0,12H = 30$ м отримали: зміщення верхівки висотної споруди при тому ж розподіленні вітрового навантаження становило 11 см. Будемо спостерігати нерівномірне розподілення з часом ваги висотної споруди, і, як наслідок, нерівномірну деформацію фундаменту висотної споруди.

Розглянемо аналітичні залежності, які описують наведені вище криві повзучості бетону. Розбиваючи весь відрізок часу, впродовж якого проводили дослідження, на дві ділянки: 1-ша: від 0 до 90 (днів), 2-га: від 99 до 520 днів, апроксимуємо дані ділянки експериментальної кривої кривою другого порядку і лінійною залежністю. Отримали наступні рівняння: для першої ділянки (з коефіцієнтом апроксимації $R = 0,99$):

$$y = -2 \cdot 10^{-8} \cdot x^2 + 3 \cdot 10^{-6} \cdot x + 4 \cdot 10^{-5}, \tag{19}$$

для другої ділянки (з коефіцієнтом апроксимації $R = 0,95$):

$$y_1 = 2 \cdot 10^{-7} \cdot x + 0,0002. \tag{20}$$

З іншого боку, з позицій теорії текучості дану експериментальну криву повзучості описують рівнянням виду:

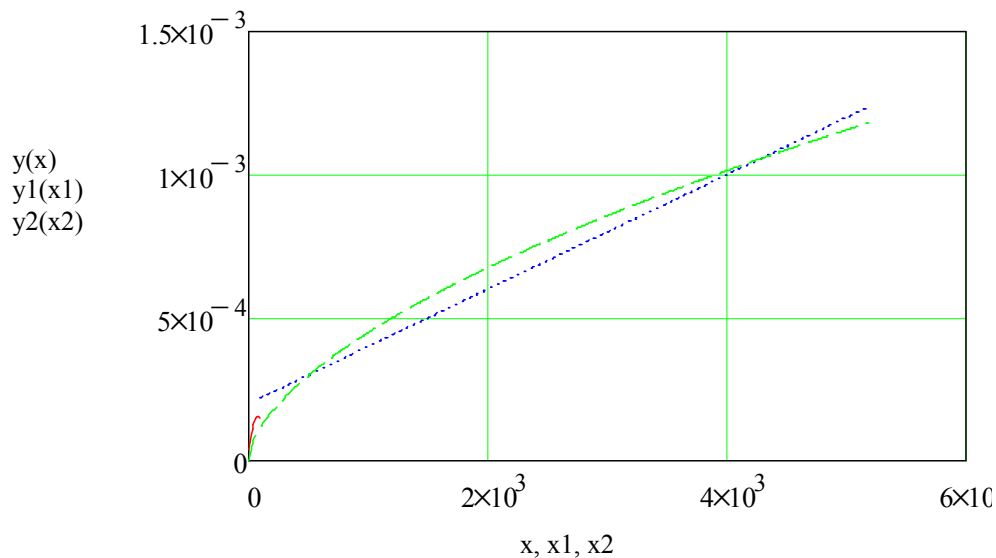
$$y_2 = \sigma^n B, \tag{21}$$

де n – коефіцієнт для певного матеріалу, залежить від температури;
 B – для певного матеріалу функція часу і температури.

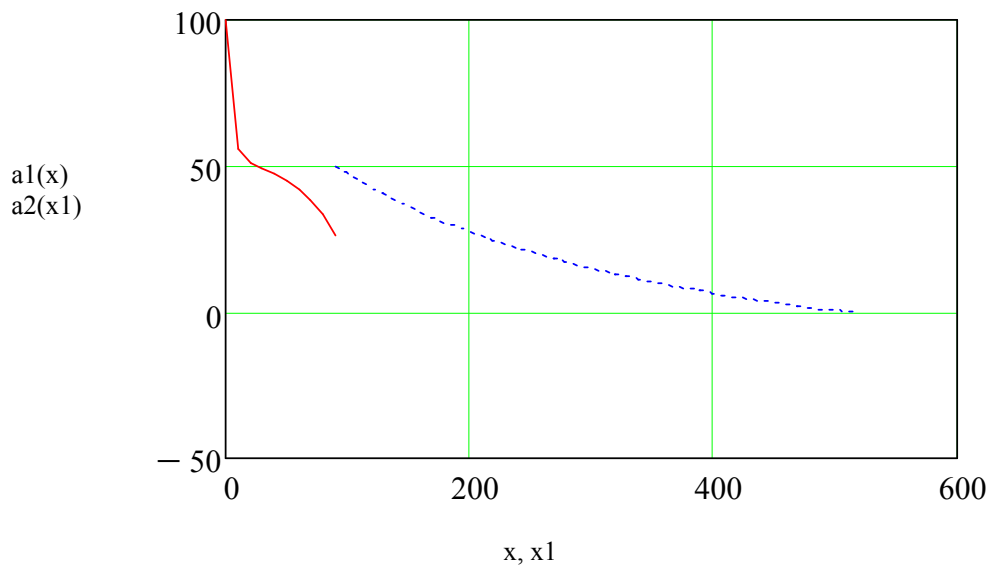
Нами пропонується в рамках теорії течії описувати деформації повзучості рівнянням:

$$y_2(x) = (4,4 \cdot 10^6)^{-0,53} \cdot \left(\frac{x}{508}\right)^{1,7}. \tag{22}$$

На рис. 3, а представлено співставлення апроксимацію лінійною і квадратичною залежністю з кривою, яка описує деформації повзучості в рамках теорії повзучості. Кількісна оцінка співпадання теоретичних графіків у вигляді відносної похибки дана на рис. 3, б. Як видно, похибка є суттєвою тільки на початковій стадії повзучості, коли деформації є, порівняно з кінцевими, невеликими. Починаючи приблизно з 300-го дня з початку спостережень, похибка збільшується від 6 % до нуля.



а)



б)

Рис. 3. Апроксимація експериментальних даних повзучості бетону квадратичною (функція $y(x)$) та лінійною (функція $y1(x)$) залежностями і кривою теорії текучості (функція $y2(x)$): а – якісна; б – кількісне співставлення теоретичних кривих

Висновки. Таким чином, розміри висотної споруди і характер її експлуатації обумовлюють підвищену дію вітрового навантаження, наслідком якої є деформації повзучості висотної споруди. Ці деформації призводять до викривлення геометричної форми висотної споруди, та перерозподілення її маси по площині фундаменту. Вони задовільно описуються в рамках теорії течії при суттєвих деформаціях. Ще одним видом деформації висотної споруди є деформації стін у вертикальному напрямку, які викликані нерівномірністю повзучості бетону внаслідок розсіювання його механічних характеристик.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Ковальський Л.М. Експеримент у висотному будівництві продовжується // Будівництво України. – 2007. – № 9. – С. 17–20.

2. Ковальський Л.М., Кузьміна Г.В. Експериментальне будівництво багатоповерхових будинків житлово-цивільного призначення (вище 25 поверхів) // Будівництво України. – 2006. – № 10. – С. 2–7.
3. Ковальський Л.М., Чижмак Д.А. Експериментальний багатоповерховий висотний будинок на Дніпровській набережній у м. Києві // Будівництво України. – 2008. – № 10. – С. 6–10.
4. Шостачук А.М. Виникнення екологічних небезпек при зведенні висотних споруд в умовах міської забудови // Тези VI Міжнародної науково-практичної конференції «Практична космонавтика і високі технології», присвяченої 100-річчю з дня народження академіка С.П. Корольова, м. Житомир, 9–11 січня, 2007 р. – С. 92–93.
5. Шостачук А.М. Про необхідність створення моделей напруженого стану ґрунту поблизу висотної будівлі // Вісник ЖДТУ. – № II (41). / Технічні науки. – 2007. – С. 189–194.
6. Шостачук А.М., Конончук О.М., Худяков К.В. Особливості впливу вітрового навантаження на висотну будівлю // Тези XXXII науково-практичної міжвузівської конференції, присвяченої Дню університету, 14–16 березня 2007 року. – Житомир: ЖДТУ, 2007. – С. 21.
7. Ветроэнергетика / Под ред. Д. де Ризо: Пер. с англ.; под ред. Я.И. Шефтера. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 272 с.
8. Аеродинамічна інтерференція систем висотних будівель і споруд циліндричної форми: Автореф. дис... канд. техн. наук: 05.23.01 / О.С. Копилов; Нац. ун-т «Львів. Політехніка». — Л., 2005. — 21 с.
9. Беспрозванная И.М., Соколов А.Г., Фомин Г.М. Воздействие ветра на высокие сплошностенчатые сооружения. – М.: Стройиздат, 1976. – 185 с.
10. Николаев С.В. Высотное строительство – поиски новых конструктивных решений. http://remontclub.cv.ua/blog.php?blog_=153
11. Жилые и общественные здания: Краткий справочник инженера-конструктора / Ю.А. Дыховичный, В.А. Максименко, А.Н. Кондратьев и др.; Под ред. Ю.А. Дыховичного. – М.: Стройиздат, 1991. – 656 с.
12. Расчет и конструирование частей жилых и общественных зданий: Справочник проектировщика / П.Ф. Вахненко, В.Г. Хилобок, Н.Т. Андрейко, М.Л. Яровой; Под. ред. П.Ф. Вахненко. – К.: Будівельник, 1987. – 424 с.
13. Наназашвили И.Х., Бунькин И.Ф., Наназашвили В.И. Строительные материалы и изделия. Справочное пособие. – М.: Аделант, 2006. – 480 с.
14. Улицкий И.И., Киреева С.В. Усадка и ползучесть бетонов заводского изготовления. –К.: Будівельник, 1965 – 108 с.
15. Соппротивление материалов / Под. ред. Г.С. Писаренко. – К.: Вища шк., 1986. – 775 с.

ШОСТАЧУК Андрій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і механіки технічних систем Житомирського державного технологічного університету.

Наукові інтереси:

- стійкість висотних споруд;
- механіка деформівного твердого тіла;
- інженерна геологія;
- екологія міста.

Подано 03.11.2008

Шостачук А.М. Моделювання деформацій повзучості висотної споруди при дії статичного вітрового навантаження

Шостачук А.Н. Моделирование деформаций ползучести высотного сооружения при действии статической ветровой нагрузки

Shostachuk A.M. Modelling of crawling deformation of multi-storeyed building under the action of the static wind charge

УДК 69.032.22

Моделирование деформаций ползучести высотного сооружения при действии статической ветровой нагрузки / А.Н. Шостачук

Проанализирован характер ветровой нагрузки на высотное сооружение. Определены величины деформаций ползучести высотного сооружения, обусловленные напряжениями изгиба и сдвига, рассмотрено их совместное действие в зависимости от соотношения «высота высотного сооружения – её площадь в плане». Предложена аппроксимация экспериментальной кривой в свете подходов теории текучести.

УДК 69.032.22

Modelling of crawling deformation of multi-storeyed building under the action of the static wind charge / A.M. Shostachuk

The character of the wind charge on the multi-storeyed buildings is analysed. The sites of the crawling deformation of a multi-storeyed building, caused by effort of bend and displacement are defined, their common action in dependence of the correlation “the height of the multi-storeyed building – its surface in plane is considered.

The approximation of the experimental curve in the light of the approaches of the theory of fluidity is proposed.