

КРЕТЮК ВАДИМ

Хмельницький національний університет

e-mail: kretiukv@gmail.com

СОКОЛАН ЮЛІЯ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0002-0273-5719>

e-mail: sokolan.julia@gmail.com

МАЙДАН ПАВЛО

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-3319-8730>

e-mail: maidanps@gmail.com

НЕЙМАК ВІТАЛІЙ

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0003-1204-3932>

e-mail: neimakvi@khmnu.edu.ua

ВДОСКОНАЛЕННЯ КОНСТРУКЦІЇ ПОБУТОВОГО ХОЛОДИЛЬНИКА З МЕТОЮ ЗМЕНШЕННЯ ТЕПЛОВИХ ВТРАТ

З жовтня 2025 року відповідно до Постанови №1181 Кабінету Міністрів України в Україні починають діяти нові класи енергоефективності побутової техніки, які відповідають новому Європейському стандарту енергоефективності. За новим стандартом побутова техніка, яка в минулому мала клас енергоефективності A+++, тепер буде відповідати класу енергоефективності D. Актуальності набуває питання вдосконалення існуючих конструкцій побутової техніки, а саме найбільш поширених побутових двокамерних холодильників, з метою зменшення теплових втрат, в результаті чого зросте клас енергоефективності.

В роботі наведено вдосконалення конструкції двокамерного побутового холодильника, а саме: додавання вакуумно-ізолюваної панелі товщиною 20 мм по передній стінці холодильника, додавання VIP товщиною 30 мм по задній стінці ПХ із зменшенням товщини задньої стінки ПХ з 80 до 60 мм з метою зменшення втрат корисного об'єму холодильної та морозильної камер, зменшення зазору між стінками ПХ та VIP, в результаті чого збільшиться тепловий шлях та зменшиться ширина теплових мостів, збільшення довжини VIP, перенесення компресорного відсіку із нижньої частини холодильника у верхню.

Для моделювання та розрахунку теплових втрат використовувався програмний комплекс COMSOL Multiphysics. Запровадження таких вдосконалень дозволяє за результатами моделювання зменшити теплові втрати від 33 до 65 % в окремих конструктивних елементах холодильника, а загальні теплові втрати зменшуються на 47%.

Окрім запропонованих вдосконалень, які зменшують теплові втрати у ПХ на 42%, також запропоновано змінити конструкцію ущільнювача. В роботі запропоновано два варіанти конструкції ущільнювача – із круглими та ромбоподібними камерами. Ущільнювач із круглими камерами дозволяє зменшити теплові втрати від 33 до 38%, а ущільнювач із ромбоподібними камерами – на 38-39%. Враховуючи, що при виготовленні ущільнювача із круглими камерами витрата матеріалу на його виготовлення зменшується на 7%, в той час як при виготовленні ущільнювача із ромбоподібними камерами витрата матеріалу зменшується на 25%, то найбільш оптимальним варіантом ущільнювача буде ущільнювач із ромбоподібними камерами.

Ключові слова: побутовий холодильник, теплові втрати, клас енергоефективності, ущільнювач, компресор, теплові навантаження.

KRETIUK VADYM, SOKOLAN IULIA,**MAIDAN PAVLO, VITALII NEIMAK**

Khmelnitskiy National University

IMPROVEMENT OF THE DESIGN OF A DOMESTIC REFRIGERATOR WITH THE AIM OF REDUCING HEAT LOSSES

From October 2025, in accordance with Resolution No. 1181 of the Cabinet of Ministers of Ukraine, new energy efficiency classes for household appliances will come into force in Ukraine, which comply with the new European energy efficiency standard. Under the new standard, household appliances that previously had an A+++ energy efficiency class will now correspond to energy efficiency class D. The issue of improving the existing designs of household appliances, namely the most common two-compartment refrigerators, in order to reduce heat loss and thereby increase energy efficiency, is becoming increasingly relevant.

The paper presents improvements to the design of a two-compartment household refrigerator, namely: the addition of a 20 mm thick vacuum-insulated panel on the front wall of the refrigerator, adding a 30 mm thick VIP to the rear wall of the refrigerator with a reduction in the thickness of the rear wall of the refrigerator from 80 to 60 mm in order to reduce the loss of useful volume in the refrigerator and freezer compartments, reducing the gap between the walls of the refrigerator and VIP, which will increase the heat path and reduce the width of thermal bridges, increasing the length of the VIP, moving the compressor compartment from the bottom of the refrigerator to the top.

The COMSOL Multiphysics software package was used to model and calculate heat losses. The introduction of these improvements allows, according to the modelling results, to reduce heat losses from 33 to 65% in individual structural elements of the refrigerator, and total heat losses are reduced by 47%.

In addition to the proposed improvements, which reduce heat loss in the refrigerator by 42%, it is also proposed to change the design of the gasket. The paper proposes two gasket designs – with round and diamond-shaped chambers. A gasket with round chambers reduces heat loss by 33 to 38%, and a gasket with diamond-shaped chambers reduces it by 38 to 39%. Considering that the manufacture of a gasket with round chambers reduces material consumption by 7%, while the material consumption for manufacturing a gasket with diamond-shaped chambers is reduced by 25%, the most optimal gasket option would be a gasket with diamond-shaped chambers.

Keywords: domestic refrigerator, heat loss, energy efficiency class, gasket, compressor, heat load.

Стаття надійшла до редакції / Received 01.10.2025

Прийнята до друку / Accepted 15.11.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Температурний режим зберігання харчових продуктів є критично важливим для збереження їх якості, свіжості, поживних властивостей, тощо. Низька температура зберігання сповільнює псування харчової продукції, а також мінімізує можливість розмноження бактерій. Для дотримання температурного режиму зберігання продукції як в побуті, так і в галузі харчової промисловості використовується ряд холодильного обладнання. До такого обладнання відносяться достатньо поширені холодильні камери, шафи, вітрини та столи, та холодильні машини спеціального призначення, наприклад холодильні шафи для вин або суші-кейси.

Одним із найбільш поширених видів холодильної техніки є побутові холодильники, оскільки вони встановлені у кожному житловому осередку. Побутові холодильники мають ряд конструкцій, до яких відносяться однокамерні, двокамерні, з французькими дверцятами, ті, що вбудовуються, тощо.

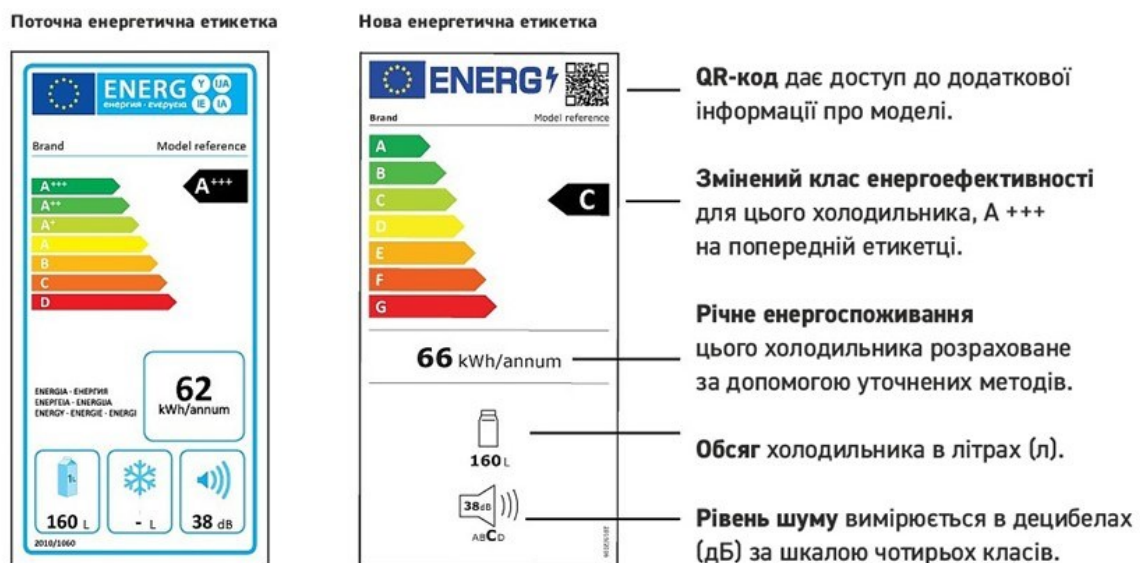
Холодильна техніка потребує використання електричної енергії. Зменшення витрат енергоспоживання такої техніки має важливе значення, оскільки в результаті можна досягти заощадження коштів на електроенергію, зменшити навантаження на електромережу, тощо. Отже, актуальності набуває питання щодо вдосконалення конструкції побутового холодильника з метою зменшення його теплових втрат, в результаті чого зростає енергоефективність.

Аналіз досліджень та публікацій

В Україні для маркування побутової техніки з точки зору її енергоефективності виконується відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження технічних регламентів щодо енергетичного маркування» [1], який відповідає Директиві ЄС 2010/10/ЕС [2]. Ця Директива діяла в Європейському Союзі з 2010 року, а у 2019 році їй на заміну прийшов новий стандарт енергоефективності, який почав діяти з 2021 року, та було змінено енергетичне маркування побутової техніки [3].

В Україні в енергетичне маркування побутових приладів в Україні було внесено зміни відповідно до Постанови №1181 Кабінету Міністрів України від 15 жовтня 2024 року [4], які почнуть діяти з 18.10.2025 року, які будуть відповідати новому Європейському стандарту енергоефективності [3].

За попереднім Європейським стандартом, тобто за ще діючим стандартом в Україні, класи енергоефективності починались від D, який відповідав техніці із найнижчою енергоефективністю, до A+++ - класу із найвищою енергоефективністю. За новим Європейським стандартом, тобто стандартом, який почне діяти в Україні з жовтня 2025 року, було прийняте рішення клас із найменшою енергоефективністю маркувати літерою G, а найвищий енергоефективності відповідатиме клас A (рис. 1).



Енергетичне маркування холодильника без морозильної камери

Рис. 1. Порівняння змін в енергетичному маркуванні побутової техніки

Окрім змін у маркуванні літерами класів енергоефективності в новому стандарті змінився підхід до визначення класу енергоефективності (KE) побутової техніки. KE визначається на основі індексу енергоефективності EEI , а саме:

$$EEI = \frac{AE}{SAE} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де AE – річне енергоспоживання, кВт·год/рік; SAE – стандартне еталонне енергоспоживання, кВт·год/рік.

Основні зміни при розрахунку KE стосуються річного споживання технікою електроенергії. В результаті запроваджених Європейським стандартом змін змінилась шкала та значення індексу енергоефективності (табл. 1).

Зміни в класах енергоефективності побутової техніки

Клас енергоефективності за діючим стандартом до 10.2025 [1]	Клас енергоефективності за Європейським стандартом від 2019 року [2, 4]	Індекс енергоспоживання
	A	$EEI < 41$
	B	$41 \leq EEI < 51$
	C	$51 \leq EEI < 64$
A+++	D	$64 \leq EEI < 80$
A++	E	$80 \leq EEI < 100$
A+	F	$100 \leq EEI < 125$
G, F, E, D, C, B	G	$EEI \geq 125$

Як видно з таблиці 1, побутова техніка, яка за попереднім стандартом мала найвищий клас енергоефективності A+++ за новим стандартом займає лише четверте із семи можливих класів. Таке пониження класу енергоефективності буде спостерігатись для всіх видів побутової техніки, в тому числі, і побутових холодильників.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є: зменшення енергоспоживання побутового двокамерного холодильника до його відповідності найвищому класу енергоспоживання A за новим Європейським стандартом, який починає діяти в Україні із жовтня 2025 року.

Виклад основного матеріалу

Для досягнення поставленої мети в першу чергу необхідно визначити теплові втрати конструктивних елементів побутового холодильника. В якості еталонного зразка було обрано найбільш поширений вид побутових холодильників (ПХ) – це двокамерний ПХ, у нижній частині якого розміщена морозильна камера, а у верхній – холодильна камера. Крім того, було обрано ПХ найбільш поширеного розміру, а саме глибина і ширина 0,6 м, а висота – 1,8 м.

Для моделювання теплових втрат у конструктивних елементах ПХ у програмному комплексі SolidWorks [5] було побудовано моделі перерізів ПХ, які в подальшому використовувались в програмному комплексі COMSOL Multiphysics [6]. Ці площини наведені на рисунку 2. В такому ПХ використовуються три різні види матеріалів, а саме: пінополіуретанова піна у дверцятах, вакуумні ізолювані панелі та ПВХ ущільнювач.

Процес моделювання теплових втрат починався із створення сітки, мінімальний розмір елементів якої становив 13,4 мкм. В результаті було змодельовано кількість тепла, що передається по кожному із конструктивних елементів ПХ, а саме: холодильного відсіку (q_{fresh}), морозильного відсіку (q_{3star}), окремо дверцят холодильного (q_{door}) та морозильного відсіків (q_{doorfr}) та загальна кількість тепловтрат (q_{total}). Результати моделювання наведені у таблиці 2.

Для визначення тепла від навколишнього середовища, яке має вплив на ПХ ззовні, була побудована тривимірна модель, після чого було змодельовано розподіл температур (рис. 3). Аналогічно до перерізів по площинам, було проведено розрахунок теплових втрат тривимірної моделі ПХ.

Після аналізу даних з таблиці 2 видно, що найбільші тепловтрати характерні для морозильної камери, а саме вони становлять втричі більші значення за тепловтрати холодильної камери. Від загальної кількості тепловтрат втрати в морозильній камері становлять 60%.

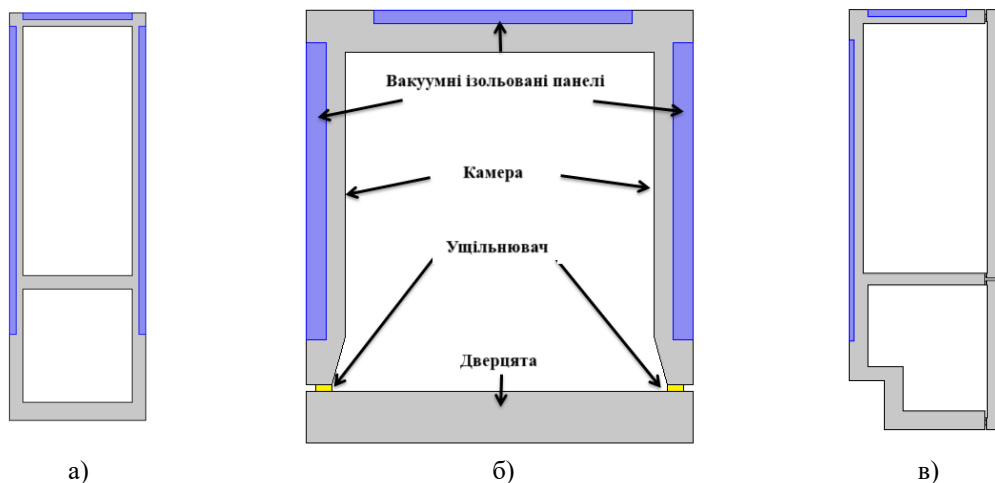


Рис. 2. Перерізи побутового двокамерного холодильника:
а – передня площина; б – верхня площина; в – права площина

Таблиця 2

Теплові втрати в конструктивних елементах побутового холодильника по площинам					
Модель	Кількість тепла, Вт/м				
	q_{doorfr}	q_{door}	q_{zstar}	q_{fresh}	q_{total}
Двовимірна права	7,33	4,37	24,62	4,4	24,62
Двовимірна передня	-	-	17,43	0,67	18,90
Двовимірна верхня	-	2,18	-	-	10,94
Тривимірна	5,44	5,19	21,91	13,35	35,26

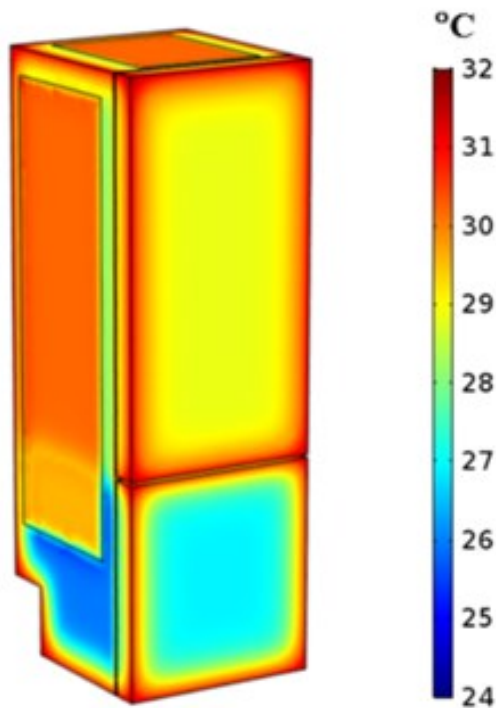


Рис. 3. Тепловтрати в тривимірній моделі ПХ

Для покращення класу енергоефективності побутової техніки необхідно зменшити теплові втрати. На першому етапі пропонується виконати наступні вдосконалення конструкції двокамерного ПХ у верхньому перерізі (рис. 4, а):

1. додати вакуумну ізольовану панель (ВІП) товщиною 20 мм по передній стінці ПХ;
2. додати ВІП товщиною 30 мм по задній стінці ПХ із зменшенням товщини задньої стінки ПХ з 80 до 60 мм з метою зменшення втрат корисного об'єму холодильної та морозильної камер;
3. зменшити зазор між стінками ПХ та ВІП, в результаті чого збільшиться тепловий шлях та зменшиться ширина теплових мостів;
4. збільшення довжини ВІП.

Для кожного із етапів вдосконалення конструкції ПХ було проведено моделювання теплових втрат у порівнянні із початковою еталонною моделлю. Результати наведені у таблиці 3. Як видно, такі вдосконалення конструкції дозволяють зменшити теплові втрати на 39%.

Таблиця 3

Теплові втрати початкової та вдосконаленої конструкції ПХ (верхня площа)			
Етап вдосконалення конструкції	Тепловтрати, Вт/м		Зменшення тепловтрат, %
	q_{total}	q_{door}	
Початкова модель	10,94	4,18	-
Вдосконалення 1	8,87	2,3	19
Вдосконалення 2	7,5	2,03	31
Вдосконалення 3	6,92	1,99	37
Вдосконалення 4	6,66	1,52	39

Аналогічно до верхнього перерізу, було запропоновано вдосконалення у передньому перерізі ПХ (рис. 4, б) та змодельовано зміни теплових втрат (табл. 4), а саме:

1. збільшення розміру ВІП – зменшення тепловтрат на 28%;
2. додавання ВІП товщиною 30 мм в нижній частині ПХ та зменшення товщини стінки з 80 мм до 60 мм з метою збереження корисного об'єму камери – зменшення тепловтрат на 42%;
3. додавання ВІП між холодильним та морозильним відсіком – зменшення тепловтрат на 43%.

При вдосконаленні конструкції у правому перерізі (рис. 4, в) пропонується виконати наступні етапи, а зменшення теплових втрат на кожному наведено у таблиці 5:

1. перемістити компресорний відсік із нижньої частини ПХ у верхню;
2. перемістити горизонтальну ВІН з верхньої частини морозильного відсіку у нижню;
3. додати ВІП між морозильним та холодильним відсіками.

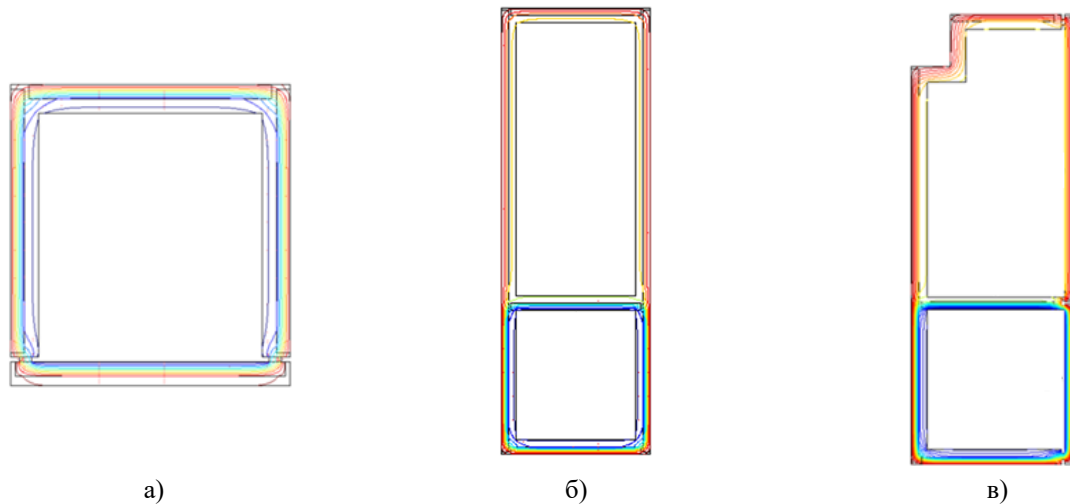


Рис. 4. Моделювання тепловтрат по площинам після вдосконалень:
а – верхня площина; б – передня площина; в – права площина

Таблиця 4

Теплові втрати початкової та вдосконаленої конструкції ПХ (передня площина)

Етап вдосконалення конструкції	Тепловтрати, Вт/м			Зменшення тепловтрат, %
	q_{total}	q_{doorfr}	q_{door}	
Початкова модель	26,56	22,07	4,5	-
Вдосконалення 1	19,05	14,98	4,07	28
Вдосконалення 2	15,39	11,32	4,07	42
Вдосконалення 3	15,30	9,01	6,29	43

Таблиця 5

Теплові втрати початкової та вдосконаленої конструкції ПХ (права площина)

Етап вдосконалення конструкції	Тепловтрати, Вт/м					Зменшення тепловтрат, %
	q_{total}	q_{doorfr}	q_{door}	q_{3star}	q_{fresh}	
Початкова модель	35,57	9,88	8,57	25,68	9,88	-
Вдосконалення 1	14,77	-	-	10,38	4,39	14
Вдосконалення 2	11,59	-	-	6,82	4,77	33
Вдосконалення 3	21,23	4,66	3,57	12,35	8,55	41

Після моделювання теплових втрат в двовимірних площинах, було проведено моделювання теплових втрат після запровадження вищеперерахованих вдосконалень у тривимірній моделі. Результати моделювання наведені у таблиці 6. Як видно, такі вдосконалення конструкції дозволяють зменшити теплові втрати на 42%.

Оскільки одні з основних теплових втрат при моделюванні роботи ПХ спостерігаються між холодильною та морозильними камерами в області дверцят, актуальним також є вдосконалення конструкції ущільнювача. Пропонується два варіанти конструкцій ущільнювача – із перерізом круглої та ромбоподібної форми (рис. 5, б, в). Початкова конструкція ущільнювача наведена на рисунку 5, а. Конструкція ущільнювача, яка передбачає наявність камер, дозволить зменшити природну конвекцію, завдяки чому зменшиться кількість тепла, що передається через ці камери.

Таблиця 6

Теплові втрати початкової та вдосконаленої конструкції ПХ (тривимірна модель)

Конструкція	Тепловтрати, Вт/м					Зміна тепловтрат, %
	q_{total}	q_{doorfr}	q_{door}	q_{3star}	q_{fresh}	
Початкова	35,26	5,44	5,19	21,91	13,35	-
Вдосконалена	20,5	2,15	2,04	11,15	9,34	42%

Площа початкової конструкції ущільнювача становить 31,15 мм², в той час як ущільнювача із круглими камерами – 28,85 мм², а із ромбоподібними камерами – 23,29 мм². Тобто, витрата матеріалу при виготовленні таких ущільнювачів буде менша на 7% у випадку камер круглої форми і на 25% у випадку камер ромбоподібної форми. Отже, собівартість виготовлення ущільнювача у порівнянні із початковою конструкцією буде менша.

В програмі COMSOL Multiphysics було виконано моделювання швидкості потоку повітря в ущільнювачах із круглими та ромбоподібними камерами (рис. 6). За результатами моделювання видно, що в ущільнювачах із круглими камерами найвища швидкість потоку повітря спостерігається у першій камері зі сторони холодного відсіку.

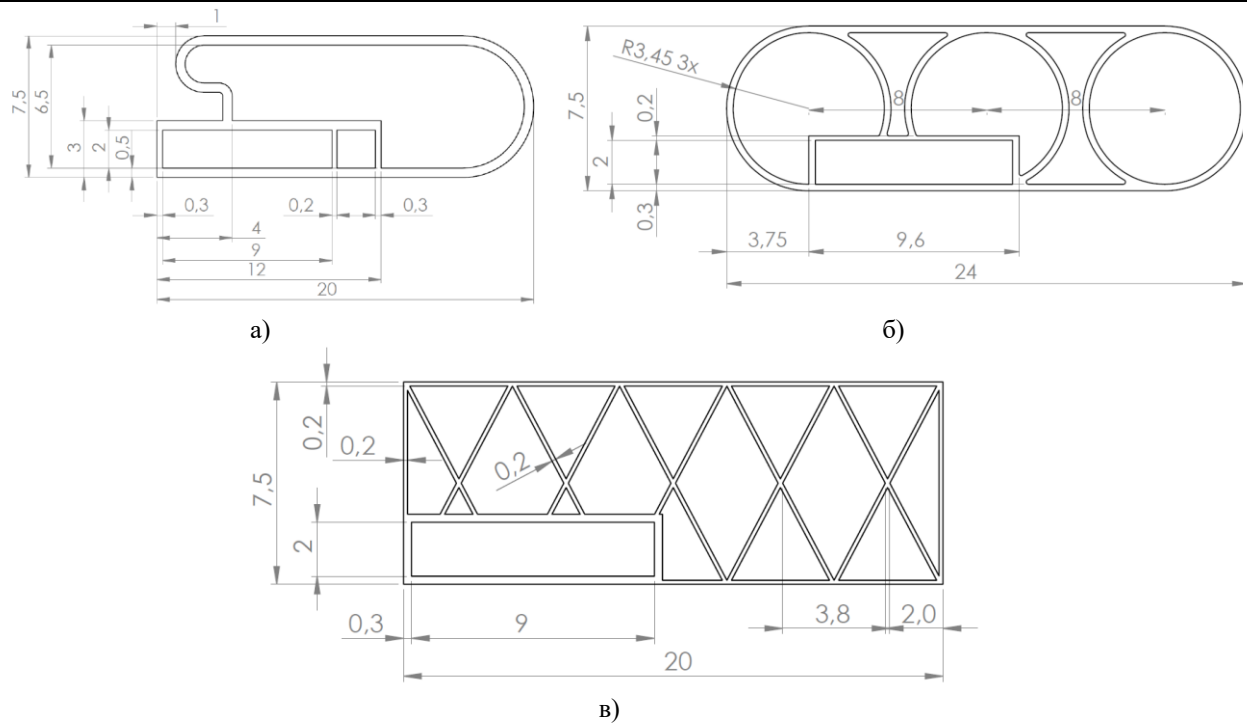


Рис. 5. Конструкція ущільнювача ПХ:
а – початкова конструкція; б – із круглими камерами; в – із ромбоподібними камерами

Було змодельовано теплові втрати в ущільнювачах із круглими та ромбоподібними камерами при двох різних температурах навколишнього середовища – 16 та 32 °С. Результати наведені у таблиці 7.

Як видно з таблиці 7, при використанні ущільнювача із круглими камерами досягається зменшення теплових втрат від 33 до 39% від теплових втрат при використанні ущільнювача початкової форми, а у випадку ущільнювача із ромбоподібними камерами теплові втрати зменшуються в межах від 38 до 39%.

Враховуючи, що при використанні ущільнювача із ромбоподібними камерами також на 25% зменшується витрата матеріалу, то найбільш оптимальним варіантом конструкції є використання ущільнювача із ромбоподібними камерами (рис. 5, в).

Таблиця 7

Порівняння теплових втрат в ущільнювачах різної конструкції

Камери круглої форми				Ромбоподібні камери			
Температура навколишнього повітря, ° С	Камера	Тепло, що передається, Вт/м	Зменшення тепловтрат, %	Температура навколишнього повітря, ° С	Камера	Тепло, що передається, Вт/м	Зменшення тепловтрат, %
16	Холодильна	0,074	-33	16	Холодильна	0,069	-38
32		0,19	-36	32		0,185	-37
16	Морозильна	0,231	-38	16	Морозильна	0,228	-39
32		0,355	-39	32		0,355	-39

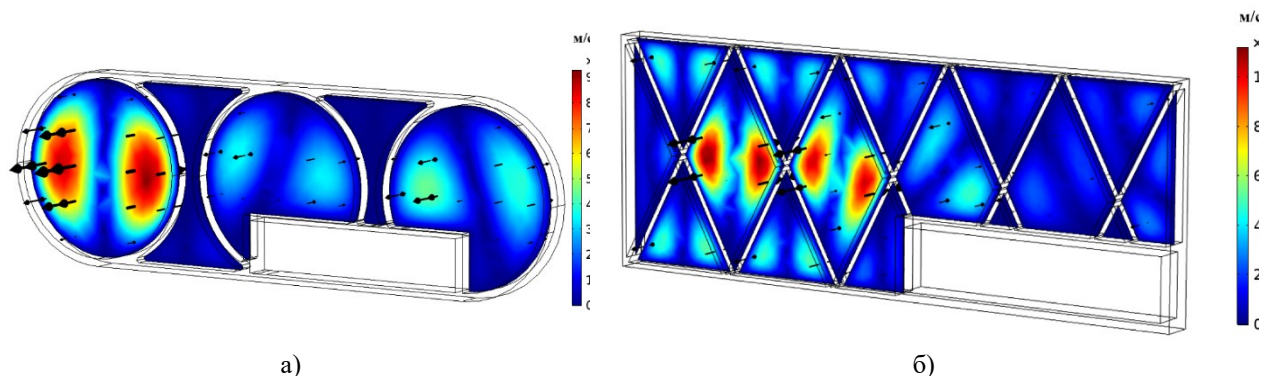


Рис. 6. Швидкість потоку повітря в камерах ущільнювача:
а – камери круглої форми; б – камери ромбоподібної форми

Після запровадження всіх вищезазначених вдосконалень було виконано розрахунок тепловтрат у порівнянні із еталонною моделлю. Результати розрахунків наведені у таблиці 8.

Таблиця 8

Порівняння теплових втрат вдосконаленої та початкової конструкції побутового холодильника

Конструкція	Тепловтрати, Вт/м					
	q_{total}	q_{doorfr}	q_{door}	q_{3star}	q_{gasket}	q_{fresh}
Початкова	35,67	5,58	5,32	21,84	2,04	13,83
Вдосконалена	18,81	1,96	1,9	10,19	1,31	8,62
Відносна різниця, %	47	65	64	53	36	38

Висновки

В роботі запропоновано ряд вдосконалень конструкції двокамерного побутового холодильника з метою зменшення теплових втрат, а отже і зростання класу енергоефективності. До цих вдосконалень відносяться: додавання вакуумно ізолюваної панелі товщиною 20 мм по передній стінці холодильника, додавання ВПП товщиною 30 мм по задній стінці ПХ із зменшенням товщини задньої стінки ПХ з 80 до 60 мм з метою зменшення втрат корисного об'єму холодильної та морозильної камер, зменшення зазору між стінками ПХ та ВПП, в результаті чого збільшиться тепловий шлях та зменшиться ширина теплових мостів, збільшення довжини ВПП, перенесення компресорного відсіку із нижньої частини холодильника у верхню.

Окрім запропонованих вдосконалень, які зменшують теплові втрати у ПХ на 42%, також запропоновано змінити конструкцію ущільнювача. В роботі запропоновано два варіанти конструкції ущільнювача – із круглими та ромбоподібними камерами. Ущільнювач із круглими камерами дозволяє зменшити теплові втрати від 33 до 38%, а ущільнювач із ромбоподібними камерами – на 38-39%. Враховуючи, що при виготовленні ущільнювача із круглими камерами витрата матеріалу на його виготовлення зменшується на 7%, в той час як при виготовленні ущільнювача із ромбоподібними камерами витрата матеріалу зменшується на 25%, то найбільш оптимальним варіантом ущільнювача буде ущільнювач із ромбоподібними камерами.

Запропоновані вдосконалень конструкції двокамерного побутового холодильника дозволяють зменшити тепловтрати в ущільнювачі на 36%, тепловтрати в дверцятах морозильної та холодильної камери на 65% та 64% відповідно, тепловтрати морозильної камери на 53%, а загальні тепловтрати на 47%. В результаті запровадження таких вдосконалень відповідно до нового стандарту енергоефективності побутової техніки клас енергоефективності двокамерного побутового холодильника зміниться із класу D до класу A.

Література

1. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження технічних регламентів щодо енергетичного маркування». [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/702-2013-%D0%BF#Text>
2. Directive 2010/30/EU. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/30/oj/eng>
3. New energy efficiency labels explained. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/memo_19_1596
4. Постанова №1181 Кабінету Міністрів України від 15 жовтня 2024 року «Про внесення змін та визнання такими, що втратили чинність, деяких постанов Кабінету Міністрів України щодо екодизайну та енергетичного маркування». [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1181-2024-%D0%BF>
5. Комп'ютерна графіка: SolidWorks: навчальний посібник / М.М. Козяр, Ю.В. Фещук, О.В. Парфенюк. – Херсон: Олді-плюс, 2018. – 252 с.
6. COMSOL Multiphysics. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/COMSOL_Multiphysics

References

1. Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine “On Approval of Technical Regulations on Energy Labelling.” [Electronic resource]. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/702-2013-%D0%BF#Text>
2. Directive 2010/30/EU. [Electronic resource]. Access mode: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2010/30/oj/eng>
3. New energy efficiency labels explained. [Electronic resource]. Access mode: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/memo_19_1596
4. Resolution No. 1181 of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated October 15, 2024, “On Amendments and Recognition of Certain Resolutions of the Cabinet of Ministers of Ukraine on Ecodesign and Energy Labeling as Invalid.” [Electronic resource]. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1181-2024-%D0%BF>
5. Computer graphics: SolidWorks: textbook / M.M. Kozyar, Yu.V. Feshchuk, O.V. Parfeniuk. – Kherson: Oldi-plus, 2018. – 252 p.
6. COMSOL Multiphysics. [Electronic resource]. Access mode: https://uk.wikipedia.org/wiki/COMSOL_Multiphysics