



УДК 536.2:631.544.41

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ГЕНЕРАЦІЇ 3D-СІТКИ ПРОМИСЛОВОЇ ТЕПЛИЦІ МЕТОДОМ КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ В ANSYS MESHING

Троханяк В.І., інженер

Куляк Б.В., аспірант\*.

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Тел. +38(067)3513082

**Анотація** – в роботі проведено аналіз та розроблено методику побудови 3D-сітки, в препроцесорі ANSYS Meshing, використовуючи метод кінцевих елементів для CFD моделі сучасної теплиці четвертого покоління типу “Venlo”. Проаналізовано особливості та розроблено алгоритм побудови 3D-сітки для задач тепло-масопереносу та гідро-газодинаміки у теплицях промислових розмірів. В результаті отримано найбільш якісні сітки для CFD моделювання.

**Ключові слова:** препроцесор ANSYS Meshing, метод кінцевих елементів, CFD модель, тепло-масоперенос, теплиця “Venlo”.

*Постановка проблеми.* Перед кожним обчислювачем стоїть проблема – отримати вирішення важливої практичної задачі із найменшими затратами машинного часу і наперед заданою точністю. В підході до вирішення вказаної проблеми можна виділити два напрямки: математичний (теоретичний) та інженерний (практичний). Ці напрямки можна прослідкувати в одному із найбільш популярних в наш час методів вирішення задач обчислювальної гідро-газодинаміки і тепло-масопереносу – методі кінцевих елементів (МКЕ) [7]. Застосування даного методу детально описано в науково-технічній літературі. Однак недостатньо досліджено задачі побудови 3D-сітки для CFD моделей в препроцесорі ANSYS Meshing спираючись на їх якість.

*Аналіз останніх досліджень.* Питання генерації якісної сітки є ключовим при вирішенні задач обчислювальної гідро-газодинаміки і тепло-масопереносу. Компанія ANSYS, Inc. пропонує кілька сіткових препроцесорів для генерації сіток. Найбільш універсальним та спрощеним препроцесором на даний момент є ANSYS Meshing. Він має простий інтерфейс і досить легкий у вивченні [4, 9].



МКЕ використовується при чисельному розрахунку задач гідродинаміки і теплопереносу. В науковій літературі за кордоном його називають Finite Element Method (FEM). Суть методу полягає в наближеному вирішенні варіаційної задачі. Для формулювання цього завдання використовуємо поняття функціоналу. Оператор  $I[f(x)]$  називається функціоналом, який заданий на деякій множині функцій, якщо для кожної функції  $f(x)$  ставиться у відповідність певне числове значення  $I[f(x)]$  [3]. Іншими словами, функціонал є як би «функцією від функції», і часто такі функціонали мають вигляд інтегралів. Варіаційна задача полягає у знаходженні такої функції  $f(x)$ , яка б відповідала мінімальному значенню функціоналу  $I[f(x)]$ . Вигляд цього функціоналу є різним для різних завдань та підбирається спеціальним вибором [8].

Основна ідея методу кінцевих елементів полягає в тому, що будь-яку безперервну величину, таку як температура, тиск і переміщення, можна апроксимувати дискретною моделлю, яка будується на безлічі кінцево-безперервних функцій, визначених на кінцевому числі підобластей [7].

Історичними попередниками МКЕ були різноманітні методики будівельної механіки і механіки деформованого твердого тіла яке використовує дискретизацію, зокрема методика сили переміщення. Вихідним об'єктом для застосування МКЕ є матеріальне тіло, яке розбивається на частини - кінцеві елементи (КЕ). В результаті розподілу створюється сітка із границь елементів. Точки перетину цих границь утворюють вузли. На границях і всередині елементів можуть бути створені додаткові вузлові точки. Поєднання з усіх кінцевих елементів і вузлів є основною кінцево-елементної моделі тіла, що деформується.

В деформаційній задачі число степенів свободи вузла залежить від типу задачі і від системи розрахунку. На рис. 1 показаний вузол  $i$ , який має в загальній системі координат  $x, y, z$  - три степені свободи, що складають вузловий вектор степенів свободи [4].

В даний час МКЕ знайшов широке застосування при вирішенні задач теплопровідності в твердих тілах і при розрахунках на міцність. Однак він може бути застосований і при розрахунку течій рідин і газів [2]. Відомі також методи, які поєднують у собі елементи методу кінцевих об'ємів і методу кінцевих елементів [6, 11]. Поєднання цих методів дозволяє використовувати більш широкий ряд розрахункових сіток (тетрагональні сітки, пірамідальні, призматичні, поліедральні), що необхідно при вирішенні завдань зі складною геометрією.

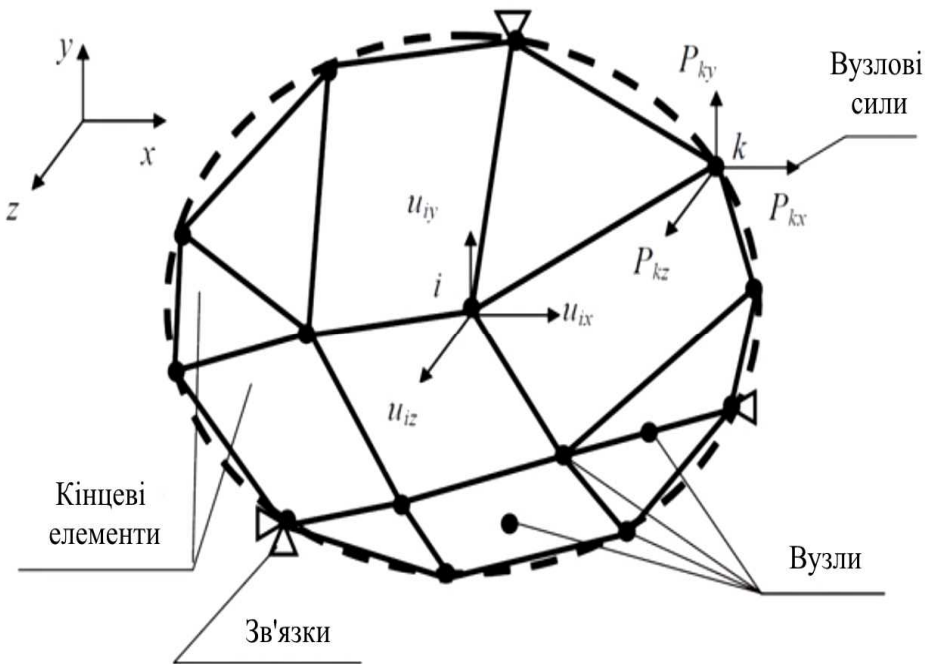


Рис. 1. Розподіл матеріального тіла на частини – кінцеві елементи, в загальній системі координат.

Цей підхід використовують CFD пакети Ansys CFX, Ansys Fluent, Star-CD, Star-CCM +, Comsol та ін [1, 8].

Універсальна програмна система кінцево-елементного аналізу ANSYS має безліч застосувань практично для всіх галузей сучасної науки і техніки, в тому числі і у агропромисловому секторі [5].

Звичайно різні фізичні завдання вимагають різних підходів і це слід враховувати при створенні і моделюванні розрахункової сітки. ANSYS Meshing більшою мірою орієнтований на створення сітки для CFD-розрахунків додатків ANSYS - CFX або FLUENT, проте слід мати на увазі, що ключові моменти процесу побудови сітки такі як і в інших програмах, а саме у програмах які не використовуються в ANSYS [1, 5].

Моделювання сітки є невід'ємною частиною процесу інженерного розрахунку. Якість сітки визначає точність і швидкість отримання рішення. Час необхідний для створення сітки, займає більшу частину загального часу виконання комп'ютерного інженерного моделювання. Точність результату безпосередньо залежить від густоти сітки. Але чим густіша сітка, тим більше комп'ютерних ресурсів (оперативної пам'яті / процесорного часу) необхідно. Тому більш потужні і автоматизовані інструменти побудови сітки дають кращий результат.

Основними критеріями якості елементів (осередків) для Fluent є Orthogonal Quality і Skewness [8]. Рекомендується використовувати сіткові моделі, для яких мінімальне значення Orthogonal Quality  $> 0.1$  або максимальне значення Skewness «перекіс»  $< 0.95$  [10]. «Перекіс» –



це міра зміни елемента в порівнянні з початковою його формою, яка лежить в діапазоні від 0 (відмінна) до 1 (неприпустима).

Не можна виходити за ці межі, за винятком випадків з відносно простими течіями і зонами з незначними градієнтами змінних. Про погану якість розрахункової сітки можна дізнатись із повідомлення про від'ємні об'єми осередків, при імпорті розрахункової сітки в ANSYS Fluent. В ділянках складної геометрії найбільші елементи можуть спотворювати свою форму. Елементи із низькою якістю можуть спричинити негативні результати, а саме до того що рішення може мати розбіжність!

*Формулювання цілей статті.* Розробка методики побудови 3D-сітки методом кінцевих елементів для CFD моделі відділення промислової теплиці, щоб проаналізувати область вентиляційних потоків та обігрів у відповідних точках та поверхнях, похибка яких не більше 5%.

*Основні матеріали досліджень.* Розрахунок і побудова сітки проводилася в модулі платформи Workbench - препроцесорі ANSYS Meshing. Робоча область ANSYS Meshing Application використовує підхід ділення. Різний "Метод розбивки" може бути застосований до кожної частини геометрії.

Процес генерації сітки можна умовно розділити на кілька етапів. На першому етапі необхідно виконати діагностику вихідної геометрії, усунути виявлені помилки або внести спрощення в розрахункову модель. На другому етапі визначаються загальні налаштування сіткового алгоритму, розміри елементів на виділених поверхнях, зони адаптації сітки (локального подрібнення) та ін. Після генерації сітки проводиться оцінка якості сітки і її розмірність. Щодо діагностики геометрії – вона проводиться перед генерацією сітки. Для цього можна використовувати як DesignModeler, так і SpaceClaim Direct Modeler. В геометрії найбільш критичними для генератора сітки є такі помилки: орієнтація поверхні та наявність незрівнянно малих (по площі) поверхонь, «клинчастих» поверхонь і інших дефектів в місцях сполучення двох і більше поверхонь (Slivers, Sharps Angles і ін.). Для виправлення подібних дефектів можна використовувати інструменти панелі Repair, видаляти вручну, або групувати в панелі Virtual Topology [9].

Геометрія (див. рис. 2 а) побудована в реальних розмірах, кількість елементів та граней достатньо велика. Враховуючи великі розміри приміщення, з метою зменшення часу машинного розрахунку, було прийнято рішення розраховувати тільки четверту частину 3D теплиці (рис. 2 б), яка є симетричною до інших трьох.

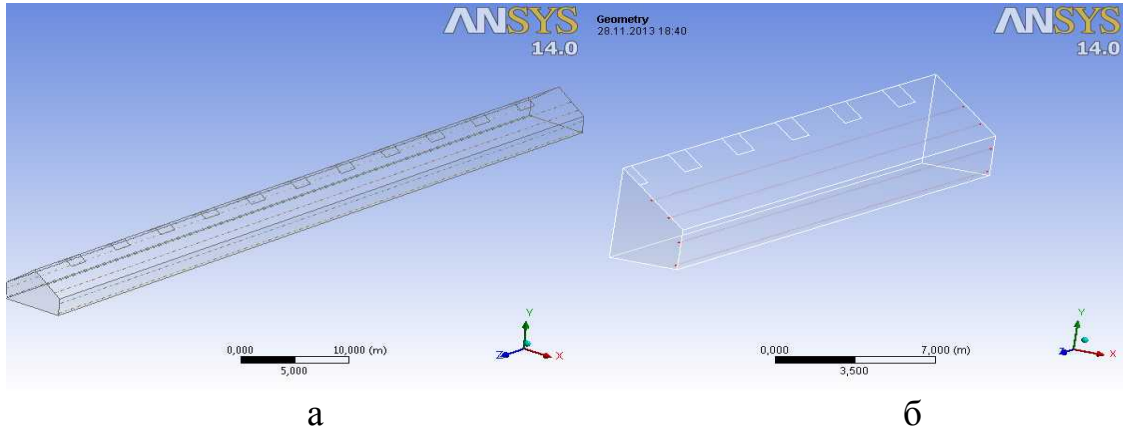


Рис. 2. Загальний вигляд геометрії 3D теплиці: а - повний об'єм теплиці; б - симетрична частина теплиці.

В геометрії теплиці передбачено отвори для системи вентиляції повітря та труби із гарячим водопостачанням для опалення.

Для варіанта теплопостачання від власної котельні температура води в системі опалення шатра дорівнює  $95...70\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Внутрішню температуру теплиці приймаємо  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Для зимніх теплиць температуру зовнішнього повітря беремо як середню температуру найхолоднішого місяця експлуатації -  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Відносна вологість в теплиці приймається 60%. Для опалення шатра використовуються сталеві гладкі труби діаметром 32 мм та загальною площею поверхні  $657,9\text{ м}^2$ . Огородження теплиці здійснюється одношаровим стільниковим полікарбонатом товщиною 4 мм. Ширина та довжина ланки теплиці становить 6,4 м. та 75 м. відповідно. Висота в свою чергу 4,5 м.

В ANSYS Meshing Application є кілька видів методів розбивки для 3D сітки [8, 9]:

- Методи побудови гексаедральної сітки:
  - багатозональний (Multi Zone);
  - протяжкою (Sweep);
  - багатозональний (на основі блочної сітки ICEM CFD);
  - протяжкою для оболонкових тіл (Thin sweep);
  - з переважанням гексаєдрів (Hex Dominant).
- Методи побудови тетраедральної сітки (Tetrahedrons):
  - на основі поверхневої сітки (Patch Conforming);
  - CFX-Mesh;
  - незалежно від поверхонь (Patch Independent).
- Автоматичний (Automatic).

Характерні особливості кожного із видів методів розбивки:

- гексаедральна сітка, в порівнянні з тетраедральною сіткою, міститиме більш ніж в 2 рази менше вузлів при використанні її для вирішення завдання з тією ж точністю; тому при її застосуванні необхідна менша кількість елементів для вирішення завдання CFD;



- недоліком тетраедральної сітки є трудомісткий процес її створення; у той же час, перевагою сітки є те що, вона дозволяє створювати осередки, близькі за формою до зон з великими градієнтами швидкостей і температур, і до границь розрахункової області, що дозволяє моделювати межові шари;

- недоліком декартової сітки є те, що вона дозволяє створювати тільки прямокутні осередки, і в крайньому випадку це призводить до погіршення розв'язків рівнянь приграничного шару, а перевагою декартової сітки – це простота у її створенні.

Результати розрахунків для промислової теплиці наведено на рисунках 3 – 4. На рис. 3 зображено побудовану сітку виробничого приміщення промислової теплиці у розрізі, із отворами для припливного повітря та трубами із гарячою водою для опалення (див. рис. 3). Сітка, в певній мірі, зменшена в місцях, де розташовані отвори та труби, відносно решти площі приміщення. Це зроблено для того щоб покращити розрахунок гідродинаміки та теплообміну.

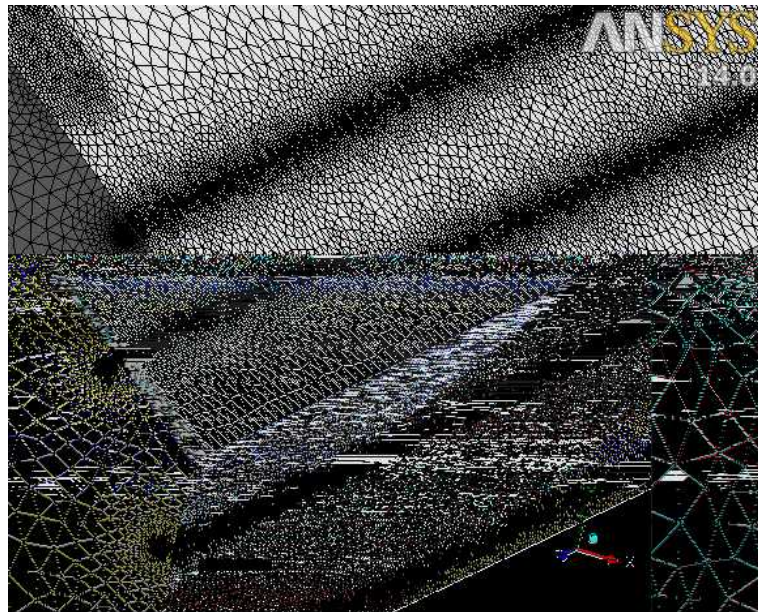


Рис. 3. Загальний вигляд сітки теплиці в розрізі із отворами для припливного повітря та трубами із водяним опаленням.

На рис. 4 наведено розріз труби із гарячою водою у збільшеному масштабі, що дозволяє чітко побачити пограничні шари. Два шари розташовані в середині труби та два зовні. Дані із розрахунку внутрішніх пограничних шарів описують гідродинаміку в середині труби, а дані із зовнішніх пограничних шарів – теплообмін зовні труби.

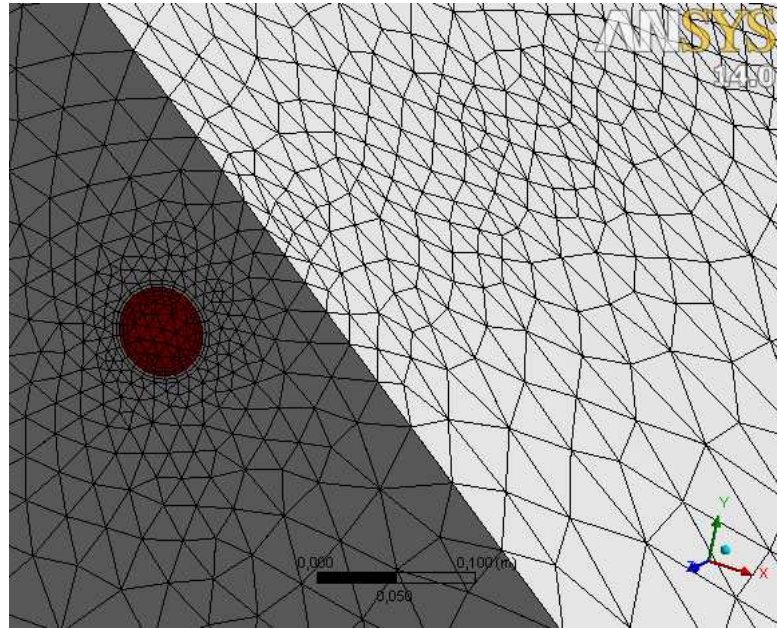


Рис. 4. Сітка теплиці з детальним виглядом труби для опалення із пограничними шарами.

Отже, надмірне згущення сітки, дозволяє отримати більш якісні результати гідродинаміки та теплообміну в теплиці, що дозволяє оцінити якість та недоліки сітки.

Використовуючи МКЕ побудовано розрахункову 3D-сітку в препроцесорі ANSYS Meshing для розв'язку задач гідродинаміки і теплопереносу в промисловій теплиці. Оцінивши різноманітні сітки для CFD моделей, вибрано найбільш економічні та якісні, що дозволяють отримати найбільш точні результати розрахунку вентиляційних потоків у виробничому відділенні теплиці.

*Висновки.* За допомогою методу кінцевих елементів побудовано розрахункову 3D-сітку в препроцесорі ANSYS Meshing для розв'язку задач гідродинаміки і теплопереносу у відділенні промислової теплиці четвертого покоління “Venlo”. Розглянуто особливості побудови сітки для задач гідро- газодинаміки і тепло- масопереносу при вентиляційних потоках в закритому середовищі із регульованим мікрокліматом. В результаті побудови різноманітних сіток для CFD моделей, вибрано найбільш якісну, що дають змогу отримати достовірні та точні результати розрахунку вентиляційних і теплових потоків у теплиці.

#### *Література*

1. Васильев В. А. Анализ и выбор программных продуктов для решения инженерных задач [Електронний ресурс] / В. А. Васильев, М. А. Калмыкова // Современная техника и технологии. – 2013. – №3. –



- Режим доступа к ресурсу: <http://technology.snauka.ru/2013/03/1702>  
(дата обращения: 04.08.2016).
2. *Власова Е. А.* Приближенные методы математической физики / *Е. А. Власова, В. С. Зарубин, Г. Н. Кувыркин.* – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 700 с.
  3. *Дульнев Г. Н.* Применение ЭВМ для решения задач теплообмена / *Г. Н. Дульнев, В. Г. Парфенов, А. В. Сигалов.* – М.: Высшая школа, 1990. – 207 с.
  4. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учеб. Пособ. / [*В. А. Бруняка, В. Г. Фокин, Е. А. Солдусова та ін.*]. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2010. – 271 с.: ил.
  5. Офіційний сайт компанії ANSYS Inc. [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://www.ansys.com/>.
  6. *Патанкар С. В.* Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / *С. В. Патанкар.*; пер. с англ. под. ред. *В. Д. Виленского.* – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 150 с.
  7. *Сегерлинд Л.* Применение метода конечных элементов / Пер. с англ. – Москва: Мир, 1979. – 392 с.
  8. *Троханяк В. І.* Застосування методу кінцевих елементів при побудові сітки в ANSYS Meshing для CFD моделей / *В. І. Троханяк, Ю. О. Богдан.* // Вісник приазовського державного технічного університету. – 2015. – №30. – С. 181–189.
  9. *Хитрых Д.* Рекомендации по использованию сеточного препроцессора ANSYS Meshing / *Денис Хитрых.* // ANSYS Advantage. Русская редакция. – 2014. – №20. – С. 34–43.
  10. ANSYS Meshing User's Guide. Release 15. ANSYS, Inc. Southpointe 275 Technology Drive Canonsburg, PA 15317, 2013. – 492 p.
  11. *Ferziger J. H.* Computational Methods for Fluid Dynamics / *J. H. Ferziger, M. Perić.* – 3., rev. ed. – Berlin; Heidelberg; New York; Barcelona; Hong Kong; London; Milan; Paris; Tokyo: Springer, 2002. – 423 p.

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГЕНЕРАЦИИ 3D-СЕТКИ ПРОМЫШЛЕННОЙ ТЕПЛИЦЫ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ANSYS MESHING**

В. И. Троханяк, Б. В. Куляк

**Аннотация** - в работе проведен анализ и разработана методика построения 3D-сетки, в препроцессоре ANSYS Meshing, используя метод конечных элементов для CFD модели современной теплицы четвертого поколения типа "Venlo". Проанализированы особенности и разработан алгоритм построения 3D-сетки для задач тепло-массопереноса и гидро-газодинамики в теплицах про-





**мышленных размеров. В результате получено более качественные сетки для CFD моделирования.**

**RESEARCH OF THE GENERATION OF 3D-MESH FOR INDUSTRIAL GREENHOUSE IN THE ANSYS MESHING WITH USING FINITE ELEMENT METHOD**

V. I. Trokhanyak, B. V. Kuliak

*Summary*

**The paper analyzes the technique and construction of 3D-mesh in the preprocessor ANSYS Meshing, using the finite element method for CFD model modern greenhouse fourth generation type "Venlo". The analysis of the characteristics and developed an algorithm for constructing 3D-grid for heat and mass transfer problems and hydro-gas-dynamics in greenhouses industrial sizes. The result is a more qualitative meshes for CFD-modeling.**