

УДК 532.5.031:004.942

С. О. ДОВГИЙ, О. М. БУЛАНЧУК, Г. Г. БУЛАНЧУК**КОМП'ЮТЕРНА ПРОГРАМА ПО МОДЕЛЮВАННЮ АЕРОДИНАМІКИ МІСЬКИХ РАЙОНІВ
МЕТОДОМ ДИСКРЕТНИХ ВИХОРИВ**

Розглядається інтерактивна комп'ютерна програма для моделювання аеродинаміки міських районів, розроблена на базі методу дискретних вихорів. Вона дозволяє швидко провести розрахунки аераційної ситуації в житловому районі для плоского або просторового випадку. Користувач може задати різний напрямок вітру, джерела забруднення, різну конфігурацію забудови та розміщення паркових зон. Програма дозволяє досліджувати рух вихорів, поле швидкостей, зони комфортності та розповсюдження домішок. Може бути використана для пошуку оптимальної конфігурації забудови.

Ключові слова: інтерактивна комп'ютерна програма, метод дискретних вихорів, моделювання аерації житлових районів, моделювання паркових зон, розповсюдження домішок, зони комфортності.

С. А. ДОВГИЙ, О. Н. БУЛАНЧУК, Г. Г. БУЛАНЧУК**КОМПЬЮТЕРНАЯ ПРОГРАММА ПО МОДЕЛИРОВАНИЮ АЭРОДИНАМИКИ ГОРОДСКИХ
РАЙОНОВ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ВИХРЕЙ**

Рассматривается интерактивная компьютерная программа для моделирования аэродинамики городских районов, разработанная на базе метода дискретных вихрей. Она позволяет быстро провести расчеты аэрационной ситуации в жилом районе для плоского или пространственного случая. Пользователь может задать различное направление ветра, источники загрязнения, различную конфигурацию застройки и размещения парковых зон. Программа позволяет исследовать движение вихрей, поле скоростей, зоны комфортности и распространение примесей. Может быть использована для поиска оптимальной конфигурации застройки.

Ключевые слова: интерактивная компьютерная программа, метод дискретных вихрей, моделирование аэрации жилых районов, моделирование парковых зон, распространение примесей, зоны комфортности.

S. O. DOVGIY, O. M. BULANCHUK, G. G. BULANCHUK**COMPUTER PROGRAM FOR SIMULATION OF URBAN AREAS AERODYNAMICS BY DISCRETE
VORTICES METHOD**

The article describes an interactive computer program for simulation of urban areas aerodynamics by using the discrete vortices method. When calculating flow past buildings dynamic arrays of structures were created and each structure stored information about control points and connected vortices, namely their coordinates and intensity. To simulate free vortices, a dynamic three-dimensional array of structures was created, where information about the vortex sheets was stored. This program enables us to quickly calculate aeration situations in a residential area for two or three-dimensional cases. The user can specify various wind directions, pollution sources, various configurations of the building, and locations of parklands. The program allows us to study the motion of vortices, the velocity field, the comfort zone, and spreading of pollutants. It can be used for searching for optimal configurations of urban development.

Key words: interactive computer program, discrete vortices method, simulation of urban areas aeration, simulation of park areas, distribution of impurities, comfort zone.

Вступ. На сьогодні відбувається суттєве збільшення міських територій при обмежених площах, придатних для будівництва. Це змушує вдосконалювати системи управління такими територіями. При цьому необхідно забезпечити, щоб умови проживання населення принаймні не погіршувались. Це підвищує вимоги до технологій оптимальної забудови територій. Такі технології можуть бути розроблені на базі сучасного комп'ютерного моделювання процесів, що відбуваються в міських районах. Роботи по дослідженню екосистеми міста базуються переважно на моделюванні за допомогою прикладних пакетів, таких як *ANSYS*, *Xflow*, *COMSOL* [1, 2]. Такі пакети дають досить детальну картину течії, але їх важко використовувати для швидкого пошуку оптимальної конфігурації забудови і, крім того, вони ще досить складні для користувача. Тому актуальним є створення простого спеціалізованого програмного продукту, що дозволяє швидко провести дослідження і визначити оптимальний вибір місця будівництва, розміщення і форми будинків, розташування паркових зон та спрогнозувати місця накопичення шкідливих викидів. Для моделювання вітрової ситуації в міському районі добре зарекомендував себе метод дискретних вихорів [3 – 7], який базується на моделі ідеальної рідини і дає можливість швидкого перебору різних варіантів забудови. У даній роботі пропонується інтерактивна комп'ютерна програма «Комфортне місто» по моделюванню аеродинаміки міських районів, розроблена на базі методу дискретних вихорів. Вона дає можливість оперативно оцінити вітрову ситуацію, визначити зони комфортності і дискомфорту, провести пошукові розрахунки для знаходження оптимального розміщення будинків та паркових зон. Програма реалізує моделювання як для плоского, так і для просторового випадку. Код створено на мові програмування *Fortran 90*.

Обчислювальні алгоритми програми «Комфортне місто». Розрахункові алгоритми, закладені в роботу програми, базуються на методі дискретних вихорів. Застосування даного методу до моделювання аеродинаміки міського району описане, наприклад, у роботах [3, 6]. При обтіканні системи будинків використовувалась така модель даних. Створювались динамічні масиви структур і кожна структура зберігала координати вершин будинку. Кожному будинку в цьому масиві відповідав певний індекс. Окрім цього, для кожного будинку задавались тривимірні масиви даних, що зберігали інформацію про контрольні точки та приєднані вихори: їх координати та інтенсивність. Індексом цих масивів були: номер будинку, номер ребра і номер точки на ребрі.

© С. О. Довгий, О. М. Буланчук, Г. Г. Буланчук, 2019

Для моделювання вільних вихорів створювався динамічний тривимірний масив структур, де зберігалась інформація про вихрову пелену. Цей масив зберігав координати вільних вихорів та їх інтенсивності. Масив таких структур зберігав інформацію для усієї системи вільних вихорів, яка генерувалась об'єктом. Будинки моделювалися багатокутниками (полігонами). Швидкість системи вихорів розраховувалась як сума швидкостей від кожної пелени. Точки відриву для кожного будинку визначалися автоматично з урахуванням напрямку обходу контуру та умов опуклості чи не опуклості багатокутника та відповідного кута на цьому багатокутнику. Якщо по напрямку обходу в даній вершині полігону векторний добуток мав певний знак, то там задавалась точка відриву, якщо протилежний, то точка відриву була відсутня. Процес дискретизації по часу зумовлює можливість потрапляння вихору всередину полігону (будинку). Для визначення потрапляння вихору всередину будинку проводилась триангуляція кожного будинку так званим *методом відсікання вух* [8] і створювалися структури даних із номерами вершин, що утворювали трикутники. Далі шляхом перебору трикутників визначалось потрапляння точки в один із трикутників (алгоритм потрапляння точки в опуклий полігон). Щоб не перебирати всі вихори і всі будинки, для кожного будинку вводилась область у вигляді більшого полігону і аналізувались лише вихори, що знаходились у даній області. При перетині відрізком полігону робився перерахунок траєкторії вихору за методом дзеркального відбиття. Для розв'язування системи лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) використовувались дві підпрограми – *DECOMP* та *SOLVE*, які реалізують *метод Гауса* для розв'язування СЛАР із частковим вибором ведучого елемента [9]. Для тривимірного випадку дана схема була розширена аналогічним чином.

Графічний інтерфейс програми для двовимірного випадку. При запуску програми відображається головне меню програми, панель інструментів та система 2D-координат. Основні параметри розрахункової частини програми (крок по простору, крок по часу, максимальний час розрахунку, кут між напрямком вітру та віссю OX) користувач може задати інтерактивно за допомогою пункту меню: *Розрахунок, Зміна параметрів задачі* (рис. 1). Напрямок вітру (стрілка) може також повертатись користувачем за допомогою миші. Слід відмітити, що в даному моделюванні напрямок вітру приймається однаковим для всього поля і не змінюється з часом. Змоделювати новий будинок ми можемо за допомогою панелі інструментів і миші або за допомогою кнопки меню: *Задати геометрію*. Зміна положення і розмірів будинку, а також його видалення проводиться за допомогою миші. При наведенні миші на будинок, він стає *активним*, тобто готовим до перетворення. При цьому в кутах будинку з'являються кружечки, за допомогою яких будинок повертається, а на сторонах будинку – квадрати, за допомогою яких будинок розтягується або стискається. Передбачена можливість перемістити будинок у нове положення. Не рекомендується робити будинок занадто тонким, оскільки, в силу особливостей чисельного алгоритму програма видасть помилку. Можна також деформувати будинок, для цього треба відключити пункт меню: *Обертання будинку*. Після цього будинок не може обертатись, а деформацію можна реалізувати за допомогою миші, навівши її на кут будинку, розтягнути або стиснути будинок у певному напрямку.

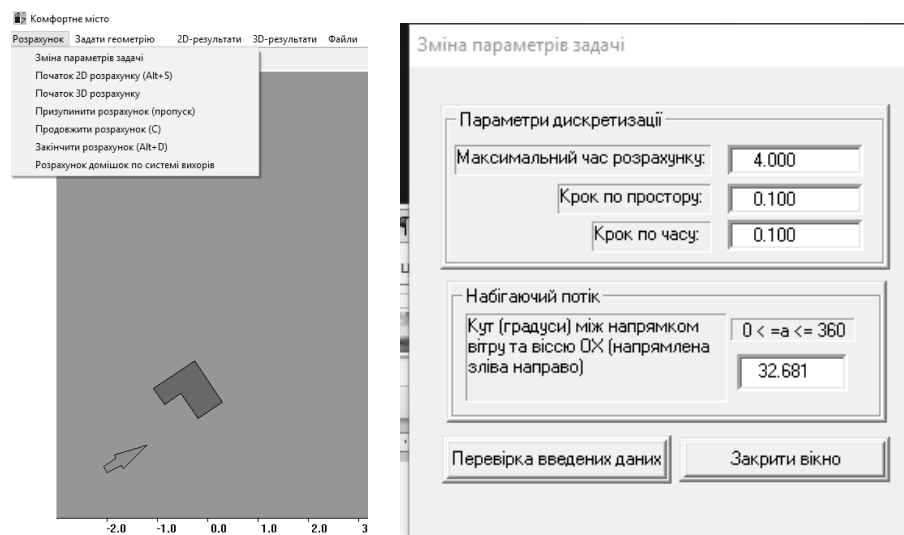


Рис. 1 – Задання параметрів розрахунку.

Джерело забруднення може бути задане за допомогою головного меню або панелі інструментів. Програма передбачає можливість збільшити його, навівши мишку на границю області круга і розтягнувши її. Можна задати декілька джерел аналогічним чином. Вони зафарбовуються в різний колір (рис. 2). Передбачена можливість задати властивості викиду за допомогою правої кнопки миші. За допомогою додаткового меню, що з'явиться (рис. 2), можна вибрати тип викиду (одноразовий чи неперервний), початок викиду, кінець викиду, висоту викиду (для просторового випадку), форму хмари (круг, квадрат, точка), кількість частинок уздовж кожного напрямку.

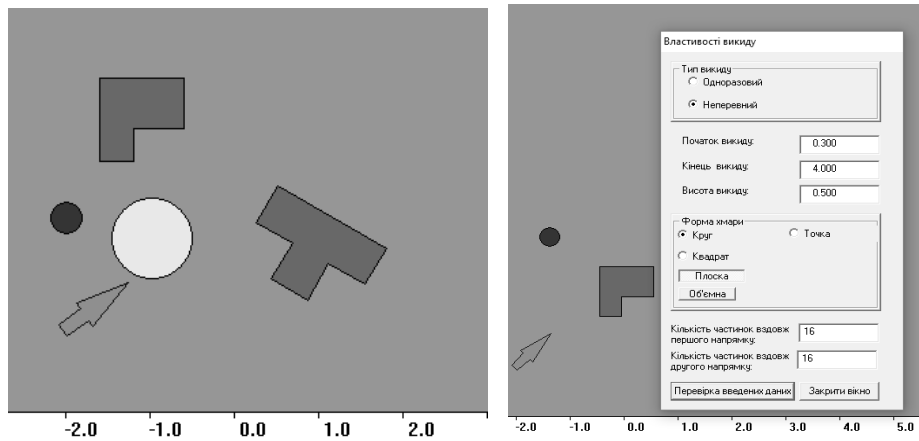


Рис. 2 – Графічний інтерфейс для моделювання джерел забруднення.

Дана програма дозволяє моделювати вплив на вітрову ситуацію паркових зон. Деревя моделюються наближено за допомогою шестикутників. З кожного кута відбувається відрив вихорів. Реалізується дане моделювання за допомогою пункту меню: *Посадити дерево* (рис. 3).

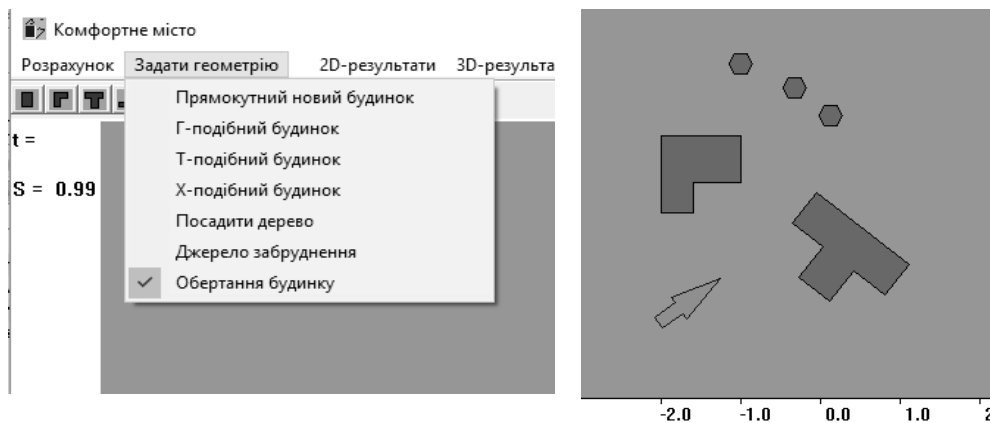


Рис. 3 – Графічний інтерфейс для моделювання паркових зон.

Відображення результатів моделювання для плоского випадку. Відображення результатів розрахунку для плоского випадку (*Поле швидкостей*, *Рух вихорів*, *Діаграма швидкості*, *Аераційні зони*, *Діаграма тиску*, *Розподіл тиску* (на будинку), *Графік коефіцієнта нормальної сили*) встановлюється за допомогою пункту меню *2D-результати* (рис. 4). Наприклад, на рис. 4 представлено поле швидкостей і картина вихорів, які будуть відображені при виборі двох пунктів меню: *Поле швидкостей* і *Рух вихорів*.

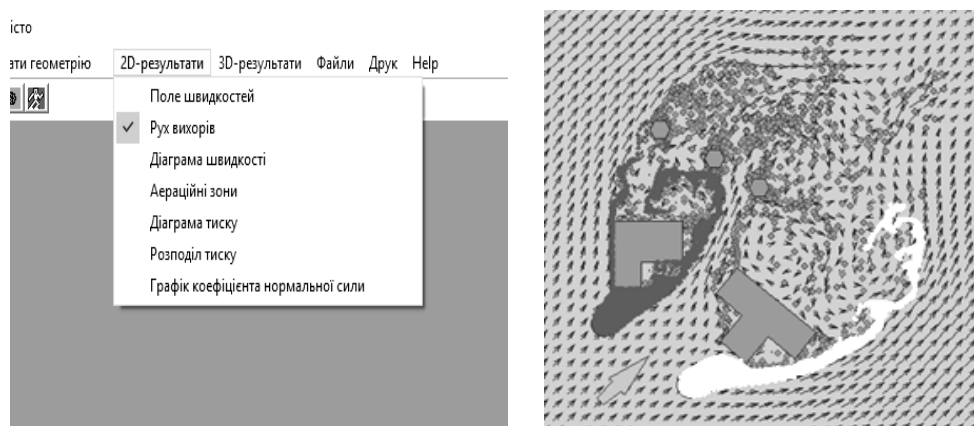


Рис. 4 – Відображення результатів для плоского випадку.

На рис. 5 зображено приклад розрахунку аераційних зон (зона застою, зона комфорту, зона прискорення і зона дискомфорту) та діаграма швидкості біля двох будинків.

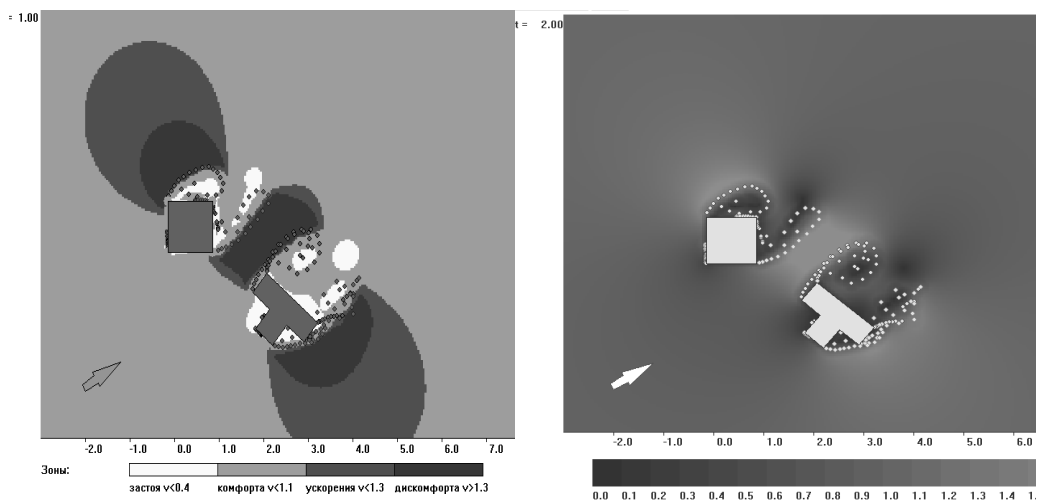


Рис. 5 – Аераційні зони та діаграма швидкості біля двох будинків.

Графічний інтерфейс для просторового випадку. Перед запуском 3D-розрахунку можна задати просторовий вигляд конфігурації будинків за допомогою пункту головного меню: *3D-результати*, *3D Вигляд*. При цьому за допомогою миші можна налаштувати зображення так, щоб зручно було аналізувати результати: збільшити або зменшити (за допомогою коліщата миші, повернути (права кнопка миші)).

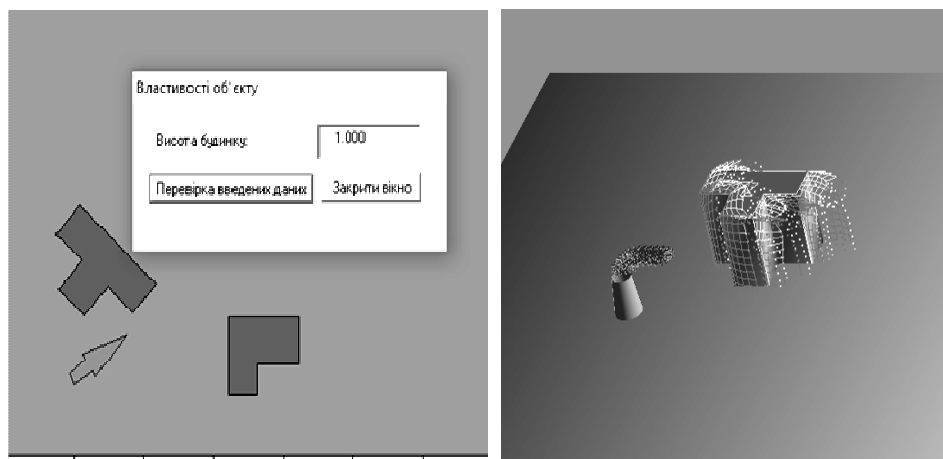


Рис. 6 – Просторовий вигляд конфігурації будинків і зміна висоти будинку.

Пункт меню *Початок 3D розрахунку* запускає програму розрахунку для просторового випадку. Якщо на екрані був 2D-вигляд, то з'явиться 3D-вигляд конфігурації будинків і будуть відображатися результати розрахунку: вихрові пелени і рух домішок (рис. 6). За замовчуванням висоти будинків дорівнюють одиниці. Змінити висоту конкретного будинку можна за допомогою правої кнопки миші в 2D-вигляді перед початком розрахунку. З'являється додаткове меню, за допомогою якого можна задати висоту будинку (рис. 6).

У пункті меню *Параметри зображення* можна вибрати результати, які будуть відображатись: *Дахи будинків*, *Пелени* і *Домішки*. Зауважимо, що опція з можливістю не відображати дахи будинків була передбачена тому, що в окремих випадках це допомагає краще побачити структуру пелени. Рух пелени автоматично записується у файл, який потім може бути відтворений по закінченню розрахунків. Запис у файл координат пелени і координат частинок відбувається за допомогою пунктів меню: *3D-результати*, *Вибрати файл пелени* і *Вибрати файл частинок*. Повернутись до 2D-вигляду можна, знявши мітку в пункті меню *3D-вигляд*. Після проведення розрахунків рух пелени або рух частинок може бути відтворений за допомогою пункту меню: *Рух пелени із файлу* або *Рух частинок із файлу*.

Поле швидкостей для просторового випадку можна проаналізувати в горизонтальних або вертикальних перерізах. Для цього в пункті меню *3D-результати* вибрати *Поле швидкостей*, *Горизонтальне (Вертикальне)*. Переріз, у якому відображається поле швидкостей, змінюється за допомогою коліщата миші. На рис. 7 показано

приклад розрахунку горизонтального та вертикального поля швидкостей та картини розповсюдження домішок біля будинку. Параметри викиду задаються за допомогою правої кнопки миші аналогічно плоскому випадку, але з можливістю задати висоту викиду (висоту труби на рис. 7).

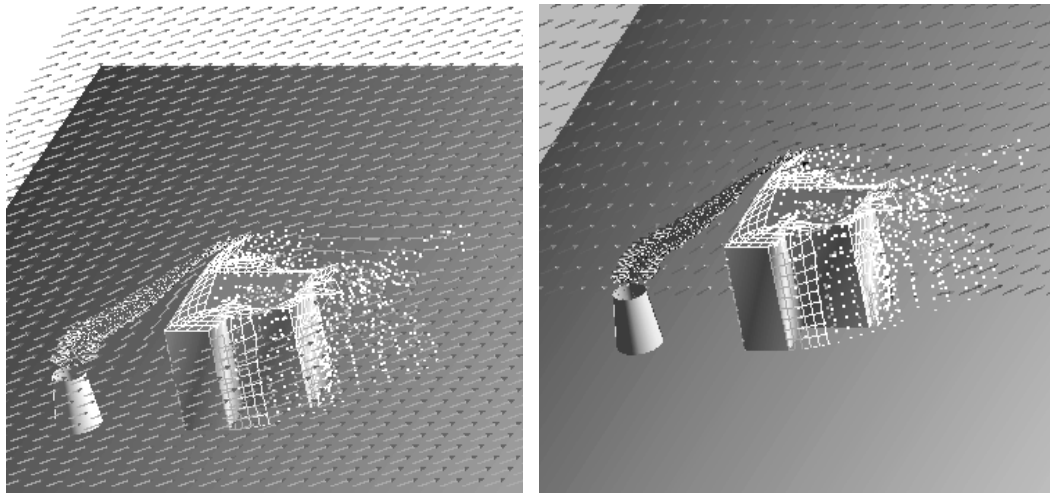


Рис. 7 – Картина розповсюдження домішок та поле швидкостей біля Г-подібного будинку: а – у горизонтальному перерізі; б – у вертикальному перерізі.

Висновки. Розроблена спеціалізована інтерактивна комп'ютерна програма, що дозволяє швидко проводити моделювання аеродинаміки міських районів, робити пошукові розрахунки для оптимального розміщення будинків і їх форми, місць найкращого розташування паркових зон. Дозволяє досліджувати зміну екологічної ситуації та умов комфортності при плануванні нових забудов та модернізації старих. Може бути використана в проєктній практиці для швидкого перебору різних варіантів забудови і розміщення паркових зон. Наприклад, за результатами такого моделювання можна запропонувати варіанти розміщення зон відпочинку, дитячих площадок тощо.

Список літератури

1. Ширококов В. В. Xflow – новий програмний комплекс для моделювання фізичних процесів, зв'язаних з гідрогазодинамікою і тепломасообміном // CADmaster. Машиностроение. – № 5 (60). – 2011. – С. 64 – 67.
2. Вальгер С. А., Федоров А. В., Федорова Н. Н. Моделирование несжимаемых турбулентных течений в окрестности плохообтекаемых тел с использованием ПК ANSYS Fluent // Вычислительные технологии. – 2013. – Т. 18. – № 5. – С. 27 – 40.
3. Гутников В. А., Кирякин В. Ю., Лифанов И. К., Сетуха А. В. Математическое моделирование аэродинамики городской застройки. – М. : Пасья, 2002. – 244 с.
4. Лифанов И. К. Рекомендации по оценке аэрации территории в жилой застройке. – Москва : МАКС Пресс, 2006. – 160 с.
5. Довгий С. О., Буланчук Г. Г. Математичне моделювання аеродинаміки міських забудов // Вісник Сумського державного університету. – 2003. – № 12 (58). – С. 72 – 76.
6. Довгий С. О., Буланчук Г. Г., Буланчук О. М. Вихрові течії ідеальної рідини. Класичні моделі та метод дискретних вихорів.– Київ : Інститут обдарованої дитини, 2016. – 341 с.
7. Головенко А. Д., Довгий С. А., Клименкова И. А., Черный Д. И. Моделирование аэродинамики полей при прогнозировании нестационарных процессов в массивах разновысотной застройки // Вісник Харківського національного університету. – 2010. – № 890. – С. 37 – 46.
8. ElGindy H., Everett H., Toussaint G. T. Slicing an ear using prune-and-search. Pattern Recognition Letters. – 1993. – 14 (9). – P. 719 – 722. doi:10.1016/0167-8655(93)90141-y.
9. Форсайт Дж., Малькольм М., Моурер К. Машинные методы математических вычислений. – М. : Мир, 1980. – 280с.

References (transliterated)

1. Shirobokov V. V. Xflow – novyy programnyy kompleks dlya modelirovaniya fizicheskikh protsessov, svyazannykh s gidrogazodinamikoy i teplomassoobmenom [Xflow– a new software package for modeling physical processes related to fluid dynamics and heat and mass transfer]. CAD-master. Mashinostroenie [CADmaster. Mechanical engineering]. 2011, № 5 (60), pp. 64–67.
2. Val'ger S. A., Fedorov A. V., Fedorova N. N. Modelirovanie neszhimaemykh turbulentykh techeniy v okrestnosti plokhooobtekaemykh tel s ispol'zovaniem ПК ANSYS Fluent [Simulation of Incompressible Turbulent Flows in the Neighborhood of Poorly Streaming Bodies Using ANSYS Fluent]. Vychislitel'nye tekhnologii [Computational Technologies]. 2013, vol. 18, no. 5, pp. 27–40.
3. Gutnikov V. A., Kiryakin V. Yu., Lifanov I. K., Setukha A. V. Matematicheskoe modelirovanie aerodinamiki gorodskoy zastroyki [Mathematical modeling of urban aerodynamics]. Moscow, Pas'va Publ., 2002. 244 p.
4. Lifanov I. K. Rekomendatsii po otsenke aeratsii territorii v zhiloy zastroyke [Recommendations for assessing aeration of residential territory]. Moscow, MAKS Press Publ., 2006. 160 p.
5. Dovgiiy S. O., Bulanchuk G. G. Matematychno modelyuvannya aeyrodynamiky mis'kykh zabudov [Mathematical Modeling of Aerodynamics of City Building]. Visnyk Sums'kogo derzhavnogo universytetu [Bulletin of the Sumy State University]. 2003, no. 2 (58), pp. 72–76.
6. Dovgiiy S. O., Bulanchuk G. G., Bulanchuk O. M. Vykhyrovi techiyi ideal'noyi ridyny. Klyasychni modeli ta metod dyskretnykh vykhoriv [Ideal fluid vortex flows. Classical models and discrete vortices method]. Kyiv, Instytut obdarovanoyi dytyny Publ., 2016. 341 p.
7. Golovenko D., Dovgy S. A., Klimenkova I. A., Cherniy D. I. Modelirovanie aeyrodynamiki poley pri prognozirovanii nestatsionarnykh protsessov

- v massivakh raznovysotnoy zastroyki [Modeling aerodynamics of fields when forecasting non-stationary processes in arrays of multi-height buildings]. *Visnyk Kharkivs'kogo natsional'nogo universytetu* [Bulletin of the Kharkiv National University]. 2010, no. 890, pp. 37–46.
8. ElGindy H., Everett H., Toussaint G. T. Slicing an ear using prune-and-search. *Pattern Recognition Letters*. 1993, no. 14 (9), pp. 719–722. doi: 10.1016/0167-8655(93)90141-y.
9. Forsyth J., Malcolm J., Mowler C. *Mashinnye metody matematicheskikh vychisleniy* [Machine methods for mathematical calculations]. Moscow, Mir Publ., 1980. 280 p.

Надійшла (received) 06.04.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / Information about authors

Довгий Станіслав Олексійович (Довгий Станислав Алексеевич, Dovgiy Stanislav Oleksiyovych) – академік НАН України, доктор фізико-математичних наук, президент, Національний центр «Мала академія наук України», м. Київ; тел.: (044) 489-55-99; e-mail: man@man.gov.ua.

Буланчук Олег Миколайович (Буланчук Олег Николаевич, Bulanchuk Oleg Mycolayovych) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, Національний центр «Мала академія наук України», м. Київ; тел.: (096) 347-56-60; e-mail: obulan65@gmail.com.

Буланчук Галина Григорівна (Буланчук Галина Григорьевна, Bulanchuk Galina Grigorivna) – кандидат фізико-математичних наук, доцент, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Маріуполь; тел.: (098) 201-83-08; e-mail: ggbulan7@gmail.com.

УДК 519.63+533.6

С. В. ЖУЧЕНКО**РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМОГАЗОДИНАМИКИ КАССЕТЫ ТВЭЛОВ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ**

В статье рассматриваются некоторые результаты вычислительных экспериментов, проведенных автором с помощью авторской программы ПЭВМ. Анализируются успешные и аварийные результаты, возникшие при численном моделировании газодинамики как в активной зоне, так и в коллекторах кассеты из 4 и 8 тепловыделяющих элементов.

Ключевые слова: кассета тепловыделяющих элементов, распределительный и сборный коллекторы, гелиевый теплоноситель, турбулентные течения, возвратные потоки, аварийная ситуация.

С. В. ЖУЧЕНКО**РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТЕРМОГАЗОДИНАМІКИ КАСЕТИ ТВЕЛІВ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРУ НА ШВИДКИХ НЕЙТРОНАХ**

У статті розглядаються деякі результати обчислювальних експериментів, проведених автором за допомогою авторської програми ПЕОМ. Аналізуються успішні і аварійні результати, що виникли при чисельному моделюванні газодинаміки як в активній зоні, так і в колекторах касети з 4 і 8 тепловиділяючих елементів.

Ключові слова: касета тепловиділяючих елементів, розподільний і збірний колектори, гелієвий теплоносій, турбулентні течії, поворотні потоки, аварійна ситуація.

S. V. ZHUCHENKO**RESULTS OF COMPUTER MODELING OF TERMOGAS DYNAMICS OF FAST-NEUTRON NUCLEAR REACTOR FUEL SLUG**

The paper presents the results of computational experiments obtained by an authorial program for designing gas dynamics, which takes place in the active zone of fast-neutron nuclear reactor with helium coolant-moderator and its adjoining collectors. The Generation IV International Forum refers the reactors of such type to the 4-th generation nuclear energy systems. Using helium as coolant-moderator in such reactors is extremely perspective, but implementation of such a project faces many difficulties. The methods and algorithm for joint solving of gas dynamic problem in the fuel elements and their adjoining collectors were developed in the author's recent paper published in the Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series: "Mathematics, Applied Mathematics, and Mechanics", 2018, vol. 88. In the present paper an example of successful numerical modeling of gas dynamic process in a fuel slug consisting of 4 active zones is proposed. In particular, the plots of changes in time of consumption rate of both cool and heated coolant-moderator at the entrance and exit of the fuel slug are given. The dependence on time of temperature changes at the fuel element exit is also plotted. The plots of isobar distribution in the fuel elements at specific times as well as the trajectories of free vortices in the collectors are shown. At the end of the paper the results of a computational experiment resulting in an emergency situation in a fuel slug consisting of 8 fuel elements and its causes are discussed.

Key words: fuel slug, distribution and collection header, helium coolant-moderator, turbulent flows, reversing flow, emergency situation.

Введение. В докладе проводятся результаты вычислительных экспериментов, проведенных с помощью авторской компьютерной программы, моделирующей процессы газодинамики, происходящие в активной зоне ядерного реактора на быстрых нейтронах с гелиевым теплоносителем и в примыкающих к ней коллекторах. В 2001 г. по предложению Министерства энергетики США была создана программа по развитию инновационных ядерных реакторов 4-го поколения, которая приобрела международный статус, объединив 10 стран в рамках Международного форума создания реакторов 4-го поколения GIF-IV (*Generation IV International Forum*). К реакторам 4 поколения были отнесены и реакторы на быстрых нейтронах с газовым теплоносителем (*гелий*), с замк-

© С. В. Жученко, 2019