

УДК 624.02:004.94

DOI: 10.30838/J.BPSACEA.2312.070720.92.645

## НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ БУДІВЕЛЬ, ЩО ЗВОДЯТЬСЯ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ 3D-ДРУКУ

САВИЦЬКИЙ М. В.<sup>1</sup>, докт. техн. наук, проф.,  
ІВАНЦОВ С. В.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
НІКІФОРОВА Т. Д.<sup>3\*</sup>, докт. техн. наук, проф.,  
ЗІНКЕВИЧ О. Г.<sup>4</sup>, канд. техн. наук, доц.,  
ХАЛАФ І. З.<sup>5</sup>, аспір.

<sup>1</sup> Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: [sav15@ukr.net](mailto:sav15@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

<sup>2</sup> Кафедра матеріалознавства та обробки матеріалів, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: [lab120@mail.dp.ua](mailto:lab120@mail.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

<sup>3\*</sup> Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: [nikiforova.tatiana@pgasa.dp.ua](mailto:nikiforova.tatiana@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-0688-2759

<sup>4</sup> Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: [oksana.zinkevych@gmail.com](mailto:oksana.zinkevych@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-3425-8216

<sup>5</sup> Кафедра залізобетонних та кам'яних конструкцій, Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури», вул. Чернишевського, 24-а, 49600, Дніпро, Україна, e-mail: [ibrahim\\_zaydan@yahoo.co.uk](mailto:ibrahim_zaydan@yahoo.co.uk)

**Анотація. Постановка проблеми.** Результати проведених опитувань на тему забудови в найближчому майбутньому свідчать, що в Україні існують великі перспективи малоповерхового будівництва. Але малоповерхове будівництво може бути економічно виправдане там, де вартість земельної ділянки мінімальна, або за умови максимального скорочення термінів будівництва. Саме таким рішенням бачиться будівництво методом 3D-друку. У статті наведено приклади використання технології 3D-друку в різних галузях виробництва, а саме у будівництві; особливості 3D-принтерів та їх можливості; дослідження напружено-деформованого стану фрагмента зовнішньої несної стіни та двоповерхового житлового будинку, що зводяться за технологією 3D-друку. **Мета дослідження** – розроблення методу розрахунку огорожувальних конструкцій та малоповерхових житлових будинків у цілому, що зводяться за технологією 3D-друку. **Методика.** Дослідження напружено-деформованого стану будівельних конструкцій, що зводяться за технологією 3D-друку, проводилось за допомогою програмного комплексу «Ліра САПР 2013». **Результати.** На підставі проведених розрахунків фрагмента зовнішньої огорожувальної конструкції стіни та двоповерхового житлового будинку, що зводяться за технологією 3D-друку, виявлено місця, в яких виникають максимальні напруження та переміщення, а також встановлено, що вони не перевищують граничні допустимі значення. **Наукова новизна.** Вперше запропоновано основні положення розрахунку, проектування та технології монтажу конструкцій малоповерхових житлових будівель за технологією будівельного 3D-друку з урахуванням відсутності нормативно-правової бази на цей вид робіт. **Практична значимість.** Проведені дослідження дозволяють виготовляти окремі будівельні конструкції та зводити малоповерхові будівлі за технологією 3D-друку.

**Ключові слова:** 3D-друк; зовнішня огорожувальна конструкція стіни; малоповерхова житлова будівля; напружено-деформований стан

## НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЗДАНИЙ, ВОЗВОДИМЫХ ПО ТЕХНОЛОГИИ 3D-ПЕЧАТИ

САВИЦКИЙ Н. В.<sup>1</sup>, докт. техн. наук, проф.,  
ИВАНЦОВ С. В.<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доц.,

НИКИФОРОВА Т. Д.<sup>3\*</sup>, *докт. техн. наук, проф.*,  
ЗИНКЕВИЧ О. Г.<sup>4</sup>, *канд. техн. наук, доц.*,  
ХАЛАФ И. З.<sup>5</sup>, *аспир.*

<sup>1</sup> Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, e-mail: [sav15@ukr.net](mailto:sav15@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

<sup>2</sup> Кафедра материаловедения и обработки материалов, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, e-mail: [lab120@mail.dp.ua](mailto:lab120@mail.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

<sup>3\*</sup> Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, e-mail: [nikiforova.tatiana@pgasa.dp.ua](mailto:nikiforova.tatiana@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-0688-2759

<sup>4</sup> Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, e-mail: [oksana.zinkevych@gmail.com](mailto:oksana.zinkevych@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-3425-8216

<sup>5</sup> Кафедра железобетонных и каменных конструкций, Государственное высшее учебное заведение «Приднiпровская государственная академия строительства и архитектуры», ул. Чернышевского, 24-а, 49600, Днiпро, Украина, e-mail: [ibrahim\\_zaydan@yahoo.co.uk](mailto:ibrahim_zaydan@yahoo.co.uk)

**Аннотация. Постановка проблемы.** Результаты проведенных опросов на тему застройки в ближайшем будущем свидетельствуют, что в Украине существуют большие перспективы малоэтажного строительства. Но малоэтажное строительство может быть экономически оправдано там, где стоимость земельного участка минимальна, или при максимальном сокращении сроков строительства. Именно таким решением является строительство методом 3D-печати. В данной статье приведены примеры использования технологии 3D-печати в различных отраслях производства, а именно в строительстве; особенности 3D-принтеров и их возможности; исследования напряженно-деформированного состояния фрагмента наружной несущей стены и двухэтажного жилого дома, возводимые по технологии 3D-печати. **Цель исследования** – разработка метода расчета ограждающих конструкций и малоэтажных жилых домов в целом, возводимых по технологии 3D-печати. **Методика.** Исследования напряженно-деформированного состояния строительных конструкций, возводимых по технологии 3D-печати, выполнялись с помощью программного комплекса «Лира САПР 2013». **Результаты.** На основании проведенных расчетов фрагмента наружной ограждающей конструкции стены и двухэтажного жилого дома, которые возводятся по технологии 3D-печати; выявлены места, в которых возникают максимальные напряжения и перемещения, а также установлено, что они не превышают граничные допустимые значения. **Научная новизна.** Впервые предложены основные положения по расчету, проектированию и технологии монтажа конструкций малоэтажных жилых зданий по технологии строительной 3D-печати с учетом отсутствия нормативно-правовой базы на данный вид работ. **Практическая значимость.** Проведенные исследования позволяют изготавливать отдельные строительные конструкции и возводить малоэтажные здания по технологии 3D-печати.

**Ключевые слова:** 3D-печать; внешняя ограждающая конструкция стены; малоэтажный жилой дом; напряженно-деформированное состояние

## STRESSED-STRAIN STATE OF STRUCTURAL ELEMENTS OF BUILDINGS BY 3D-PRINTING TECHNOLOGY

SAVYTSKYI M.V.<sup>1</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
IVANTSOV S.V.<sup>2</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
NIKIFOROVA T.D.<sup>3\*</sup>, *Dr. Sc. (Tech.), Prof.*,  
ZINKEVYCH O.H.<sup>4</sup>, *Cand. Sc. (Tech.), Assoc. Prof.*,  
KHALAF I.Z.<sup>5</sup>, *Postgrad. Stud.*

<sup>1</sup> Department of Reinforced-Concrete and Masonry Structures, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, e-mail: [sav15@ukr.net](mailto:sav15@ukr.net), ORCID ID: 0000-0003-4515-2457

<sup>2</sup> Department of Materials Science and Materials Processing, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, e-mail: [lab120@mail.dp.ua](mailto:lab120@mail.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-8715-0778

<sup>3\*</sup> Department of Reinforced-Concrete and Masonry Structures, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, e-mail: [nikiforova.tatiana@pgasa.dp.ua](mailto:nikiforova.tatiana@pgasa.dp.ua), ORCID ID: 0000-0002-0688-2759

<sup>4</sup> Department of Reinforced-Concrete and Masonry Structures, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, e-mail: [oksana.zinkevych@gmail.com](mailto:oksana.zinkevych@gmail.com), ORCID ID: 0000-0002-3425-8216

<sup>5</sup> Department of Reinforced-Concrete and Masonry Structures, State Higher Education Institution “Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture”, 24-a, Chernyshevskoho Str., 49600, Dnipro, Ukraine, e-mail: [ibrahim\\_zaydan@yahoo.co.uk](mailto:ibrahim_zaydan@yahoo.co.uk)

**Abstract. Problem statement.** The results of surveys on development in the near future indicate that Ukraine has great prospects for low-rise construction. But low-rise construction can be economically justified when the cost of the land is minimal, or construction period is reduced to the maximum. Such a solution is construction using 3D-printing. This article provides examples of 3D-printing technology application in various industries, namely in construction; features of 3D-printers and their capabilities; investigations of the stress-strain state of an external load-bearing wall fragment and a two-storey residential building, constructed with 3D-printing technology. **Purpose.** Development of a method for calculating building envelopes and low-rise residential buildings in general, constructed with 3D-printing technology. **Methods.** Research of the stress-strain state of building structures produced by means of 3D-printing technology was carried out using “LIRA – CAD 2013” software package. **Results.** Based on the calculations of the external wall fragment and a two-storey residential building, produced by 3D-printing technology, places where maximum stresses and displacements occur were identified. It was also found out that they do not exceed boundary values. **Scientific novelty.** For the first time, the basic guidelines for the calculation, design and installation technology of structures of low-rise residential buildings using 3D-construction printing technology are proposed taking into account the absence of a regulatory framework for this type of work. **Practical value.** The studies conducted allow us to manufacture individual building structures and low-rise buildings using 3D-printing technology.

**Keywords:** 3D-printing; external wall envelope; low-rise residential building; stress-strain state

**Загальний стан питання дослідження.** Однією з найважливіших соціально-економічних проблем громадян України зокрема на сьогодні бачиться питання реформування житлово-комунального господарства. Вкрай необхідний розвиток житлового фонду з метою забезпечення різних прошарків населення доступним та ефективним житлом. Дані Державної служби статистики України щодо житлового фонду свідчать, що тенденція до забудови житловими одиницями збільшувалася з 1990 по 2013 рік, з 2014 року стався її різкий спад [1].

Вирішенням цих проблем може стати проведення житлової державної політики, яка базується на оновленні стандартів будівництва, запозиченні досвіду закордонних технологій, формуванні прозорої тарифної сітки, підвищенні ефективності інженерних систем, залученні інвесторів до процесу формування житлового фонду.

Дослідження на тему перспектив забудови у найближчому майбутньому повідомляють результати опитування експертів, а саме те, що в Україні існують великі перспективи малоповерхового

будівництва [2]. Причинами цього явища можуть бути висока швидкість будівництва та реалізації проектів, невелика кількість інвестицій для початку будівництва, архітектурна привабливість малоповерхових будинків. Але малоповерхове будівництво може бути економічно виправдане там, де вартість земельної ділянки мінімальна, або за максимального скорочення термінів будівництва. Саме таким рішенням постає будівництво методом Three-Dimensional Printing (3D-друку).

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Наприкінці вісімдесятих людство вперше почуло про 3D-друк – це складний процес, який базується на створенні об'єкта за його прототипом. У 1984 році була розроблена технологія друку фізичних об'єктів із цифрових даних, дуже схожа з технологією звичайних струминних принтерів [3].

Зараз технологія 3D-друку набула популярності і стрімко розвивається, займаючи усі ніші промисловості. 3D-друк знайшов справді велике коло галузей застосування. Ця технологія вже успішно застосовується у будівництві та архітектурі, у космічній та авіапромисловості,

машинобудуванні та електроніці, медицині, взуттєвій та текстильній промисловості, у виробництві зброї та військового приладдя, у харчовій промисловості, у виробництві ювелірних прикрас, у мистецтві, виробництві дрібних товарів повсякденного використання, і це ще не кінець [4–8].

Концепцію затишного автономного житла розробила українська компанія «PassivDom» [9]. Від моменту замовлення до в'їзду мешканців минає одна доба. Будинок повністю незалежний від ліній електропередач, газо- та водопроводу. Усім необхідним він забезпечує себе сам, за допомогою сонячної енергії.

На даному етапі розроблено пропозиції щодо підвищення теплозахисних властивостей об'єктів, які зводяться за технологією 3D-друку [10; 11].

**Мета дослідження** – розроблення методу розрахунку конструкцій малоповерхових житлових будинків за технологією 3D-друку. Завдання полягає в розрахунку запропонованої моделі конструкції методом 3D-друку будівельних конструкцій з урахуванням загальноновживаних методів розрахунку та норм проектування малоповерхового житла на території України.

Предмет дослідження – напружено-деформований стан конструктивних елементів будівель, що зводиться за технологією 3D-друку.

Об'єкт дослідження – малоповерховий житловий будинок, що зводиться за технологією 3D-друку.

**Виклад основного матеріалу.** Особливості будівельних 3D-принтерів створюють широкі можливості щодо формоутворення та конфігурації будівельних конструкцій, шляхом варіювання:

- товщини стін, плит перекриття, перемичок та інших конструктивних елементів;
- товщини, висоти, матеріалу друкованого шару бетону;
- багатокамерної структури та форм поперечного перерізу.

Будівельний 3D-принтер здатний формувати стіни майбутньої будівлі криволінійної форми, з гострими і тупими кутами, закругленнями і вигинами будь-якого радіуса, що значно розширює спектр архітектурних рішень.

Проектуючи будинки методом 3D-друку, слід передбачати планувальні рішення з рівномірним і симетричним розташуванням елементів відносно центральних осей. Небажано приймати асиметричні схеми, що допускають виникнення крутильних зусиль. Будинки рекомендується проектувати з поздовжніми і поперечними несними стінами. Стіни, що зводяться за допомогою будівельних 3D-принтерів, можуть бути зовнішніми і внутрішніми, несними, самонесними і ненесними, однокамерними та багатокамерними. Пропоновані конструктивні рішення несних стін для 3D-друку наведено на рисунку 1 [12].

Дослідження напружено-деформованого стану тонкостінних несних конструкцій за технологією 3D-друку проводилось на фрагменті зовнішньої несної стіни розміром  $300 \times 1\,200$  мм в плані, висотою один поверх (3 м) з одинарною перемичкою поміж зовнішніх шарів стіни за допомогою ПК «Ліра Сапр 2013 R5». Розрахункова модель фрагмента стіни зображена на рисунку 2.

Характеристики жорсткості елементів схеми: стіни – 4-кутова пластина  $h = 5$  см, тип – балка-стінка, початковий модуль пружності для бетону C20/25 природного твердіння –  $30 \times 106$  кН/м<sup>2</sup>, коефіцієнт Пуассона – 0,2; питома вага  $\rho = 21$  кН/м<sup>3</sup>, арматура A400C; плити – 3-кутова пластина  $h = 15$  см, тип – оболонка, початковий модуль пружності для бетону C20/25 природного твердіння –  $30 \times 106$  кН/м<sup>2</sup>, коефіцієнт Пуассона – 0,2; питома вага  $\rho = 21$  кН/м<sup>3</sup>, арматура A400C.

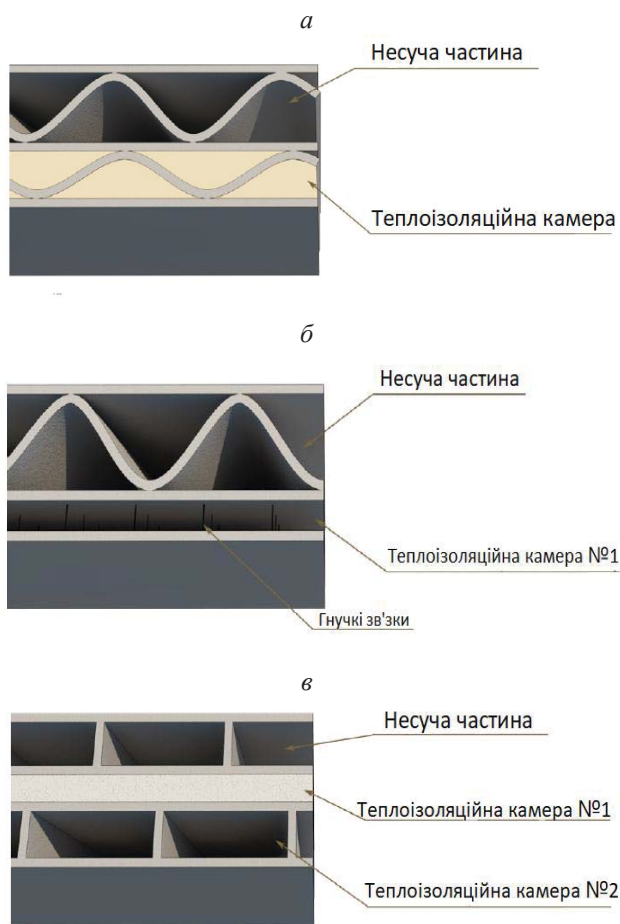


Рис. 1. Конструктивні рішення несних стін для 3D-друку: а) несна стіна з теплоізоляцією; б) несна стіна з повітряним включенням та гнучкими зв'язками; в) несна стіна з двома теплоізоляційними камерами

Для обчислення переміщень і зусиль (напружень) в елементах від стандартних і довільних лінійних комбінацій навантажень була застосована система РСН (розрахункові сполучення навантажень). Під стандартними лінійними комбінаціями маються на увазі комбінації, встановлені нормативними документами ДБН В.1.2-2: 2006. Залежно від вибору нормативу змінюється набір відповідних формул обчислення комбінацій у процесорі Ліра – САПР.

У результаті розрахунку фрагмента зовнішньої несної стіни отримано дані щодо лінійних переміщень (табл. 1), нормальних та дотичних зусиль (табл. 2) від найнесприятливішого розрахункового сполучення навантажень.

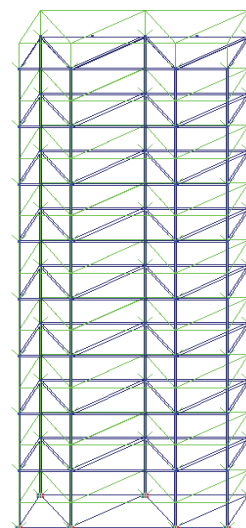


Рис. 2. Розрахункова модель фрагмента зовнішньої несної стіни

Таблиця 1

Величини максимальних лінійних переміщень вузлів фрагмента несної стіни, мм

Елемент, №	Ось X	Ось Y	Ось Z
15, 40	-0.010	-0.008	-0.015
38	0	-0.017	-0.016
43	0	-0.005	-0.035

Таблиця 2

Величини максимальних нормальних та дотичних зусиль фрагмента несної стіни, МПа

Елемент, №	$N_x$	$N_z$	$\tau_{xz}$
24,39	-0,046	-0,484	0,033

Проаналізувавши характер лінійних переміщень елементів схеми від найнесприятливішого сполучення навантажень, можна сказати, що найбільші переміщення виникають у вузлах, розташованих у площині внутрішньої зигзагоподібної перемички стіни. Граничні переміщення в горизонтальній площині для фрагмента стіни становлять  $f_u = h/150 = 3\,000/150 = 20$  мм ( $h$  – висота фрагменту стіни). Максимальне розрахункове горизонтальне переміщення вздовж осі Y  $f = 0,0171$  мм.

Дослідивши мозаїку зусиль від найнесприятливішого РСН, які виникають в елементах, можна зробити висновок, що найбільші дотичні зусилля виникають у верхньому поясі внутрішньої

зигзагоподібної перемички стіни. Від найнесприятливішого розрахункового сполучення навантажень по осі  $Z$  виникають нормальні напруження величиною 0,484 МПа, що значно менше за величину експериментально визначеної міцності бетону на стиск.

Проаналізувавши отримані дані щодо напружень та деформацій, можна зробити висновок, що фрагмент стінової конструкції задовольняє вимогам до міцності та стійкості.

Для проведення моделювання напружено-деформованого стану несних та огорожувальних конструкцій прийнято двоповерхову будівлю, що зводиться за технологією 3D-друку.

Стінові конструкції прийняті такими, що виготовляються методом 3D-друку, з конструктивною схемою, наведеною вище. Плити перекриття і покриття, балки, колони, перемички виконуються монолітними за традиційною технологією будівництва. Для моделювання конструктивних елементів будівлі прийнято такі параметри: стіни – 4-кутова пластина (зовнішні –  $h = 5$  см, внутрішні –  $h = 3$  см; плити – 3-кутова пластина  $h = 15$  см; балки – брус  $h = 15$  см,  $b = 30$  см; колони –  $h = 30$  см,  $b = 30$  см; перемички  $h = 18$  см,  $b = 30$  см та  $h = 18$  см,  $b = 17,5$  см. Характеристики бетону для 3D-друку прийняті згідно з отриманими результатами експериментальних досліджень.

Отримана тривимірна скінченно-елементна модель будівлі показана на рисунку 3.

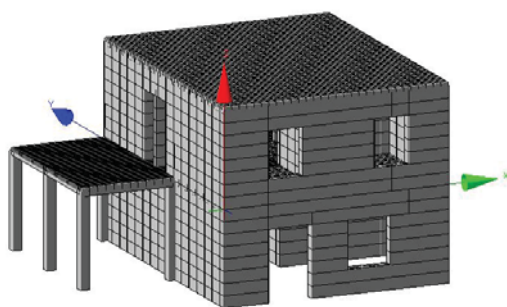


Рис. 3. Візуалізація тривимірної скінченноелементної моделі малоповерхової будівлі

Для розбивання областей на скінченні елементи були дотримані основні правила:

1) застосовувалися скінченні елементи правильної форми – прямокутні, трикутні;

2) розміри сторін скінченних елементів дорівнюють  $1/8 \dots 1/30$  розмірів областей, що розбиваються (з метою отримання більшої інженерної точності);

3) для моделювання взаємодії балок із плитою перекриття стрижні, що моделюють балки, розбиті на окремі елементи з таким самим кроком, що і плита.

Сітка скінченних елементів усієї будівлі показана на рисунку 4.

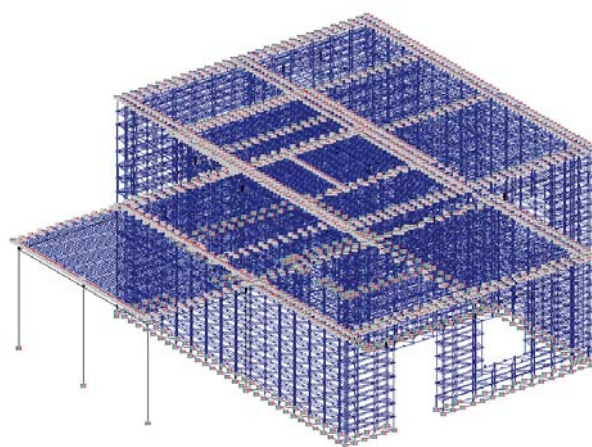


Рис. 4. Сітка скінченних елементів моделі будівлі

Навантаження на конструкції будівлі визначалися відповідно до вимог ДБН В.1.2-2:2006 «Навантаження та впливи» як для житлових будинків.

У результаті статичного розрахунку отримано величини переміщень та зусилля в елементах будівлі. Величини максимальних лінійних переміщень вузлів від найнесприятливішого РСН наведені в таблиці 3, нормальних та дотичних зусиль – у таблиці 4.

Таблиця 3

Величини максимальних лінійних переміщень вузлів моделі малоповерхової будівлі, мм

Елемент, №	Ось X	Ось Y	Ось Z
8355	0,588	0	0
754	0,082	-0,144	-0,121
6122,6148	0	0	-0,221

Таблиця 4

**Величини нормальних та дотичних зусиль в елементах моделі малоповерхової будівлі, МПа**

Елемент, №	$N_x$	$N_z$	$\tau_{xz}$
6221	0.175	0.025	0.043
1818	-0.011	-0.218	-0.070
1820	-0.155	-0.212	-0.171

Проаналізувавши характер лінійних переміщень елементів схеми від розрахункового сполучення навантажень, можна зробити висновок, що найбільші переміщення виникають у вузлах, розташованих у площині плит перекриття та покриття.

Гранично допустима величина горизонтальних переміщень складає  $f_u = h/500 = 6\,000/500 = 12$  мм ( $h$  – висота від верху фундаменту до покриття). Максимальне розрахункове значення переміщень 0,588 мм в будівлі виникло вздовж осі  $U$ .

Гранично допустима величина вертикальних переміщень складає  $f_u = l/200 = 5\,400/200 = 27$  мм ( $l$  – довжина елемента перекриття між опорами). Максимальний горизонтальний прогин за результатами розрахунку склав 0,221 мм.

Проаналізувавши мозаїку зусиль від найнесприятливішого розрахункового сполучення навантажень, які виникають в елементах, можна зробити висновок, що найбільші нормальні та дотичні зусилля виникають у верхніх та нижніх поясах внутрішньої зигзагоподібної перемички внутрішніх несних стін. Максимальна величина нормальних напружень становить 0,218 МПа, що значно менше за величину експериментально визначеної міцності бетону на стиск.

Таким чином, згідно з отриманими результатами прийняте конструктивне рішення будівлі за технологією 3D-друку відповідає вимогам щодо несної здатності та експлуатаційної придатності.

Характер деформування елементів будівлі свідчить про те, що за впливу дотичних напружень стінка перекошується: по укорочених діагоналях вона стискається, а по подовжених – витягується. Відбувається спучування стінки, утворення

хвиль. Перешкоджати цьому явищу можна за допомогою установки по вертикалі ребер жорсткості або спеціальних закладних деталей, які будуть стягувати зовнішні шари стін між собою.

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** На основі проведеного аналізу виявлено конструктивні особливості та технологічні вимоги до елементів будівельних конструкцій, будівель та споруд, що зводяться методом 3D-друку. Запропоновано основні положення розрахунку, проектування та технології монтажу конструкцій житлових будівель методом будівельного 3D-друку з урахуванням відсутності нормативно-правової бази на цей вид робіт.

Для аналізу напружено-деформованого стану конструкцій будівель методом 3D-друку у програмному комплексі «Ліра САПР 2013» виконано моделювання напружено-деформованого стану фрагмента стінової конструкції (несної зовнішньої стіни висотою 3 м) та двоповерхового житлового будинку на навантаження згідно з чинними нормативними документами.

Проаналізувавши мозаїку зусиль від найнесприятливішого РСН, які виникають в елементах моделі фрагмента стіни та двоповерхової будівлі, можна зробити такі висновки: найбільші зусилля виникають у верхньому поясі внутрішньої зигзагоподібної перемички фрагменту стіни, а також у верхніх та нижніх поясах внутрішньої зигзагоподібної перемички внутрішніх несних стін будівлі.

Максимальна величина нормальних напружень у несних стінах будівлі становить 0,218 МПа, що значно менше за величину експериментально визначеної міцності бетону на стиск. Максимальне розрахункове значення переміщень 0,588 мм у будівлі виникло вздовж осі  $U$ , що не перевищує гранично допустиму величину  $f_u = 12$  мм. Таким чином, згідно з отриманими результатами прийняте конструктивне рішення будівлі за технологією 3D-друку відповідає вимогам щодо несної здатності та експлуатаційної придатності.

Мету подальших досліджень складає технологією 3D-друку, які дозволять розроблення нових інноваційних зменшити витрати на конструктивні конструктивних рішень мало- та матеріали та зведення самих будинків. багатопверхових будинків, що зводяться за

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Державна служба статистики України [Електронний ресурс]. Держстат України, 2018. URL : [www.ukrstat.gov.ua](http://www.ukrstat.gov.ua)
2. Ковальчук В. Украинцам надоели высоты [Електронний ресурс]. ABC News Ukraine. 2014. URL : [www.abcnews.com.ua/ru/markets/ukrainsam-nadoieli-vysotki](http://www.abcnews.com.ua/ru/markets/ukrainsam-nadoieli-vysotki)
3. Базовые основы 3D-печати [Електронний ресурс]. «Смарт-Принт». Все о 3D-принтерах и 3D-печати в Украине и в мире. 2016. URL: [www.xn--3-htbdlzkhdq6g.com.ua/blog](http://www.xn--3-htbdlzkhdq6g.com.ua/blog)
4. Новые достижения 3D-печати в аэрокосмонавтике [Електронний ресурс]. MAKE-3D.RU. 2018. URL : [www.make-3d.ru/news/novye-dostizheniya-3d-pechati-v-aerokosmonavtike](http://www.make-3d.ru/news/novye-dostizheniya-3d-pechati-v-aerokosmonavtike)
5. Лесовик В. С., Чернишева Н. В., Глаголев Е. С. та ін. 3D-технології у сфері будівництва. *Розумні конструкційні композиції для зеленого будівництва*. 2016. С. 157–167.
6. Wheatstone R. World's first 3D printed house is completed after just 45 DAYS in revolution for home building [Електронний ресурс]. World news. 2016. Режим доступу до ресурсу: <https://www.mirror.co.uk/news/world-news/worlds-first-3d-printed-house-8297190>
7. Ватин Н. И., Чумадова Л. И., Гончаров И. С. и др. 3D-печать в строительстве. Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. С. 27–46.
8. 3D-строительство [Електронний ресурс]. 3Dpulse.ru. 2014. URL : <http://www.3dpulse.ru/news/stroitelstvo/>
9. Autonomous Off-the-grid 3D-printed Smart House Your next level of freedom! [Електронний ресурс]. PassivDom. 2018. URL : <https://passivdom.com/>
10. Савицький М. В., Шатов С. В., Ожищенко О. А. 3D-друк будівельних об'єктів. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*. Вип. 3 (216). 2016. С. 18–26.
11. Шатов С. В., Савицький Н. В., Карпушин С. А. Обобщение инновационных технологий 3D-печати строительных объектов. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Серия : Создание высокотехнологических экокомплексов в Украине на основе концепции сбалансированного (устойчивого) развития*. 2017. Вып. 99. С. 194–200.
12. В чём уникальность 3D-принтера APIS COR [Електронний ресурс]. Construction 3D printing. 2016. URL : <http://apis-cor.com/3d-printer>

### REFERENCES

1. *Derzhavna sluzhba statistiki Ukrayini* [State Statistics Service of Ukraine] [Electronic resource]. State Statistics Service of Ukraine, 2018. (in Ukrainian).
2. Koval'chuk V. *Ukrainczam nadoeli vy'sotki* [Ukrainians are tired of high-rises]. [Electronic resource]. *ABC News Ukraine* [ABC News Ukraine]. 2014. (in Russian).
3. *Bazovy'e osnovy` 3D pechati* [Basic basics of 3D printing]. [Electronic resource]. «Smart-Print» *Vse o 3D printerakh i 3D pechati v Ukraine i v mire* ["Smart Print" All about 3D printers and 3D printing in Ukraine and in the world]. 2016. (in Russian).
4. *Novy'e dostizheniya 3D-pechati v ae`rokosmonavtike* [New advances in 3D printing in aerospace]. [Electronic resource]. MAKE-3D.RU, 2018. (in Russian).
5. Lesovik V.S, Chernisheva N.V., Glagolyev E.S. and oth. *D-tekhnologiyi u sferi` budi`vnicztva* [3D-technologies in the field of construction]. *Rozumni` konstrukczijni` kompoziczii` dlya zelenogo budi`vnicztva* [Smart construction compositions for green building]. [Electronic resource]. 2016, pp. 157–167. (in Ukrainian).
6. Wheatstone R. World's first 3D printed house is completed after just 45 DAYS in revolution for home building World news. 2016.
7. Vatin N.I., Chumadova L.I., Goncharov I.S. and oth. *3D-pechat` v stroitel`stve* [3D printing in construction]. *Stroitel`stvo unikal`ny`kh zdaniy i sooruzhenij* [Construction of Unique Buildings and Structures]. 2017, pp. 27–46. (in Russian).
8. *3D-stroitel`stvo* [3D-construction]. [Electronic resource]. 3Dpulse.ru. 2014. (in Russian).
9. Autonomous Off-the-grid 3D-printed Smart House Your next level of freedom! [Elektronnij resurs]. PassivDom, 2018.
10. Savicz`kij M.V., Shatov S.V. and Ozhishchenko O.A. *3D-druk budi`vel`nikh ob`yektiv`* [3D-printing of construction objects]. *Vi`snik Pridni`prov`s`koyi derzhavnoyi akademi`yi budi`vnicztva ta arkhi`tekturi* [Bulletin of Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture]. 2016, vol. 3 (216), pp. 18–26. (in Ukrainian).
11. Shatov S.V., Savicz`kij N.V. and Karpushin S.A. *Obobshhenie innovaczionny`kh tekhnologij 3D-pechati stroitel`ny`kh ob`ektov* [Generalization of innovative technologies for 3D printing of construction projects].

*Stroitel'stvo, materialovedenie, mashinostroenie. Seriya : Sozdanie vy'sokotekhnologicheskikh e'kokompleksov v Ukraine na osnove koncepczii sbalansirovannogo (ustojchivogo) razvitiya* [Construction, Materials Science, Mechanical Engineering. Series : Creating high-tech eco-complexes in Ukraine based on the concept of balanced (sustainable) development]. 2017, vol. 99, pp. 194–200. (in Russian).

12. *V chyom unikal'nost' 3D-printera APIS COR* [What is the uniqueness of the 3D-printer APIS COR]. [Electronic resource]. Construction 3D printing. 2016. (in Russian).

Надійшла до редакції: 06.05.2020 р.