

УДК 533.6\664.65

БАСОК Б.І., НАКОРЧЕВСЬКИЙ А.І., НОВИЦЬКА М.П.,
ПЕТРЕНКО М.П., ХИБИНА М.А.

Інститут технічної теплофізики НАН України

ДОСЛІДЖЕННЯ АЕРОДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В РОБОЧОМУ ОБ'ЄМІ ГІГРОТЕРМІЧНОЇ ПЕЧІ ТИПУ ГТП-135. Частина I.

Представлено нову методику розрахунку та дослідження режимних параметрів аеродинаміки у робочому об'ємі гіротермічної печі типу ГТП-135

Представлена новая методика расчета и исследования режимных параметров аэродинамики в рабочем объеме гигротермической печи типа ГТП-135.

A new method of calculation and investigation for aerodynamic behavior parameters of a hygrothermic oven of GTO-135 type is presented.

C – константа моделі;
 D – діаметр;
 G – генерація турбулентної кінетичної енергії;
 k – кінетична енергія турбулентності;
 p – тиск;
 R – радіус імітатора;
 t – час;
 u – швидкість;
 V – початкова швидкість вихідного повітря;
 X, Y, Z – осі координат;
 δ – символ Кронекера;
 ε – швидкість дисипації турбулентної енергії;
 μ – динамічний коефіцієнт в'язкості;
 ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості;

σ – константа;
 ρ – густина;
 τ – проміжок часу, тензор напруг;
 Re – число Рейнольдса.

Індекси:

i, j – номер координати;
 k – кінетичний;
 mol – молекулярний;
 t – турбулентний;
 ε – дисипація;
 Σ – загальний.

Скорочення:

ГТП – гіротермічна піч;
АСО-3, МС-13 – марки анемометрів.

Вступ

Метою представленої роботи є оптимізація конструктивних рішень та обрання оптимальної системи режимних параметрів роботи гіротермічної печі типу ГТП-135. В Інституті технічної теплофізики НАН України (ІТТФ НАНУ) протягом певного часу проводилися науково-дослідні та конструкторські роботи по створенню малогабаритної гіротермічної печі для випікання широкого асортименту хлібобулочних виробів. Зокрема, було розроблено типоряд енергоощадних однодверних гіротермічних печей періодичної дії різної продуктивності. Міні-печі типу ГТП-135 є зручними та економічно вигідними для оснащення міні-пекарень при випіканні

хліба та хлібобулочних виробів невеликими партіями.

Враховуючи накопичений в ІТТФ НАН України великий досвід щодо експлуатації малогабаритних гіротермічних печей для міні-пекарень є доцільним проведення більш детального вивчення теплоаеродинамічних процесів, що виникають у печі типу ГТП-135, із застосуванням сучасних методів комп'ютерного моделювання.

Поставлена задача розв'язувалася із використанням пакета моделюючих програм PHOENICS 3.6. Для дослідження було обрано стандартну k - ε модель (для великих значень чисел Рейнольдса) у формі, яка була запропонована Лаундером і Сполдінгом [1].

Використання турбулентних моделей для тепломасообмінних процесів в печі фізично зумовлено тією обставиною, що при великій кількості просторово розташованих в печі тіл - джерел поглинання теплоти і поглинання або виділення вологи (зокрема 135 буханок хліба для печі ГТП-135), в околі кожного з них рух повітря суттєво неламинарний. Біля кожної буханки хліба виникають застійні зони, вихроутворення, пульсації швидкості, прискорення, динамічного тиску, особливо при реалізації змінних режимів випікання – зміни загального температурного напору та загальної вологи в печі. Окрім цього, на виході повітря безпосередньо з вентилятора значення числа Рейнольдса для реальної конструкції печі

$$Re = DV / \nu,$$

де D – діаметр вхідного патрубку вентилятора, $V \approx 6...10$ м/с – діапазон зміни початкової швидкості вихідного повітря, ν – кінематичний коефіцієнт в'язкості, знаходиться у діапазоні $Re = (0,6...1) \cdot 10^5$. Це відповідає виникненню суто турбулентного режиму течії.

Адаптація узагальненої теплофізичної моделі

Виявилось доцільним спочатку проводити дослідження аеродинамічних процесів у робочому об'ємі печі без врахування внутрішніх джерел теплоти (електротенів). Тому далі викладено методику розв'язання задачі дослідження аеродинамічних процесів в робочому об'ємі печі типу ГТП-135, що проводиться у два етапи. На першому етапі вивчались аеродинамічні процеси за умови зміни швидкості вентилятора та конфігурацій робочої області незавантаженої печі. На другому етапі досліджувались аеродинамічні процеси у робочої області гіротермічної печі типу ГТП-135 при наявності імітаторів буханок хліба.

Поставлена задача розв'язувалася для постійної густини (без урахування архімедових сил) у відсутності внутрішніх джерел маси. Тому система рівнянь стандартної k - ϵ моделі може бути записана у вигляді [2, 3]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \text{для } i = 1, 2, 3; \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_j u_i) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2)$$

де (1) це рівняння нерозривності, (2) – рівняння збереження кількості руху, через τ_{ij} позначено тензор напруг:

$$\tau_{ij} = \left[\mu_\Sigma \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu_\Sigma \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \delta_{ij}; \quad i, j = 1, 2, 3.$$

У рівнянні μ_Σ це загальна в'язкість, яка визначається формулою $\mu_\Sigma = \mu_{mol} + \mu_t$. Через μ_t позначено турбулентну в'язкість.

Модель турбулентності ґрунтується на транспортних рівняннях для кінетичної енергії турбулентності:

- рівняння для кінетичної енергії турбулентності:

$$\rho \frac{Dk}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon, \quad (3)$$

- рівняння для швидкості її дисипації:

$$\rho \frac{D\epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + (C_{1\epsilon} G_k - C_{2\epsilon} \rho \epsilon) \frac{\epsilon}{k}, \quad (4)$$

де G_k – генерація турбулентної кінетичної енергії, яка отримана завдяки градієнту середньої швидкості. Величина G_k визначається із співвідношення:

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)^2.$$

Турбулентна в'язкість μ_t була розрахована за формулою Прандтля - Колмогорова

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon}.$$

Моделльні константи задавалися такими значеннями: $C_{1\epsilon} = 1,44$; $C_{2\epsilon} = 1,92$; $C_\mu = 0,09$; $\sigma_k = 1,0$; $\sigma_\epsilon = 1,3$ [1].

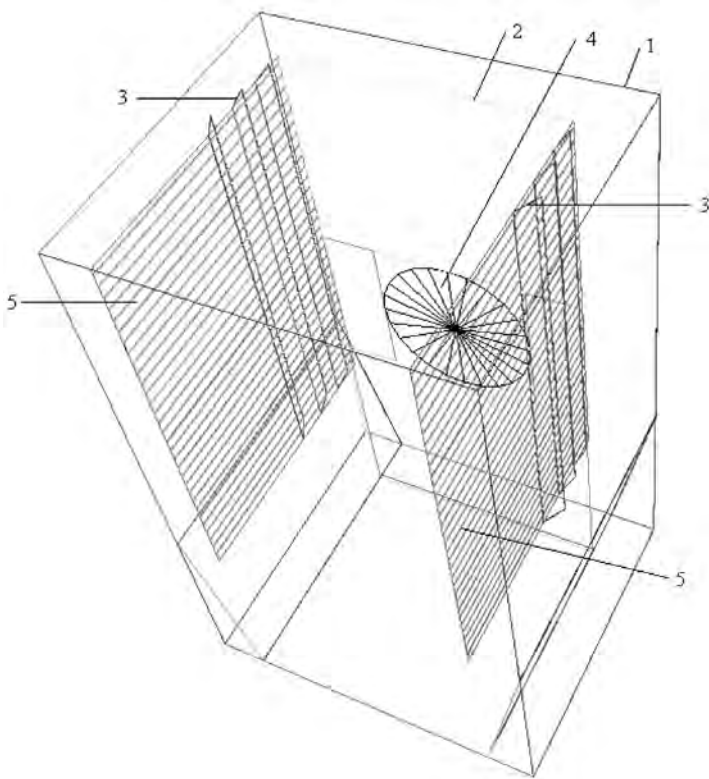


Рис. 1. Схема хлібопекарської печі типу ГПП-135.
 Позначення: 1 - зовнішня поверхня, 2 – внутрішня область, 3 – вертикальні направляючі (заслінки), 4 – вентилятор, 5 – бокові горизонтальні направляючі.

Схема хлібопекарської печі типу ГПП-135.

Для виконання розрахунків було побудовано тривимірну схему хлібопекарської печі, яка повністю співпадає з реальними параметрами хлібопекарської печі типу ГПП-135 (рис. 1).

Зовнішній контур (1, рис. 1): висота – 1650 мм; ширина до скосів – 1030 мм; скоси починаються на висоті 550 мм; ширина на нижньому рівні – 750 мм.

Внутрішня область: висота – 1650 мм; ширина – 750 мм, глибина – 900 мм. На поверхні 2 на відстані 375 мм від зовнішньої бічної стінки встановлено вентилятор 4 на висоті 850 мм від низу. Діаметр вентилятора $D = 440$ мм. Бічні поверхні 5 являють собою горизонтальні направляючі потоку повітря, що нагнітається вентилятором у внутрішню область камери печі. В конструкції печі реалізовано горизонтальні направляючі двох типів:

- суцільні смуги під певним кутом до вертикалі, розміром 30x750 мм;
- прорізи, розміром 5x750 мм.

Крім того, для модифікованої робочої області у просторі між зовнішнім контуром і внутрішньою областю (ширина 140 мм), встановлено по 3 вертикальні направляючі з кожного боку на відстані 100 мм одна від одної. Вони кріпляться на бічні стінки внутрішньої області. Розмір вертикальної направляючої: 70x1100 мм. Перша пара вертикальних направляючих - під кутом 5°, друга – 15°, третя – 30°. Кути розташування направляючих можуть змінюватися, враховуючи особливості продукції, що випікається. Направляючі обох типів використовуються для керування потоком повітря, яке поступає в робочу область.

Граничні умови

Задача розв'язувалася у трьохвимірній стаціонарній постановці при таких граничних умовах. Бічні поверхні зовнішнього контуру 1 – абсолютно гладкі, нормальна компонента швидкості на них дорівнює нулю. Температура у робочій області на початок розрахунків становить 20 °С, тиск – $1 \cdot 10^5$ Па. На виході з вентилятора 4 (рис. 1) приймається рівномірний профіль подовжньої швидкості для вентилятора. Розрахунки проводились для різних значень швидкості, можливих для реалізації в печі типу ГПП-135, а саме: 6 м/с, 7 м/с і 8 м/с. Такі значення було обрано виходячи з вимірювань, які здійснювалися у робочій зоні печі типу ГПП-135: 1) анемометром крильчастим марки АСО-3 (діапазон вимірюваних швидкостей від 0,3 м/с до 5 м/с); 2) анемометром чашковим марки МС-13 (діапазон вимірюваних швидкостей від 1 до 20 м/с).

Широкий діапазон вхідних швидкостей вентилятора від 6 до 8 м/с реально обумовлений різним асортиментом випічки. Скажімо, при випічці кондитерських виробів, печива, піци, кексів інших виробів, що характеризуються невеликими розмірами, необхідні помірні режими аеродинамічного обдуву. Випаровування вологи із заготовок і їх нагрівання можна провести при менш інтенсивній аеродинаміці, тому такі режими реалізуються при швидкості вентилятора, близької

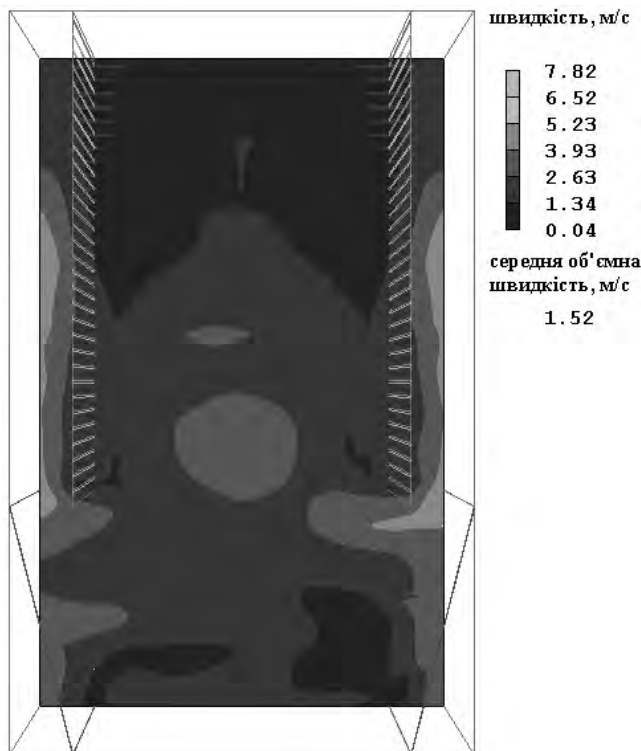


Рис. 2. Розподіл швидкостей у робочій області печі. Швидкість потоку повітря з вентилятора — 6 м/с. Зріз наведено для $Y \approx 450$ мм, тобто для вертикальної площини Z-X, що проходить через середину глибини внутрішньої області печі.

до 6 м/с. При випічці великих буханок хліба необхідно підвищити інтенсивність потоків нагрітого пароповітряної суміші, для чого найбільш оптимальною є швидкість біля 8 м/с. А випічка батонів проходить при середньому значенні швидкості вентилятора 7 м/с.

Результати розрахунків для незавантаженої печі

Дослідження полів швидкостей потоку повітря було зумовлено тим, що за рахунок, головним чином, вимушеної конвекції повітря відбувається перенесення теплоти і вологи в печі як в цілому, так і до кожного нагріваемого та зволоженого або осушеного об'єкту — буханки хліба. Від ступеня інтенсифікації руху повітряного потоку істотно залежать і енергетичні затрати і загальна тривалість випікання хліба, тобто енергетичний рівень та час протікання теплообмінних процесів.

Кінетична енергія турбулентності характеризує локальну аеродинаміку, а значить і локальний тепловологообмін в усьому робочому об'ємі печі. Тому просторова ізотропність і часова рівномірність її розподілу сприяє реалізації однакових умов тепломасообміну для кожної локальної ділянки робочого об'єму печі, а, відповідно, і для кожної окремої буханки хлібного виробу, що в результаті призводить до однакової якості випечених виробів при єдиному часі випікання.

Дослідження динамічного тиску зумовлені виявленням таких режимів повітряного обдуву кожного виробу, щоб різниця тисків, що діють на буханку не була б суттєвою, тобто такою, що не призводить до деформації виробу, його сплюсненню, розриву. Це в свою чергу ускладнює процеси тепловологообміну, а головне, призводить до погіршення або втрат товарного вигляду продукції.

Були одержані та проаналізовані поля швидкостей, тиску та кінетичної енергії турбулентності, які виникають у робочій області печі без застосування вертикальних направляючих (для різних значень початкової швидкості вентилятора (рис. 2–7) та з додаванням вертикальних направляючих (рис. 8–3). Дослідження та аналіз даних було виконано для характерної вертикальної площини Z-X, що проходить через середину глибини внутрішньої області печі при $Y \approx 450$ мм.

Як видно з рис. 2, 3, швидкість повітря, значення якої представлено в гамі кольорів і відповідних значень справа рис., у зоні випікання при швидкості потоку з вентилятора 6 м/с приблизно становить 3,5 м/с, а для випадку 7 м/с — 4,0 м/с (рис. не наведено) і 8 м/с відповідно — 4,5 м/с. Вона достатньо велика. Такий швидкісний режим не підходить для процесу випікання хлібобулочних виробів, тому що можливо виникнення так званого ефекту „здування” тістових заготовок та їх нерівномірного нагрівання. З метою запобігання таким небажаним процесам були проведені розрахунки з використанням вдосконаленої модернізованої схеми печі. Було додано вертикальні направляючі 3 під різними кутами на бокових внутрішніх поверхнях 5 печі (рис. 1).

Зазначимо, що середня об'ємна швидкість обдуву повітря в модернізованій печі (рис. 8, 9) при швидкості вентилятора 6 м/с становить 1,61 м/с, а при швидкості вентилятора 8 м/с — 2,30 м/с,

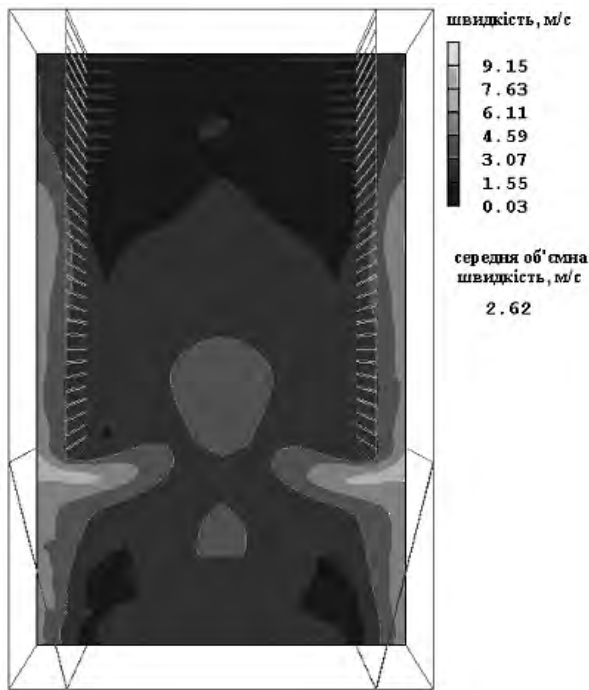


Рис. 3. Розподіл швидкостей у робочій області печі. Швидкість потоку з вентилятора – 8 м/с, $Y \approx 450$ мм. Білі області на малюнку (тут і надалі) – це сукупність векторів швидкості.

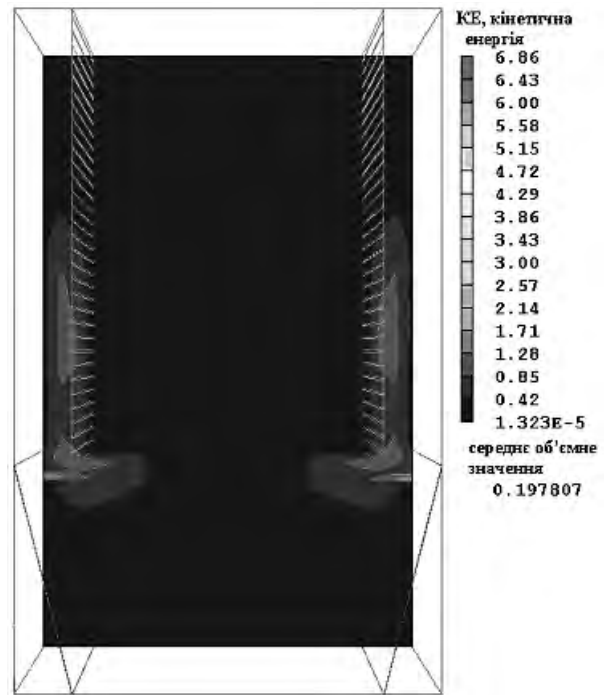


Рис. 5. Розподіл кінетичної енергії турбулентності у робочій області печі. Швидкість потоку з вентилятора – 8 м/с, $Y \approx 450$ мм.

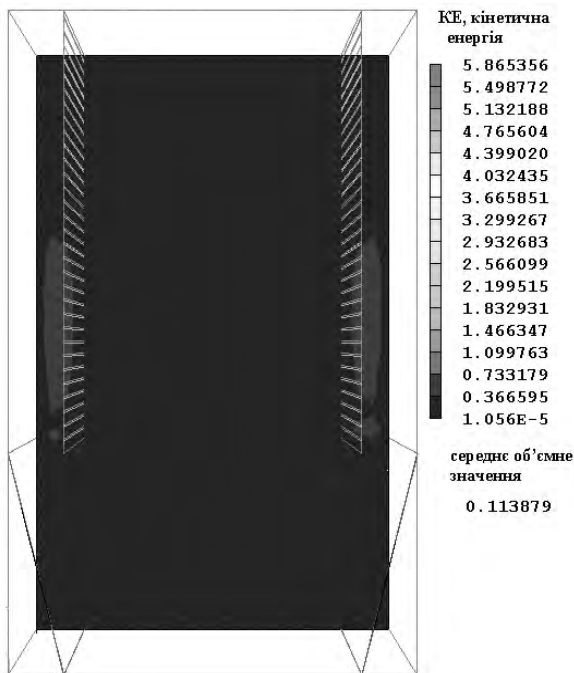


Рис. 4. Розподіл кінетичної енергії турбулентності у робочій області печі. Швидкість повітряного потоку з вентилятора – 6 м/с, $Y \approx 450$ мм.

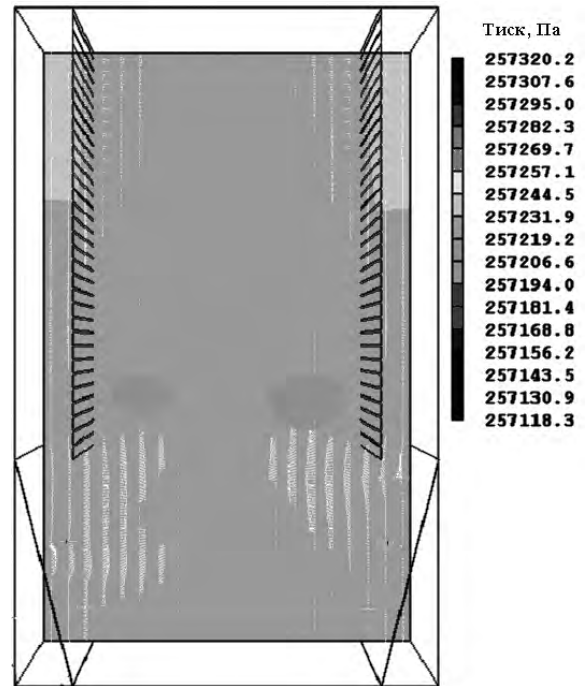


Рис. 6. Розподіл тиску у робочій області печі. Швидкість потоку повітря з вентилятора – 6 м/с, $Y \approx 450$ мм.

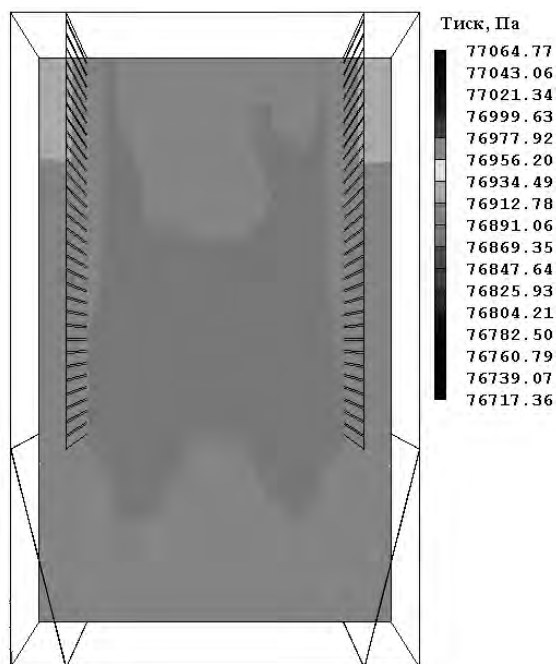


Рис. 7. Розподіл тиску у робочій області печі. Швидкість потоку з вентилятора – 8 м/с, $Y \approx 450$ мм

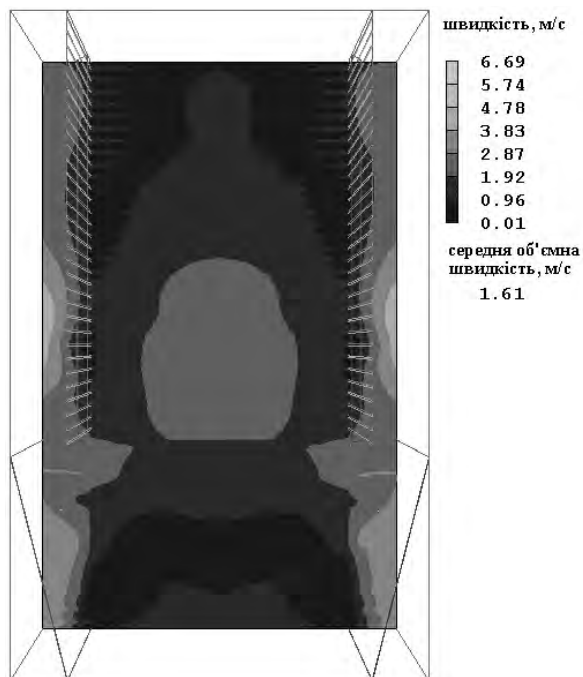


Рис. 8. Розподіл швидкостей у змінній (модернізованій) робочій області печі. Швидкість потоку з вентилятора – 6 м/с, $Y \approx 450$ мм.

тобто збільшення потужності вентилятора на 33% призвело до 43% росту інтегральної (по всій камері) швидкості обдуву. Це означає, що зростання швидкості переважає збільшення необхідної для цього потужності. Такий факт, в свою чергу, призводить до зменшення часу процесу випічки, а отже до ефекту загального енергозаощадження. Аналогічні результати спостерігаються і для немодернізованої печі, (рис. 2, 3), де середні об'ємні швидкості становлять для 6 м/с і 8 м/с відповідно 1, 54 м/с та 2, 62 м/с, а їх зростання – 70%.

Ще одна особливість аеродинаміки печі полягає в тім, що при модернізації зі встановленням направляючих покращується ізотропність розподілу швидкості по всьому об'єму печі, про що свідчить співставлення рис. 2 і 8 та рис. 3 і 9. Даний ефект призводить до підвищення якості продукції.

Поля кінетичної енергії турбулентності (рис. 6 і 7 та рис. 12 і 13) практично однакові для всієї площини показу, за виключенням лише області, де знаходяться електротени. Зазначимо, що рівномірність розподілу кінетичної енергії турбулентності для варіанту вентилятора зі середньою швидкістю 8 м/с краща, ніж при середній швид-

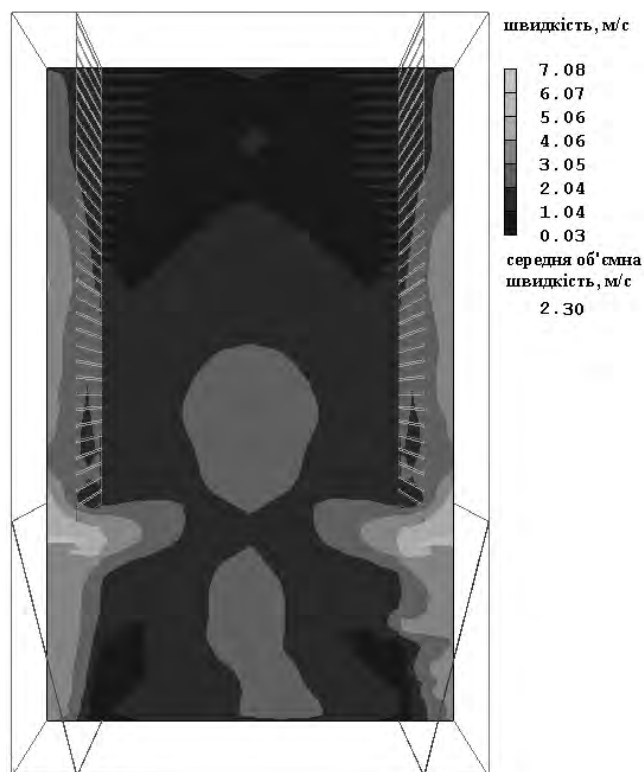


Рис. 9. Розподіл швидкостей у змінній (модернізованій) робочій області печі. Швидкість потоку з вентилятора – 8 м/с, $Y \approx 450$ мм.

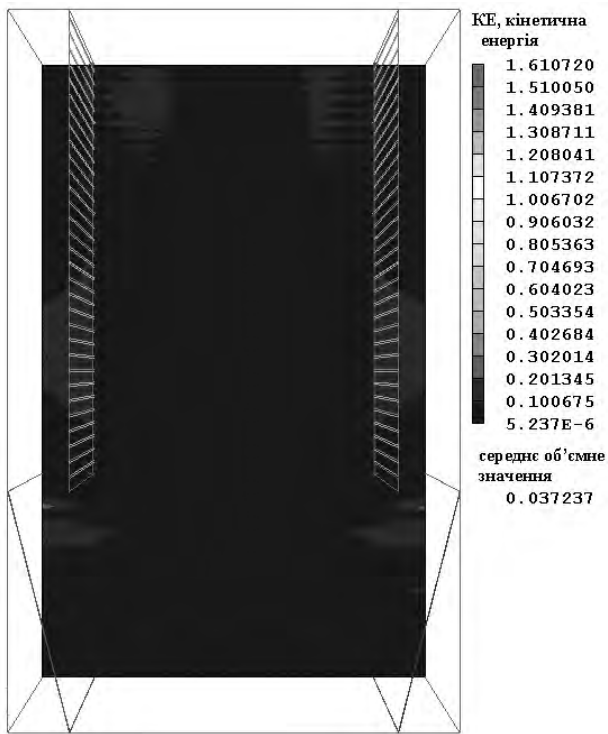


Рис. 10. Розподіл кінетичної енергії турбулентності у змінній (модернізованій) робочій області печі. Швидкість потоку – 6 м/с, $Y \approx 450$ мм.

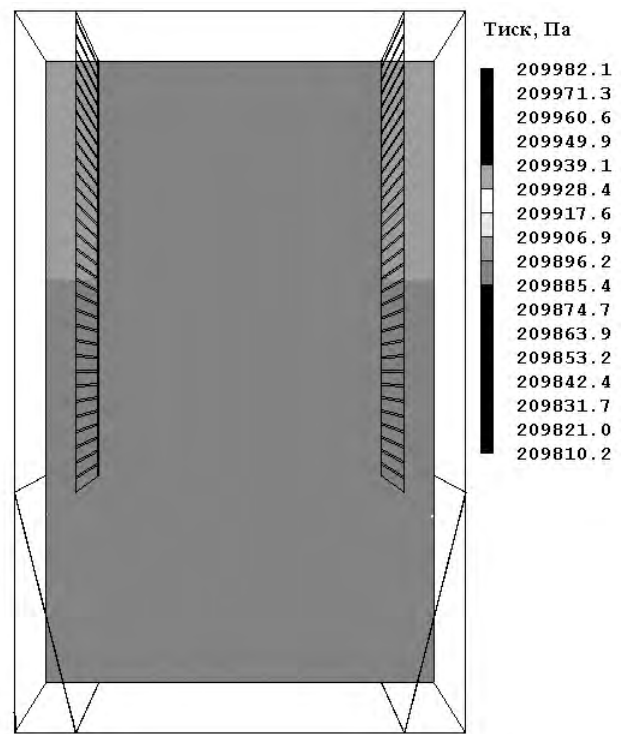


Рис. 12. Розподіл тиску у змінній (модернізованій) робочій області печі. Швидкість потоку з вентилятора – 6 м/с, $Y \approx 4450$ мм.

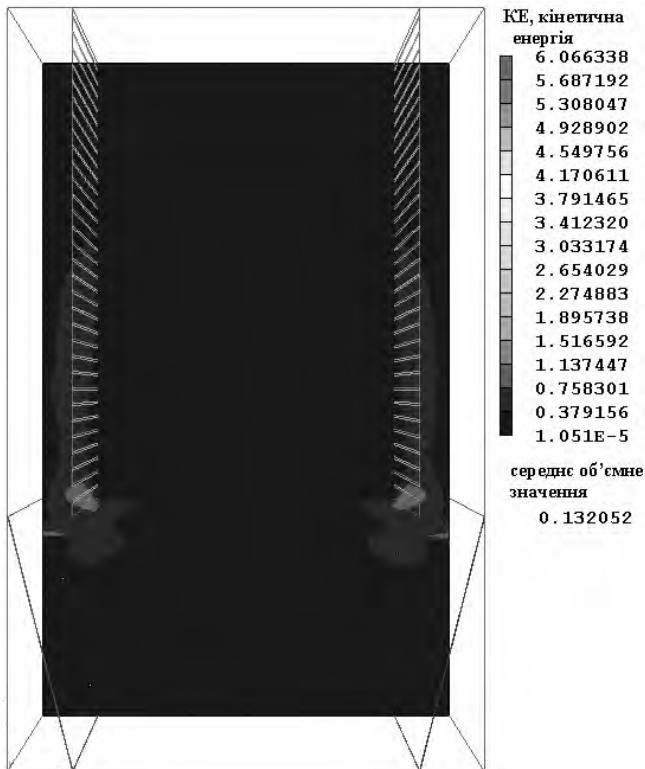


Рис. 11. Розподіл кінетичної енергії у змінній (модернізованій) робочій області печі. Швидкість потоку з вентилятора – 8 м/с, $Y \approx 450$ мм.

кості 6 м/с, про що свідчить співставлення рис. 12 і 13. Даний факт теж призводить до покращення якості випічки.

Поля розподілу тиску значно рівномірні при наявності бокових направляючих, тобто в модернізованій печі. На це вказує порівняння рис. 6 і 12 та рис. 7 і 13. Найбільш ізотропний розподіл тиску для середньої швидкості вентилятора 8 м/с, де вся площа досліджень, за виключенням верхніх бокових областей з електротенами, знаходиться під надлишковим тиском приблизно 7 кПа. Таке значення надлишкового тиску не впливає на якість продукції, що випікається.

Результати розрахунків для завантаженої печі

З метою наближення умов модельних розрахунків аеродинамічних характеристик до реальних процесів, що виникають у гігротермічній печі типу ГТП-135 при випічці подового хліба, у робочій області було розміщено 78 (по 6 на 13 рівнях) об'єктів-імітаторів напівсферичної фор-



Рис. 13. Розподіл тиску у змінній (модернізованій) робочій області печі. Швидкість потоку з вентилятора – 8 м/с, $Y \approx 450$ мм

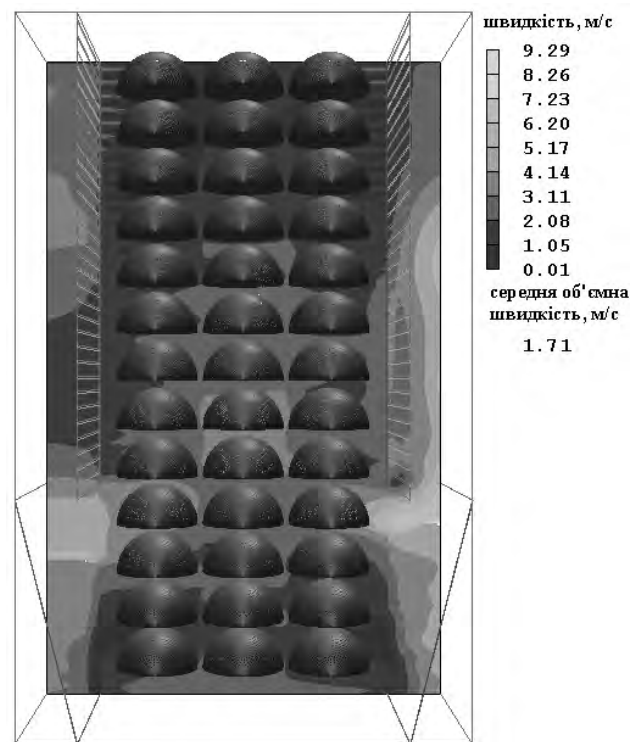


Рис. 14. Розподіл швидкостей в модернізованій печі при наявності імітаторів буханок. Середня швидкість потоку з вентилятора – 6 м/с. Зріз наведено для $Y \approx 450$ мм.

ми (радіус $R = 100$ мм). Розрахунки, як й у попередніх випадках, проводилися для різних швидкостей вентилятора, а саме: 6 м/с і 8 м/с. На рис. 14-19 наведені поля швидкостей, тиску та кінетичної енергії турбулентності, які виникають у робочій області печі з наявними імітаторами буханок хліба.

Зазначимо, середня об'ємна швидкість в модернізованій печі з імітаторами в порівнянні без них зростає на 0,10 м/с і становить 1,71 м/с при швидкості вентилятора 6 м/с (рис. 14) та 2,09 м/с при швидкості вентилятора 8 м/с (рис. 15). Окрім цього, в порівнянні з піччю баз імітаторів буханок хліба середня об'ємна швидкість в печі менш залежить від потужності (аналог швидкості) вентилятора.

Це вказує на той факт, що вибраний діапазон швидкостей вентилятора 6-8 м/с, а отже його потужність, є найбільш сприятливими. При середній швидкості вентилятора 7 м/с середня об'ємна швидкість в печі, яка до речі головним чином визначає процеси конвективного тепло-

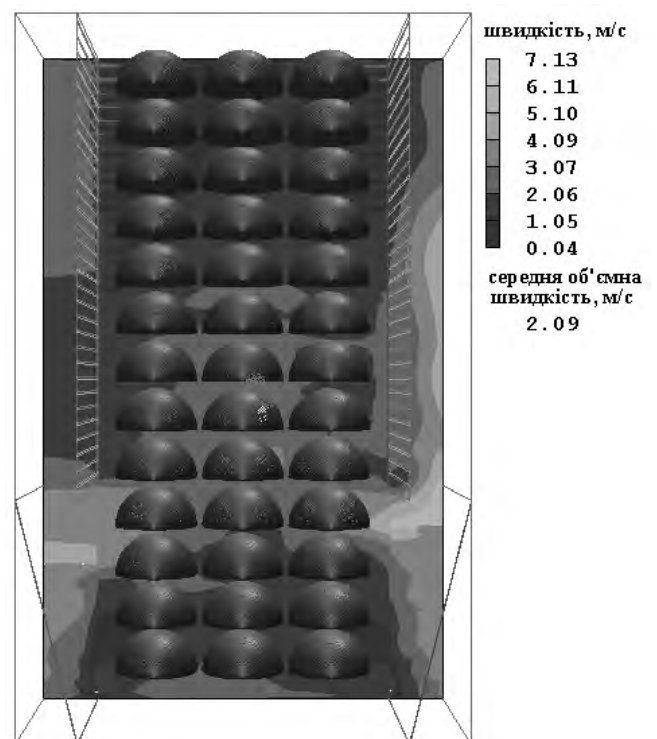


Рис. 15. Розподіл швидкостей. Швидкість потоку з вентилятора – 8 м/с. Зріз наведено для $Y \approx 450$ мм.

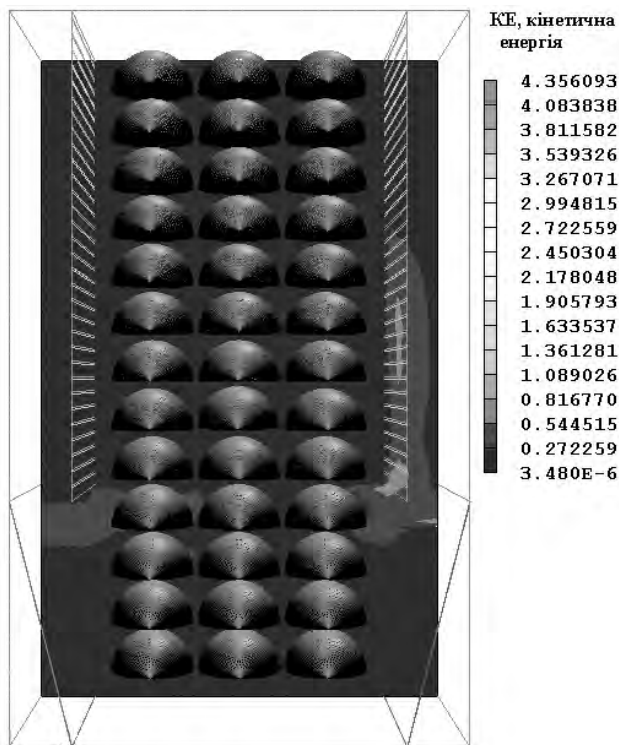


Рис. 16. Розподіл кінетичної енергії в модернізованій печі при наявності імітаторів буханок. Швидкість потоку з вентилятора – 6 м/с. Зріз наведено для $Y \approx 450$ мм.

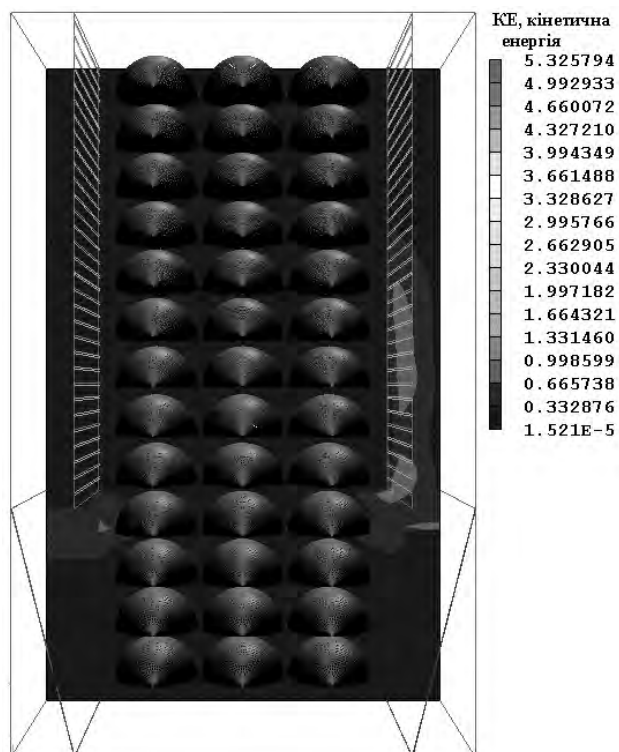


Рис. 17. Розподіл кінетичної енергії. Швидкість потоку з вентилятора – 8 м/с. Зріз наведено для $Y \approx 450$ мм.

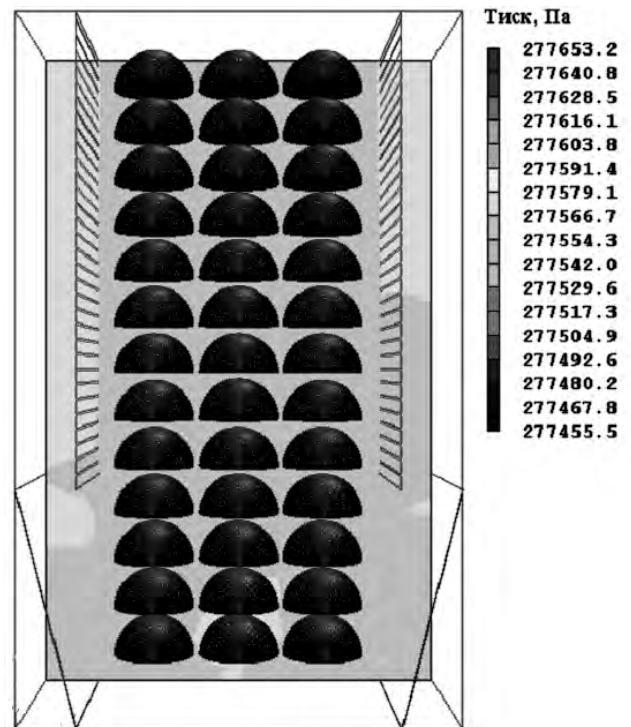


Рис. 18. Розподіл тиску. Швидкість потоку з вентилятора – 6 м/с. Зріз наведено для $Y \approx 450$ мм.

обміну, становить 1,99 м/с. Розподіл швидкості по всій вказаній площині печі достатньо рівномірний і знаходиться в межах 1,5...2,3 м/с.

Для обох значень швидкості вентилятора (6 та 8 м/с, рис. 16 і 17) розподіл кінетичної енергії турбулентності ізотропний по всій площині розрахунків і її значення практично постійне та становить 0,15...0,20 м²/с². Аналогічно практично однорідне поле надлишкового тиску (рис. 18, 19), його значення при швидкості вентилятора 6 м/с становить 27,7 кПа, а при 8 м/с – 19,8 кПа, що дещо більше, ніж в печі без імітаторів.

ВИСНОВКИ

1. Проведені розрахунки дають змогу зробити уточнення щодо вибору швидкості для вентилятора та ролі направляючих для рівномірного обтікання повітрям хлібобулочних виробів. Швидкість повітря в печі при однакових швидкостях вентилятора більша у випадку наявності двох типів направляючих, що зумовлено обминанням та обтіканням потоком застійних зон печі (місця сходження стінок, кути камери, нижня частина камери тощо) і відповідним збільшен-

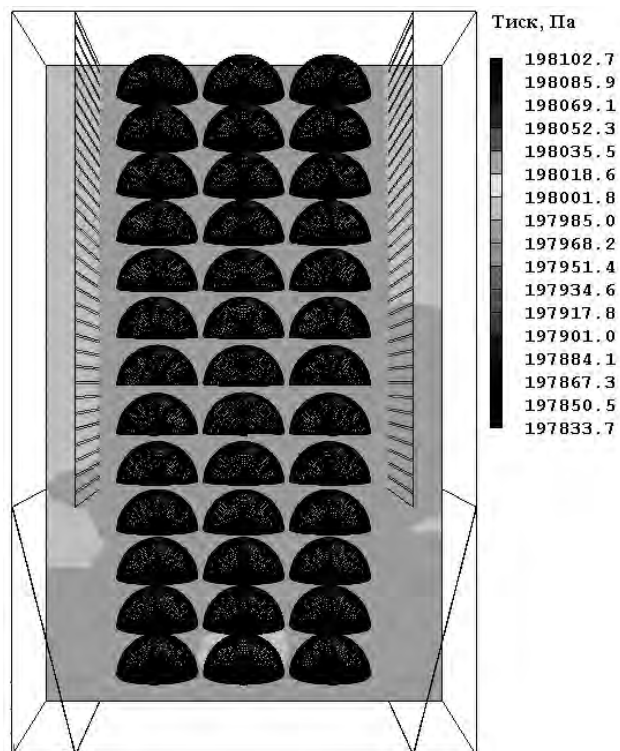


Рис. 19. Розподіл тиску. Швидкість потоку з вентилятора – 8 м/с. Зріз наведено для $Y \approx 450$ мм.

ням швидкості потоків в центральній частині камери печі. Однак це збільшення швидкості не перевищує верхню границю оптимальної для робочої області швидкості, яка дорівнює 3 м/с. Додавання вертикальних направляючих дозволяє використовувати менш потужний вентилятор (з на 20% меншою встановленою потужністю), що

приводить до енергозаощадження, зберігаючи при цьому якість продукції, що випікається.

2. Використання розробленої методики моделювання досліджуваних процесів скорочує час та матеріальні витрати, необхідні для проведення експериментальних випробувань при модернізації існуючих зразків та створення нових. Приведена методика розрахунку дозволяє аналізувати поля швидкостей, поля кінетичної енергії турбулентності, поля функцій току, поля динамічних тисків в робочих областях печей різного типу та відповідно оптимізувати енергетичні витрати та час випічки якісної продукції. Це дозволяє економити енергетичні, а в деяких випадках і матеріальні ресурси.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Lauder B.E. and Spalding D.B.* The numerical computation of turbulent flows // *Comp. Meth. in Appl. Mech. & Eng.*, 1974. Vol. 3. P. 269.
2. *Накорчевский А.И., Басок Б.И.* Гидродинамики и тепломассоперенос в гетерогенных системах и пульсирующих потоках (под ред. А.А. Долинского). – К.: Наукова думка, 2001. – 348 с.
3. *Авраменко А.А., Басок Б.И., Кузнецов А.В.* Групповые методы в теплофизике. – К.: Наукова думка, 2003. – 484 с.

Получено 30.10.2006 г.

УДК 629.54

ЩЕДРОЛОСЕВ А.В.

Национальный университет кораблестроения имени адмирала Макарова

ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЙ СПОСОБ ПОДОГРЕВА И ПЕРЕКАЧИВАНИЯ ЗАПАСОВ ТЯЖЕЛЫХ ТОПЛИВ НА ДИЗЕЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СУДАХ

Приведено результати розрахунково-аналітичного дослідження енергоефективності паливних підсистем судно-

Приведены результаты расчетно-аналитического исследования энергоэффективности топливных подсистем

The results of calculated-analytical probing of power efficiency of fuel inter-systems of ship propulsive plants of diesel