

УДК 624.016:539.376

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.070720.112.647

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ГІБРИДНИХ ДЕРЕВОЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАГАТОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ З УРАХУВАННЯМ ДЕФОРМАЦІЙ ПОВЗУЧОСТІ

ШЕХОРКІНА С. Є.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
БУЦЬКА О. Л.², канд. техн. наук, доц.,
ШЛЯХОВ К. В.³, канд. техн. наук, доц.,
БОРДУН М. В.⁴, аспір.

^{1*} Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (095) 021-84-44, e-mail: S_VT@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-7799-2250

² Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (0562) 47-03-19, e-mail: Buckaya_elen@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-4377-3746

³ Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (097) 015-28-79, e-mail: byahov@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-6493-6201

⁴ Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, тел. +38 (098) 260-11-91, e-mail: klmari@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-8539-2423

Анотація. *Постановка проблеми.* Наразі розробляються нові рішення гібридних конструкцій багатоповерхових будівель, в яких основним конструкційним матеріалом постає деревина, а для забезпечення просторової жорсткості використовується залізобетон або сталь. Проблема в розробленні таких проектів полягає у значній різниці в характеристиках деформування та реологічних властивостях деревини та бетону, що може істотно впливати на несну здатність та експлуатаційну придатність гібридної будівлі. На сьогоднішній день питання спільної роботи цих матеріалів в елементах конструктивних систем вивчені недостатньо. *Мета статті* – дослідження напружено-деформованого стану гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель з урахуванням впливу деформацій повзучості. *Висновки.* Наведено методика врахування особливостей деформування та повзучості деревини та бетону в розрахунку гібридних багатоповерхових будівель. З використанням програмного комплексу «Ліра» виконано моделювання напружено-деформованого стану багатоповерхових будівель гібридної конструкції з колонами та балками з клеєної деревини та ядром жорсткості із залізобетону. Встановлено, що характеристики деформування та повзучість матеріалів істотно впливають на величину переміщень елементів каркаса. Показники вертикальних переміщень з урахуванням повзучості в 1,57...1,66 рази перевищують визначені в пружній стадії. Нерівномірне деформування вертикальних конструкцій спричинює перекид поверхових комірок, перерозподіл зусиль між елементами каркаса та виникнення додаткових поздовжніх зусиль в балках перекриття. Таким чином, у проектуванні багатоповерхових гібридних деревозалізобетонних будівель необхідно враховувати вплив деформаційних та реологічних властивостей деревини та бетону на параметри напружено-деформованого стану.

Ключові слова: гібридні багатоповерхові будівлі; напружено-деформований стан; деревина; бетон; діаграма деформування; повзучість

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ГИБРИДНЫХ ДЕРЕВОЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ С УЧЕТОМ ДЕФОРМАЦИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

ШЕХОРКИНА С. Е.^{1*}, канд. техн. наук, доц.,
БУЦКАЯ Е. Л.², канд. техн. наук, доц.,
ШЛЯХОВ К. В.³, канд. техн. наук, доц.,
БОРДУН М. В.⁴, аспір.

^{1*} Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днипро, Украина,

тел. +38 (095) 021-84-44, e-mail: S_VT@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-7799-2250

² Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Придніпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Дніпро, Украина, тел. +38 (0562) 47-03-19, e-mail: Buckaya_elen@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-4377-3746

³ Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Придніпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Дніпро, Украина, тел. +38 (097) 015-28-79, e-mail: 6lyahov@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-6493-6201

⁴ Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Придніпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Дніпро, Украина, тел. +38 (098) 260-11-91, e-mail: klmari@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-8539-2423

Аннотация. Постановка проблемы. В настоящее время разрабатываются новые решения гибридных конструкций многоэтажных зданий, в которых основным конструкционным материалом является древесина, а для обеспечения пространственной жесткости используется железобетон или сталь. Проблемой при разработке таких проектов является значительная разница в характеристиках деформирования и реологических свойствах древесины и бетона, что может существенно повлиять на несущую способность и эксплуатационную пригодность гибридного здания. На сегодняшний день вопросы совместной работы этих материалов в элементах конструктивных систем исследованы недостаточно. **Цель статьи** – исследование напряженно-деформированного состояния гибридных деревожелезобетонных многоэтажных зданий с учетом влияния деформаций ползучести. **Выводы.** Приведена методика учета особенностей деформирования и ползучести древесины и бетона при расчете гибридных многоэтажных зданий. С использованием программного комплекса «Лира» выполнено моделирование напряженно-деформированного состояния многоэтажных зданий гибридной конструкции с колоннами и балками из клееной древесины и ядром жесткости из железобетона. Установлено, что характеристики деформирования и ползучести материалов существенно влияют на величину перемещений элементов каркаса. Значения вертикальных перемещений с учетом ползучести в 1,57...1,66 раза превышают определенные в упругой стадии. Неравномерное деформирование вертикальных конструкций обуславливает перекося этажных ячеек, перераспределение усилий между элементами каркаса и возникновение дополнительных продольных усилий в балках перекрытия. Таким образом, при проектировании многоэтажных гибридных деревожелезобетонных зданий необходимо учитывать влияние деформационных и реологических свойств древесины и бетона на параметры напряженно-деформированного состояния.

Ключевые слова: гибридные многоэтажные здания; напряженно-деформированное состояние; древесина; бетон; диаграмма деформирования; ползучесть

STRESS-STRAIN STATE OF HYBRID TIMBER-REINFORCED CONCRETE MULTY-STORY BUILDINGS CONSIDERING CREEP DEFORMATION

SHEKHORKINA S.Ye.^{1*}, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
BUTSKA O.L.², *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
SHLYAKHOV K.V.³, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,
BORDUN M.V.⁴, *Postgrad. Stud.*

^{1*} Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, State Higher Educational Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (095) 021-84-44, e-mail: S_VT@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-4377-3746

² Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, State Higher Educational Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (0562) 47-03-19, e-mail: Buckaya_elen@mail.pgasa.dp.ua, ORCID ID: 0000-0002-4377-3746

³ Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, State Higher Educational Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (097) 015-28-79 e-mail: 6lyahov@i.ua, ORCID ID: 0000-0001-6493-6201

⁴ Department of Reinforced Concrete and Masonry Structures, State Higher Educational Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (098) 260-11-91, e-mail: klmari@ukr.net, ORCID ID: 0000-0002-8539-2423

Abstract. Problem statement. The new solutions of hybrid constructions of multi-storey buildings are being developed, in which the main structural material is timber and reinforced concrete or steel is used to ensure spatial rigidity. The problem in developing such projects is a significant difference in the deformation characteristics and rheological properties of timber and concrete, which can significantly affect the load-bearing capacity and serviceability of the hybrid building. At present time the issues of joint work of these materials in the elements of structural systems are insufficiently studied. **The purpose of the article** is to investigate the stress-strain state of hybrid wood-reinforced concrete multi-storey buildings taking into account the influence of creep deformations. **Conclusion.** The method of taking into account the

peculiarities of deformation and creep of timber and concrete in the calculation of hybrid multi-storey buildings is presented. Using the software complex "Lira" the modeling of the stress-strain state of multi-storey buildings of hybrid construction with columns and beams made of glued laminated timber and the reinforced concrete rigidity core. It is established that the characteristics of deformation and creep of materials significantly affect the value of displacement of the frame elements. The values of vertical displacements, taking into account the creep, are 1,57...1,66 times higher than those determined in the elastic stage. Non-uniform deformation of vertical structures causes skew of the storey cells, redistribution of forces between the elements of the frame and the appearance of additional longitudinal forces in the floor beams. Thus, for design multi-storey hybrid wood-reinforced concrete buildings, it is necessary to take into account the influence of deformation and rheological characteristics of wood and concrete on the parameters of the stress-strain state.

Keywords: *hybrid multi-storey buildings; stress-strain state; timber; concrete; deformation diagram, creep*

Постановка проблеми, мета і завдання дослідження. Наразі розробляються нові рішення гібридних конструкцій для будівництва багатоповерхових і висотних будівель, в яких основним конструкційним матеріалом постає деревина (до 80 %), а для забезпечення просторової жорсткості використовується залізобетон або сталь. Як приклади можна навести такі будівлі: LifeCycle Tower ONE, Panorama Giustinelli, Murray Grove, Origine Condos, Brock Commons та багато інших [1]. Одна з можливих проблем у розробленні таких проектів – це значна різниця в характеристиках деформування деревини та бетону, а також вплив реологічних властивостей (повзучості) на несну здатність та експлуатаційну придатність окремих елементів та будівлі в цілому.

Дослідженням та розробленню рішень щодо запобігання впливу нерівномірного деформування несних конструкцій в багатоповерхових та висотних будівлях присвячені праці [2–4].

Методи розрахунку залізобетонних конструкцій з урахуванням діаграми деформування бетону наводяться в [5–7]. В дослідженнях [8; 9] розглядаються питання впливу повзучості на деформації залізобетонних конструкцій. Існуючі моделі для опису залежностей «напруження – деформації» деревини розглядаються в публікації [10]. Методика розрахунку дерев'яних конструкцій з урахуванням повної діаграми деформування наведена в статті [11]. Залежності для оцінювання деформацій деревини через повзучість наводять автори [12].

Таким чином, аналізу роботи бетонних та дерев'яних конструкцій присвячена велика кількість праць. Однак на сьогоднішній день

питання спільної роботи цих матеріалів у конструктивних системах досліджені недостатньо.

Метою роботи – дослідження напружено-деформованого стану (НДС) гібридних деревозалізобетонних багатоповерхових будівель з урахуванням впливу деформацій повзучості.

Виклад основного матеріалу. Аналіз напружено-деформованого стану багатоповерхових будівель гібридної конструкції виконувався з урахуванням діаграм деформування бетону та деревини, а також деформацій, спричинених повзучістю матеріалів.

Залежність «напруження – деформації» бетону для розрахунку залізобетонних конструкцій наведена в нормативному документі ДБН В.2.6-98:2009 і має вигляд (рис. 1):

$$\sigma_c = \frac{k\eta - \eta^2}{1 + (k - 2)\eta} f_{cd} \text{ за } 0 < |\varepsilon_c| < |\varepsilon_{cu1}|, \quad (1)$$

де $\eta = \varepsilon_c / \varepsilon_{c1}$; $k = 1.05 E_{cd} \varepsilon_{c1} / f_{cd}$; ε_{c1} – деформації за максимальних напружень; ε_{cu1} – номінальні граничні деформації бетону; f_{cd} – розрахункова міцність бетону на стиск.

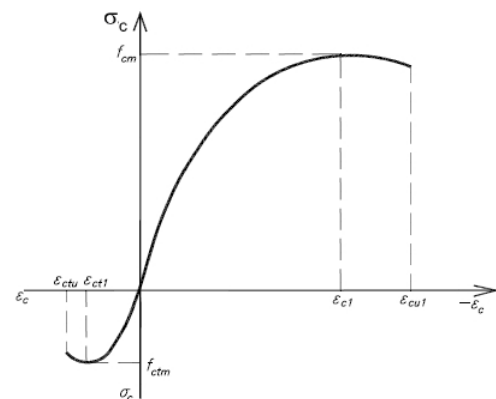


Рис. 1. Загальний вигляд діаграми деформування

бетону

Для моделювання роботи деревини на розтяг використано лінійну залежність, основу на законі Гука. Руйнування деревини відбувається за досягнення міцності на розтяг:

$$\sigma_{t,t} = \begin{cases} E_0 \varepsilon & \text{при } \varepsilon \leq \frac{f_{t,m,0}}{E_0} \\ 0 & \text{при } \varepsilon > \frac{f_{t,m,0}}{E_0} \end{cases}, \quad (2)$$

де $\sigma_{t,t}$ – напруження за розтягування; E_0 – модуль пружності паралельно волокнам; $f_{t,m,0}$ – міцність на розтяг паралельно волокнам; ε – деформація.

Робота деревини на стиск характеризується нелінійною залежністю, яка на даний момент не знайшла відображення в нормах проектування. Однак для моделювання може бути використана дволінійна залежність, яка враховує залишкову міцність деревини після досягнення міцності на стиск [10]. Висхідна гілка залежності «напруження – деформації» підпорядковується закону Гука. Для лінійно спадної гілки вводиться від’ємний коефіцієнт, який приблизно дорівнює 10 % від модуля пружності паралельно волокнам. Таким чином, отримаємо:

$$\sigma_{c,t} = \begin{cases} E_0 \varepsilon & \text{при } \varepsilon \leq \frac{f_{c,m,0}}{E_0} \\ f_{c,m,0} - 0.1 E_{c,0} \left(\varepsilon - \frac{E_{c,0}}{f_{c,m,0}} \right) & \text{при } \varepsilon > \frac{f_{c,m,0}}{E_0} \end{cases}, \quad (3)$$

де $\sigma_{c,t}$ – напруження за стискання; $f_{c,m,0}$ – міцність на стиск паралельно волокнам.

У загальному вигляді діаграма деформування деревини для моделювання НДС наведена на рисунку 2.

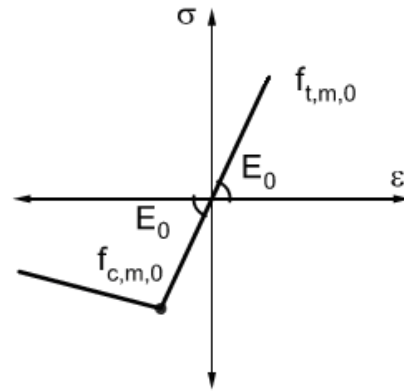


Рис. 2. Загальний вигляд діаграми деформування деревини [10]

Для врахування деформацій, спричинених повзучістю бетону, використано модель, наведену в Eurocode EN 1992-1-1. Коефіцієнт повзучості бетону визначається за формулою:

$$\varphi(t, t_0) = \varphi_0 \beta_c(t, t_0), \quad (4)$$

де φ_0 – теоретичний коефіцієнт повзучості, який дорівнює:

$$\varphi_0 = \varphi_{RH} \beta(f_{cm}) \beta(t_0), \quad (5)$$

де φ_{RH} – коефіцієнт, що враховує вплив відносної вологості; $\beta(f_{cm})$ – коефіцієнт, який враховує міцність бетону; $\beta(t_0)$ – коефіцієнт, що враховує вік бетону за навантаження; $\beta_c(t, t_0)$ – коефіцієнт, що описує розвиток повзучості протягом часу:

$$\beta_c(t, t_0) = \left(\frac{t - t_0}{\beta_H + (t - t_0)} \right)^{0.3}, \quad (6)$$

де t_0 – вік бетону в момент навантаження; t – вік бетону в поточний момент; β_H – коефіцієнт, що залежить від відносної вологості та умовного розміру елемента.

Повзучість деревини згідно з Eurocode EN 1995-1-1 враховується шляхом заміни модуля пружності E_0 на ефективний модуль пружності:

$$E_{t,eff}(t) = \frac{E_0}{1 + \varphi_t(t - t_0)}, \quad (7)$$

У нормах повзучість деревини відображає коефіцієнт деформацій $\varphi(t - t_0) = k_{def}$, який залежить від тривалості дії навантаження та класу експлуатації конструкції. При цьому вважається, що

граничні деформації відповідають періоду $(t-t_0) = 50$ років.

У праці [12] наводиться модель повзучості пружно-в'язко-пластичного тіла, що враховує механіко-сорбційні властивості деревини:

$$\varphi_t(t-t_0) = \varphi_{tc}(t-t_0) + \varphi_{tms}(t-t_0), \quad (8)$$

де φ_{tc} – коефіцієнт повзучості:

$$\varphi_{tc}(t-t_0) = \left(\frac{t-t_0}{t_d} \right)^m, \quad (9)$$

де φ_{tms} – коефіцієнт, що враховує механіко-сорбційні властивості:

$$\varphi_{tms}(t-t_0) = \varphi^\infty \left(1 - e^{-\frac{2\Delta u}{100\Delta t}(t-t_0)} \right), \quad (10)$$

де Δu – амплітуда зміни вологості протягом року (%); Δt – проміжок часу, який відповідає зміні вологості (365 днів); t_d , m , φ^∞ та c – емпіричні коефіцієнти ($t_d = 29\ 500$ днів, $m = 0,21$, $\varphi^\infty = 0,7$, $c = 2,5$).

Для моделювання напружено-деформованого стану багатопверхових будівель гібридної конструкції прийнято квадратний у плані будинок-прототип. Довжина прольотів в обох напрямках становила 5 м. Під час моделювання варіювалася кількість поверхів: 5, 10 і 15. Висота поверху для всіх варіантів прийнята 3 м, відповідно, висота будівель склала 15, 30 і 45 м. Розглянуто два види вузлів сполучення між горизонтальними і вертикальними несними елементами – шарнірне і жорстке. При цьому для забезпечення просторової жорсткості варіанта з шарнірними вузлами сполучення було застосовано ядро жорсткості. Схеми планувань для кожного варіанту наведені на рисунку 3.

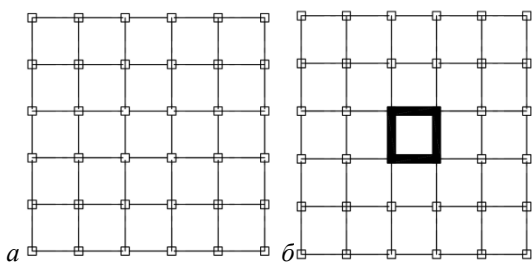


Рис. 3. Схеми планувань багатопверхових будівель гібридної конструкції: а) жорстке з'єднання вузлів; б) шарнірне з'єднання вузлів та ядро жорсткості

Для кожного варіанта будівлі була складена просторова скінченноелементна модель у програмному комплексі «Ліра». Для формування просторової моделі до елементів моделі прикладалися такі навантаження відповідно до вимог ДБН В.1.2-2:2006: 1 – власна вага несних конструкцій (задавалось автоматично) і постійне навантаження від складу перекриття і покриття ($1,5 \text{ кН/м}^2$); 2 – корисне навантаження на конструкції перекриттів (2 кН/м^2). Оскільки основною метою дослідження було встановлення впливу повзучості на параметри НДС будівлі, в даному випадку короточасні навантаження не враховувались.

Дерев'яні елементи будівлі були прийняті з клеєної деревини класу міцності GL28h (густина $\rho = 410 \text{ кг/м}^3$). Розміри поперечного перерізу несних конструкцій становили: колон – 400×400 мм (для 5-поверхової будівлі) та 500×500 (для 10- та 15-поверхових будівель); балок – 250×500 мм. Характеристики деревини: $f_{t,m,0} = 19,5 \text{ МПа}$, $f_{c,m,0} = 26,5 \text{ МПа}$, $E_0 = 12,6 \text{ ГПа}$. Ядро жорсткості – із залізобетону класу C20/25 товщиною 250 мм. Характеристики бетону: $f_{cd} = 14,5 \text{ МПа}$, $f_{ctd} = 1 \text{ МПа}$, $E_{cd} = 23 \text{ ГПа}$, $\varepsilon_{cl,cd} = 0,00165$, $\varepsilon_{cul} = 0,00344$, $\varepsilon_{ctul} = 0,000115$. Графіки зміни коефіцієнта повзучості для бетону та деревини наведені на рисунку 4.

Для урахування характеру роботи матеріалів та повзучості в програмі «Ліра» був обраний простий кроковий метод. Результати розрахунків, представлені у вигляді максимальних вертикальних переміщень характерних точок каркаса для розглянутих варіантів будівель, наведені в таблицях 1, 2.

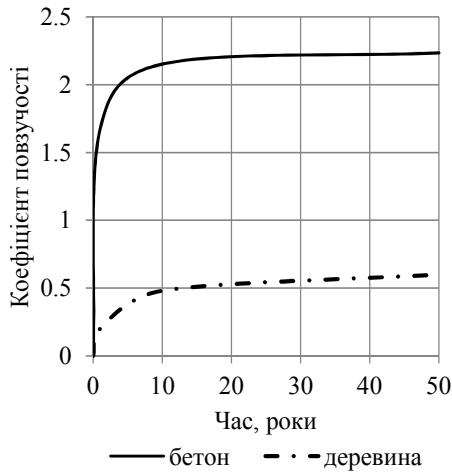


Рис. 4. Графіки зміни коефіцієнта повзучості для бетону та деревини

Таблиця 1

Максимальні вертикальні переміщення характерних точок каркаса із жорстким з'єднанням елементів

| Кількість поверхів | Пружна модель | З урахуванням повзучості через | | |
|--------------------|---------------|--------------------------------|----------|----------|
| | | 1 рік | 10 років | 50 років |
| 5 | 1,976 | 2,342 | 2,891 | 3,126 |
| 10 | 9,976 | 11,89 | 14,642 | 15,821 |
| 15 | 13,795 | 16,39 | 20,12 | 21,718 |

Таблиця 2

Максимальні вертикальні переміщення характерних точок дерев'яних елементів каркаса з шарнірним з'єднанням елементів та ядром жорсткості

| Кількість поверхів | Пружна модель | З урахуванням повзучості через | | |
|--------------------|---------------|--------------------------------|----------|----------|
| | | 1 рік | 10 років | 50 років |
| 5 | 2,498 | 2,984 | 3,680 | 3,979 |
| 10 | 9,860 | 11,76 | 14,501 | 15,677 |
| 15 | 27,926 | 33,98 | 42,658 | 46,376 |

Як видно з отриманих результатів, характеристики деформування та повзучості істотно впливають на величину переміщень елементів каркаса. При цьому цей вплив не значний для будівлі висотою 5 поверхів, тоді як для 10-поверхової будівлі вертикальні переміщення порівняно з пружною моделлю розрахунку збільшуються в 1,58 раза. Що стосується 15-поверхового варіанта, для схеми із жорстким з'єднанням вузлів переміщення з урахуванням повзучості в 1,57 раза перевищують переміщення в пружній стадії, а для шарнірного – в 1,66 раза.

Значна різниця у величинах вертикальних

переміщень дерев'яних елементів каркаса та залізобетонного ядра жорсткості викликає перекося поверхових комірок. Схема деформування фрагмента будівлі показана на рисунку 5.

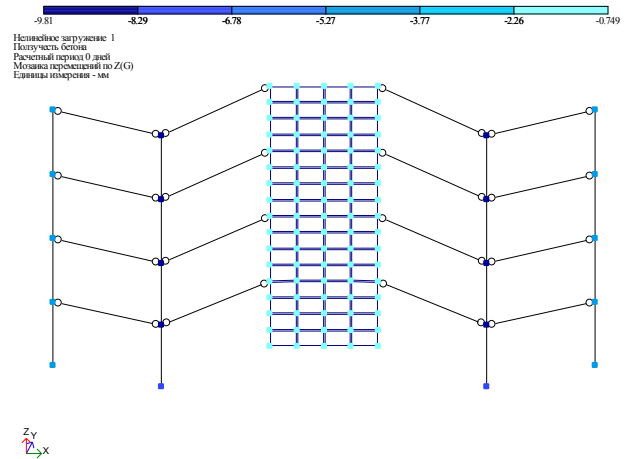


Рис. 5. Схема деформування фрагмента будівлі

Нерівномірне деформування вертикальних конструкцій зумовлює перерозподіл зусиль між елементами каркаса та виникнення додаткових поздовжніх зусиль у балках перекриття. Отримані значення поздовжніх зусиль у дерев'яних балках для схеми із шарнірним з'єднанням елементів та ядром жорсткості наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Значення поздовжніх зусиль у дерев'яних балках каркаса з шарнірним з'єднанням елементів та ядром жорсткості

| Кількість поверхів | Пружна модель | З урахуванням повзучості через | | |
|--------------------|---------------|--------------------------------|----------|----------|
| | | 1 рік | 10 років | 50 років |
| 5 | 0,068 | 0,126 | 0,130 | 0,128 |
| 10 | 0,219 | 0,644 | 0,729 | 1,306 |
| 15 | 0,314 | 0,917 | 1,032 | 1,844 |

Отже, проектуючи багатоповерхові гібридні будівлі з використанням матеріалів із різними деформаційними та реологічними характеристиками, слід враховувати вплив цих параметрів на несну здатність та експлуатаційну придатність як окремих конструктивних та оздоблювальних елементів, інженерно-технічних систем, так і будівлі в цілому.

Необхідна розробка конструктивних рішень, спрямованих на мінімізацію або усунення ефектів нерівномірного деформування у вертикальній площині. Серед

таких заходів можна виділити [2–4]:

- врівноваження внутрішніх напружень у вертикальних несних елементах (шляхом підбору відповідного розміру поперечного перерізу);

- абсолютна компенсація (ідеалізований метод, згідно з яким необхідне збільшення висоти елементів точно визначається для кожного поверху шляхом прогнозування деформацій);

- групова компенсація (метод, згідно з яким для корегування висоти елементи поєднуються в групи по декілька поверхів)

- застосування ауттригерних конструкцій;

- спеціальні конструктивні рішення вузлів з'єднання елементів.

Для обґрунтування ефективності застосування та визначення раціональних конструктивних заходів необхідне проведення подальших досліджень, спрямованих на забезпечення рівномірного деформування каркаса багатоповерхових будівель з дерев'яними несними елементами та залізобетонними конструкціями просторової жорсткості.

Висновки. Наведено методику врахування особливостей деформування та повзучості деревини та бетону для розрахунку гібридних багатоповерхових будівель.

З використанням програмного комплексу «Ліра» виконано моделювання напружено-деформованого стану багатоповерхових будівель гібридної конструкції з колонами та балками з клеєної деревини та ядром жорсткості – із залізобетону.

Установлено, що характеристики деформування та повзучості матеріалів істотно впливають на величину переміщень елементів каркаса. Значення вертикальних переміщень з урахуванням повзучості в 1,57...1,66 раза перевищують визначені в пружній стадії.

Нерівномірне деформування вертикальних конструкцій спричинює перебік поверхових комірок, перерозподіл зусиль між елементами каркаса та виникнення додаткових поздовжніх зусиль у балках перекриття. Таким чином, у проектуванні багатоповерхових гібридних дерево-залізобетонних будівель необхідно враховувати вплив деформаційних та реологічних характеристик на параметри напружено-деформованого стану.

Подальшим напрямком досліджень бачиться розроблення та обґрунтування конструктивних рішень, спрямованих на забезпечення рівномірного деформування каркаса.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Савицький М. В., Шехоркіна С. Є., Нікіфорова Т. Д., Шляхов К. В. Багатоповерхове дерев'яне домобудування : сучасні тенденції та майбутні перспективи. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Создание высокотехнологических экокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития*. 2017. Вып. 99. С. 153–159. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmcvtek_2017_99_23 (дата звернення: 10.05.2020).
2. Park H. S. Optimal compensation of differential column shortening in high-rise buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2003. Vol. 12 (1). Pp. 49–66. URL: <https://doi.org/10.1002/tal.212> (дата звернення: 10.05.2020).
3. Yi T., Tong X. Differential Column Shortening Effects in Typical Medium-to High-Rise Buildings. *New Horizons and Better Practices*. 2007. 178 p. URL: [https://doi.org/10.1061/40946\(248\)97](https://doi.org/10.1061/40946(248)97) (дата звернення: 10.05.2020).
4. Samarakkody D. I., Thambiratnam D. P., Chan T. H. T., Moragasipitiya P. H. N. Differential axial shortening and its effects in high rise buildings with composite concrete filled tube columns. *Construction and Building Materials*. 2017. Vol. 143. Pp. 659–672. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.091> (дата звернення: 10.05.2020).
5. Войцехівський О. В., Байда Д. М., Сазонова І. Р. Використання дволінійних діаграм деформування матеріалів при розрахунках залізобетонних конструкцій за деформаційним методом. *Містобудування та територіальне планування*. 2016. Вип. 61. С. 173–192. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2016_61_25 (дата звернення: 10.05.2020).
6. Бамбура А. М., Гурківський О. Б., Аметов Ю. Г., Безбожна М. С., Дорогова О. В., Сазонова І. Р., Стороженко Л. І. Нове в проектуванні залізобетонних та сталезалізобетонних конструкцій. *Будівельні конструкції*. 2013. Вип. 78 (1). С. 3–13. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/buko_2013_78%281%29_3 (дата звернення: 10.05.2020).
7. Країнський П. І., Хміль Р. Є., Білярський З. Я. Застосування розрахунку за деформаційним методом при плануванні досліджень стиснуто-зігнутих елементів, підсилених залізобетонною обіймою. *Вісник Національного*

університету «Львівська політехніка». *Теорія і практика будівництва*. 2013. № 755. С. 198–204. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPTPB_2013_755_39 (дата звернення: 10.05.2020).

8. Башинская О. Ю., Барабаш М. С. Сравнительный анализ методов численного моделирования пластических деформаций бетона. *Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия : Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения*. 2016. Вып. 91. С. 32–39. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmit_2016_91_6 (дата звернення: 10.05.2020).

9. Барабаш М. С., Башинская О. Ю., Запотоchnый Р. М. Методика определения деформаций ползучести на примере мостовых конструкций. *Містобудування та територіальне планування*. 2016. Вып. 61. С. 147–154. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2016_61_22 (дата звернення: 10.05.2020).

10. Theiler M. Stabilität von Axial auf Druck beanspruchten Bauteilen aus Vollholz und Brettschichtholz : Doctoral Thesis. ETH-Zürich. 2014. 35 p. URL: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010273734> (дата звернення: 10.05.2020).

11. Гомон С. С. Критерій руйнування позацинтростиснутих та згинальних елементів з деревини з урахуванням пружнопластичної роботи матеріалу з обмеженою деформативністю. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. 2013. Вып. 25. С. 248–253. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmkbs_2013_25_37 (дата звернення: 10.05.2020).

12. Fragiaco M., Ceccotti A. Simplified approach for the long-term behaviour of timber-concrete composite beams according to the Eurocode 5 provisions. Florence, Italy: Meeting thirty-nine of the Working Commission W18-Timber Structures, CIB, International Council for Research and Innovation, 28–31 Aug 2006. Proceedings of the 39th Meeting of W018 on Timber Structures. 2006. Vol. 39-9-1. 484 p. URL: <http://hdl.handle.net/10092/18> (дата звернення: 10.05.2020).

REFERENCES

1. Savytskyi M.V., Shekhorkina S.Yev., Nikiforova T.D. and Shlyakhov K.V. *Bahatopoverkhove dereviane domobuduvannia: suchasni tendentsii ta maibutni perspektvyu* [Multi-storey timber buildings: current trends and future prospects]. *Stroytelstvo. Materialovedeniye. Mashynostroeniye. Seryia : Sozdaniye vysokotekhnolohycheskykh ekokompleksov v Ukrainy na osnove kontseptsyy sbalansirovannoho (ustoiichyvoho) razvytyia* [Constructions. Material science. Mechanical engineering. Series: Creating of hightech ecological complexes in Ukraine based on the concept of a balanced (sustainable) development]. 2017, vol. 99, pp. 153–159. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmcvtek_2017_99_23 (Accessed on: 10 May 2020). (in Russian).

2. Park H.S. Optimal compensation of differential column shortening in high-rise buildings. *The Structural Design of Tall and Special Buildings*. 2003, vol. 12 (1), pp. 49–66. URL: <https://doi.org/10.1002/tal.212> (Accessed on: 10 May 2020).

3. Yi T. and Tong X. Differential Column Shortening Effects in Typical Medium-to High-Rise Buildings. *New Horizons and Better Practices*. 2007, 178 p. URL: [https://doi.org/10.1061/40946\(248\)97](https://doi.org/10.1061/40946(248)97) (Accessed on: 10 May 2020).

4. Samarakkody D.I., Thambiratnam D.P., Chan T.H.T. and Moragaspiya P.H.N. Differential axial shortening and its effects in high rise buildings with composite concrete filled tube columns. *Construction and Building Materials*. 2017, vol. 143, pp. 659–672. URL: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.091> (Accessed on: 10 May 2020).

5. Voitsekhivskiy O.V., Baida D.M. and Sazonova I.R. *Vykorystannia dvoliniinykh diahram deformuvannia materialiv pry rozrakhunkakh zalizobetonnykh konstruksii za deformatsiynym metodom* [Application of two-line deformation diagrams of materials in the calculations of reinforced concrete structures by the deformation method]. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia* [Urban and spatial planning]. 2016, vol. 61, pp. 173–192. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2016_61_25 (Accessed on: 10 May 2020). (in Ukrainian).

6. Bambura A.M., Hurkivskiy O.B., Ametov Yu.H., Bezbozhna M.S., Dorohova O.V., Sazonova I.R. and Storozhenko L.I. *Nove v proektuvanni zalizobetonnykh ta stalezalizobetonnykh konstruksii* [New in the design of reinforced concrete and steel-reinforced concrete structures]. *Budivelni konstruksii* [Building structures]. 2013, vol. 78 (1), pp. 3–13. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/buko_2013_78%281%29_3 (Accessed on: 10 May 2020). (in Ukrainian).

7. Krainskyi P.I., Khmil R.Ye. and Blikharskyi Z.Ya. *Zastosuvannia rozrakhunku za deformatsiynym metodom pry planuvanni doslidzhen stysnuto-zihnutykh elementiv, pidsylennykh zalizobetonnoiu oboimoiu* [Application of the deformation method calculation when planning studies of compressed-bent elements reinforced with a reinforced concrete holder]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu "Lvivska politekhnika". Teoriia i praktyka budivnytstva* [Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series Theory and Building Practice]. 2013, no. 755, pp. 198–204. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPTPB_2013_755_39 (Accessed on: 10 May 2020). (in Ukrainian).

8. Bashynskaia O.Yu. and Barabash M.S. *Sravnitelnyi analiz metodov chyslennoho modelirovaniya plastycheskykh deformatsyi betona* [Comparative analysis of methods for numerical simulation of concrete plastic deformations]. *Stroytelstvo. Materialovedeniye. Mashynostroeniye. Seryia : Ynnovatsyonnye tekhnolohyy zhyznennoho tsykla obyektov zhylyshchno-hrazhdanskoho, promyshlennoho y transportnoho naznacheniya* [Constructions. Material science. Mechanical engineering. Series: The innovative lifecycle technology of housing and civil, industrial and transport objects]. 2016, vol. 91, pp. 32–39. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmit_2016_91_6 (Accessed on: 10 May 2020). (in Russian).

9. Barabash M.S., Bashynskaia O.Yu. and Zapotochnyi R.M. *Metodyka opredeleniya deformatsyi polzuchesty na pryemere mostovykh konstruksiy* [Methodology for the determination of creep strains using bridge structures as an example]. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia* [Urban and spatial planning]. 2016, vol. 61, pp. 147–154. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MTP_2016_61_22 (Accessed on: 10 May 2020). (in Russian).

10. Theiler M. Stabilität von Axial auf Druck beanspruchten Bauteilen aus Vollholz und Brettschichtholz : Doctoral

Thesis. ETH-Zürich. 2014, 35 p. URL: <https://doi.org/10.3929/ethz-a-010273734> (Accessed on: 10 May 2020).

11. Homon S.S. *Kryterii ruinuvannia pozatsentrovostysnutykh ta zghynalnykh elementiv z derevyny z urakhuvanniam pruzhnoplastychnoi roboty materialu z obmezhenoiu deformatyvniestiu* [Criterion of destruction of out-of-center compressed and bending timber elements taking into account elastic-plastic work of material with limited deformability]. *Resursoekonomni materialy, konstruksii, budivli ta sporudy* [Resource-saving materials, structures, buildings and structures]. 2013, vol. 25, pp. 248–253. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmkbs_2013_25_37 (Accessed on: 10 May 2020). (in Ukrainian).

12. Fragiaco M. and Ceccotti A. Simplified approach for the long-term behaviour of timber-concrete composite beams according to the Eurocode 5 provisions. Florence, Italy: Meeting thirty-nine of the Working Commission W18-Timber Structures, CIB, International Council for Research and Innovation, 28–31 Aug 2006. Proceedings of the 39th Meeting of W018 on Timber Structures. 2006, vol. 39-9-1, 484 p. URL: <http://hdl.handle.net/10092/18> (Accessed on: 10.05.2020).

Надійшла до редакції: 08.05.2020 р.