

ОСОБЛИВОСТІ УТЕПЛЕННЯ ПОРИСТИМИ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИМИ МАТЕРІАЛАМИ БУДІВЕЛЬ ЛІНІЙНИХ ВИРОБНИЧИХ УПРАВЛІНЬ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВОДІВ

Л.П. Шумська, О.М. Зотова, А.Т. Маркін

*ПКНГ ПолтНТУ; 36021, м. Полтава, вул. М. Грушевського, 2а, тел./факс(0532) 638148,
e-mail: pkn g @ u k r . n e t*

Розглядаються механізми реалізації державної політики у сфері енергетики, що спрямовані на стимулювання підвищення енергоефективності та упровадження енергозберігаючих технологій.

Розглядаються особливості тепловологісних процесів у виробничих будівлях, аналізуються методи утеплення огороджуючих конструкцій, перебіг теплових і вологісних процесів, що відбуваються в огороджувальних конструкціях виробничих будівель.

Запропоновано рівняння теплового балансу повітряного середовища виробничих приміщень, теплового балансу променевих теплових потоків повітряного середовища виробничих приміщень.

Звіди для оцінки кількісного ефекту утеплення виробничої будівлі створено математичну модель перехідних теплових процесів у виробничих будівлях, побудовано систему рівнянь теплового балансу еквівалентного опалювального приладу водотрубною системою опалення.

Отриману інформацію закладено в основу методики розрахунку параметрів мікроклімату у будівлях лінійних виробничих управлінь магістральних газопроводів.

Розглянуто доцільність утеплення виробничих будівель пористими теплоізоляційними матеріалами, а саме: адміністративної будівлі, операторної, складу паливно-мастильних матеріалів, циркуляційної насосної станції, будівель лінійно-експлуатаційної служби, ремонтної групи, котельні.

Ключові слова: енергозбереження, енергоефективність, теплоізоляційні вироби, математичне моделювання, огороджувальна конструкція, теплопровідність, тепловологісні процеси.

Освещены механизмы реализации государственной политики в сфере энергетики, направленные на стимулирование повышения энергоэффективности и внедрения энергосберегающих технологий.

Рассматриваются особенности тепловлажностных процессов в производственных зданиях, анализируются методы утепления ограждающих конструкций, протекание тепловых и влажностных процессов, происходящих в ограждающих конструкциях производственных зданий.

Предлагается уравнение теплового баланса воздушной среды производственных помещений, теплового баланса лучевых тепловых потоков воздушной среды производственных помещений.

Для оценки количественного эффекта утепления производственного здания создана математическая модель переходных тепловых процессов в производственных зданиях, построена система уравнений теплового баланса эквивалентного отопительного прибора водотрубною системы отопления.

Полученная информация положена в основу методики расчета параметров микроклимата в зданиях линейных производственных управлениях магистральных газопроводов.

Рассмотрена целесообразность утепления производственных зданий пористыми теплоизоляционными материалами, в том числе: административного здания, операторной, склада горюче-смазочных материалов, циркуляционной насосной, зданий линейно-эксплуатационной службы, ремонтной группы, котельной.

Ключевые слова: энергосбережение, энергоэффективность, теплоизоляционные изделия, математическое моделирование, ограждающая конструкция, теплопроводность, тепловлажностные процессы.

The mechanisms for implementing the state policy in the sphere of energy directed at energy efficiency and introduction of energy-saving technologies are described.

The peculiarities of heat and humidity processes in industrial buildings are studied; the methods of walls warmth-keeping, the behavior of heat and humidity processes in the walls of industrial buildings are analyzed.

The heat-balance equation of air environment in industrial buildings and the heat-balance of beam thermal flow of air environment in industrial buildings are proposed.

A mathematical model of transitional thermal processes in industrial buildings has been introduced to assess the quantity effect of warmth-keeping. A system of heat-balance equation of equivalent heater of the heating system is built.

The obtained information is taken as a basis for calculation of microclimate parameters in local gas transmission facilities.

The article also describes the usefulness of warmth-keeping of industrial buildings by means of porous frost-protection materials, as well as of administrative buildings, operator's room, fuel and lubricant storage, circulating-water pump house, line maintenance buildings, repair unit and boiler room.

Key words: energy saving, energy efficiency, heat-insulation materials, mathematical modelling building envelope, thermal conductivity, heat-and-humidity processes.

Вступ

Енергозбереження полягає у зменшенні споживання енергії за рахунок використання

меншої кількості енергетичних послуг. В Україні прийнято Закон про енергозбереження, в якому термін енергозбереження визначається як «діяльність, яка спрямована на раціональне

використання та економне споживання первинної та перетвореної енергії і природних енергетичних ресурсів» [1].

В сучасних умовах дефіциту ресурсів, особливо паливно-енергетичних, ефективне функціонування підприємств можливе лише завдяки активному впровадженню заходів з енергозбереження. Тому енергозбереження стає фактором розвитку і конкурентоспроможності національного виробництва [2].

Енергоефективність є одним з аспектів енергозбереження. Під енергоефективністю розуміють раціональне використання енергетичних ресурсів, досягнення економічно доцільної ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів при дійсному рівні розвитку техніки і технології та дотриманні вимог до навколишнього середовища.

Енергозбереження відрізняється від енергоефективності тим, що спрямоване на зменшення споживання енергії, а енергоефективність – це корисна, ефективна витрата енергії.

Енергетична ефективність є одним із пріоритетів ЄС. Україна, ставши повноправним членом Енергетичного Співтовариства, взяла на себе зобов'язання імплементувати ряд європейських директив і регламентів у сфері енергоефективності. На сучасному етапі розвитку ЄС енергетична політика є одним із провідних напрямків, що забезпечує енергетичну безпеку країн-членів ЄС та сприяє підвищенню енергоефективності. Так, у 2008 р. Міжнародним енергетичним агентством (МЕА) був опублікований список рекомендацій урядам щодо заходів у сфері підвищення енергоефективності в різних секторах:

- міжсекторальні заходи політики: заходи щодо стимулювання інвестицій в енергетичну
- ефективність; дотримання, реалізація, контроль й оцінка заходів з підвищення енергетичної ефективності;
- будівлі: будівельні норми і правила для нових будівель; пасивні будинки та будинки нульової енергії; пакет заходів політики, спрямованих на підвищення енергетичної ефективності в існуючих будівлях; схеми сертифікації будівель; підвищення енергетичної ефективності світлопрозорих конструкцій тощо [4].

Для реалізації Україною потенціалу підвищення енергоефективності і досягнення успішних результатів заходів політики з енергетичної ефективності необхідна найбільш ефективна система керування нею як на рівні країни, так й на рівні окремого підприємства, зокрема й у лінійних виробничих управліннях магістральних газопроводів (ЛВУМГ).

Стосовно заходів з реалізації Національного плану дій з енергоефективності на період до 2020 року, зазначено секторальні заходи з підвищення енергоефективності у 2015-2020 роках, а саме:

- сприяння залученню інвестицій в термомодернізацію житлових будівель, зокрема через реалізацію механізмів здешевлення вартості таких заходів;

– впровадження економічних та нормативно-правових засад укладення енергосервісних договорів щодо термомодернізації будівель бюджетних установ;

– сприяння залученню інвестицій у будівництво споруд з близьким до нульового споживанням енергії з метою збільшення кількості таких споруд;

– сприяння залученню інвестицій в заходи з енергоефективності на об'єктах промисловості [5].

Основні заходи з підвищення енергоефективності промислового підприємства можна звести у певну сукупність, яка поєднуватиме найбільш значущі й ефективні напрямки, такі як:

- утеплення конструкцій огороження будівлі, заміна світлопрозорих конструкцій;
- обладнання систем теплопостачання і водопостачання приладами обліку, модернізація запірно-регулювальної арматури, організаційні заходи, спрямовані на економію ресурсів та енергії;
- обладнання теплових пунктів приладами автоматики, частотними регуляторами продуктивності насосів;
- збільшення ККД котельних агрегатів за рахунок улаштування економайзерів, налаштування оптимальних значень коефіцієнтів надлишку повітря і температури живильної води, теплоізоляції поверхонь котлів, подавання нагрітого повітря на горіння з верхньої зони приміщень котельні;
- обладнання котельних агрегатів сучасними автоматичними системами керування;
- переведення роботи котельних агрегатів на альтернативні види палива;
- використання теплових насосів для теплопостачання будівель;
- використання сонячних колекторів для виробництва теплової й електричної енергії;
- заміна освітлювальних приладів на енергозберігаючі;
- балансування систем вентиляції та опалення;
- встановлення рекуператорів тепла повітря на системи вентиляції;
- зменшення теплонадходжень у приміщення зі штучним охолодженням;
- зменшення гідравлічних втрат у системах генерації, транспортування і використання стисненого повітря.

Усі ці напрямки енергозбереження загалом можна класифікувати на такі, що вимагають підвищення термічних опорів конструкцій і трубопроводів, автоматизації процесів енергопостачання, встановлення сучасного енергоефективного обладнання, формування організаційних заходів для зменшення втрат енергії, палива й інших ресурсів [6].

Прийняття законопроекту «Про енергетичну ефективність будівель» дозволить комплексно врегулювати суспільні відносини, що виникають у сфері забезпечення енергоефективності будівель, відповідно до вимог Директиви 2010/31/ЄС Європейського Парламенту і Ради

ЄС щодо енергетичної ефективності будівель, зокрема у сфері встановлення мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель, забезпечення їх дотримання, проведення паспортизації енергетичних будівель, фінансування здійснення енергоефективних заходів у будівлях [7].

У результаті впливу на приміщення зовнішнього середовища, системи опалення, вентиляції, тепло- та вологовиділень у приміщеннях формуються параметри мікроклімату будівлі.

Зовнішнє середовище впливає на теплові параметри мікроклімату через огорожувальні конструкції (тут спостерігаються такі процеси, як передача тепла і вологи, інфільтрація та ексфільтрація) та внутрішні енергетичні зв'язки між приміщеннями. Тому тепловий захист будівлі є пасивним чинником формування теплового мікроклімату. Система опалення активно формує внутрішній мікроклімат, нейтралізуючи негативний вплив зовнішнього середовища. Ефективність цих процесів залежить від ефективності теплозахисних властивостей теплоізоляції. Вивчається можливість використання як теплоізоляції розробленого нового пористого матеріалу на основі розчинних гіросилікатів [14].

Аналіз сучасних досліджень

Питаннями дослідження енергоефективності займалися багато вітчизняних і зарубіжних вчених. Проблеми та напрямки підвищення енергоефективності національної економіки, промислового виробництва, аспекти енергоефективності нафтогазового комплексу досліджені у працях Сотник І.М., Сторчак С.О., Суходолі О.М. [10–12]. Проблеми, дослідження механізму й управління потенціалом енергозбереження у промисловому секторі економіки, зокрема й на газотранспортних підприємствах, зображені у роботах Запукляка І.Б., Дзьоби О.Г. [2, 3], Середюк Т.В. [9], Ущиповського К.В. [13].

Теплоізоляційні пористі вироби на основі силікатів та кремнезему належать до найбільш ефективних матеріалів для захисних елементів різного призначення. Отже, проблема створення нових пористих теплоізоляційних матеріалів і технологій їх виробництва є надзвичайно актуальною [8].

У цьому аспекті враховується інформація щодо різних схем утеплюючих конструкцій [15–19], теплофізичних властивостей нових теплоізоляційних матеріалів [17–22] та способів їх виробництва [19–25]. Так, у роботах Е.Г. Братуга і А.М.Павленка [15, 16] наводиться детальний аналіз структури матеріалів, залежності теплофізичних характеристик від структурних показників та закономірності перебігу теплообмінних процесів. Але відсутня інформація щодо впливу на процеси вологості. У роботах [19–22], крім того, теоретично аналізуються процеси перенесення тепла в пористому середовищі, але не враховуються вологовміст та форма пор. Звісно, це призводить до

зниженої оцінки теплопровідності. Роботи [23–25] присвячено розробленню методів формування пористої структури. Але вологісні параметри не досліджувалися. Врахування впливу вологи на інтенсивність теплообмінних процесів в теоретичних моделях – задача складна і, ймовірно, не може бути повною мірою вирішена. Тому тільки експериментальні дані можуть надавати реальні результати щодо зазначеного впливу вологості і їх, звичайно, слід використовувати в теоретичних моделях.

У грудні 2010 р. Верховна Рада України ратифікувала Договір Європейського енергетичного співтовариства (ЕСТ), згідно з яким Україна стала учасником Договору та взяла на себе зобов'язання щодо виконання Директив ЕСТ з питань енергетики, енергозбереження та відновлювальних енергоресурсів. А у 2016 р. державна політика зробила значний крок на шляху до поставлених амбітних цілей, і не останнє значення в цьому відіграв фактор переходу на ринкову ціну газу. На рівні зовнішньої політики Україна приєдналась до Паризької кліматичної угоди, розпочала процедуру вступу до Міжнародного агентства з відновлюваних джерел енергії (IRENA) і продовжує роботу з імплементації європейських директив щодо енергоефективності та екодизайну.

Цілі енергоефективності можна поділити на: здійснюване покращення: споживання енергії або викиди; енергоемність: споживання енергії або викиди на одиницю економічної діяльності; гнучкість: співвідношення зростання споживання енергії або викидів до зростання у ВВП або виробництва; співставний показник: споживання енергії або викиди щодо інших; за угодою: утеплення будівель, встановлення компактних флуоресцентних ламп, економічна енергоефективність [4].

Європейський досвід доводить, що в результаті заходів з енергозбереження (утеплення, встановлення лічильників тощо) споживання енергоресурсів знижується на 30–40 %. Експертами Європейсько-українського енергетичного агентства встановлено, що за допомогою тепло модернізації та капітального ремонту в будинках можна зменшити щорічне споживання і втрати енергії на 10–25 %.

Тому однією з актуальних вимог сучасності є підвищення енергетичної ефективності будівель, що реалізується, насамперед, за рахунок посилення їх теплового захисту. Посилення теплозахисту безпосередньо позначається на поліпшенні теплового комфорту приміщень у холодну пору року. Крім того, зменшення теплового навантаження на опалення при посиленні теплозахисту дозволяє знизити температуру теплоносія. Це призводить до поліпшення теплового комфорту і якості повітря в приміщенні [8].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

За сучасного стану національної економіки країни проблема енергоефективності й енергоз-

береження на рівні держави, промисловості стає актуальною тощо. Тому упровадження механізмів реалізації державної політики в сфері енергоефективності та енергозбереження є надзвичайно актуальним.

Врахування впливу вологи на інтенсивність теплообмінних процесів в теоретичних моделях – задача складна і, ймовірно, не може бути повною мірою вирішена. Тому тільки експериментальні дані можуть надавати реальні результати щодо зазначеного впливу вологості і їх, звичайно, слід використовувати в теоретичних моделях.

Формулювання цілей статті

Пропонуються до вивчення закономірностей формування теплових та вологісних параметрів у будівлях виробничого призначення з використанням нового пористого теплоізоляційного матеріалу, створення математичної моделі перенесення тепла і вологи крізь огорожуючі конструкції виробничих будівель, аналіз впливу матеріалу теплоізоляції на зазначені процеси.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Щоб оцінити кількісний ефект від утеплення будівель, було створено різні математичні моделі перехідних теплових процесів у них та відповідні методики розрахунку енергоефективності.

Метою експериментальних досліджень було визначення тепловологісного стану огорожувальної конструкції будівлі із нового матеріалу, а також оцінювання її ефективності [8].

Для розроблення математичної моделі теплових та вологісних процесів, що відбуваються в огорожувальних конструкціях в умовах динамічного мікроклімату, було створено фізичну модель будівель (рис. 1, 2, 3).

Розглядалися виробничі будівлі ЛВУМГ, які складаються з таких елементів:

- зовнішні теплоємкі огорожувальні конструкції з нового матеріалу (стіни, надпідвальні перекриття, горища);
- зовнішні малотепломісткі конструкції (вікна, балконні двері тощо);
- внутрішні теплоємні огорожувальні конструкції з нового матеріалу (внутрішні перестінки та стіни);
- водотрубна система опалення;
- внутрішнє середовище приміщень (повітря, меблі тощо).

Рівняння теплового балансу повітряного середовища приміщень для такої будівлі буде мати вигляд:

$$-c_B m_B \frac{dt_{B(z)}}{dz} = \sum q_{3H}^K F_{3H}^K + \sum q_{BH}^K F_{BH}^K +$$

$$+ q_{C.O.}^K F_{C.O.}^K \pm \sum_{l=1}^n q_{M.K.}^K F_{M.K.}^K + Q_{\text{ИФ}} + Q_{\text{П}}^K,$$

де c_B – питома теплоємність повітря;

m_B – маса внутрішнього повітря опалювальних приміщень;

$q_{3H}^K, q_{BH}^K, q_{O.P.}^K, q_{M.K.}^K$ – конвективні теплові потоки відповідно до зовнішніх теплоємких та внутрішніх огорожувальних конструкцій, опалювального приладу і малотеплоємних огорожувальних конструкцій;

$F_{3H}^K, F_{BH}^K, F_{O.P.}^K, F_{M.K.}^K$ – площі теплообмінних поверхонь відповідно до конвективних теплових потоків зовнішніх теплоємких та внутрішніх огорожувальних конструкцій, опалювального приладу і малотеплоємних огорожувальних конструкцій;

$Q_{\text{ИФ}}$ – інфільтраційні тепловиділення;

$Q_{\text{П}}^K$ – конвективні побутові (технологічні) тепловиділення.

$$c_B m_B = \sum c_i m_i, \quad (2)$$

де c_i – питома теплоємність повітряного середовища приміщень;

m_i – маса елементів повітряного середовища приміщень.

Рівняння теплового балансу променевих теплових потоків повітряного середовища приміщень будівлі матиме вигляд:

$$\sum q_{3H}^{\text{П}} F_{3H}^{\text{П}} + \sum q_{BH}^{\text{П}} F_{BH}^{\text{П}} + q_{C.O.}^{\text{П}} F_{C.O.}^{\text{П}} \pm$$

$$\pm \sum q_{M.K.}^{\text{П}} F_{M.K.}^{\text{П}} + Q_{\text{ПБ}}^{\text{П}} = 0, \quad (3)$$

де $q_{3H}^{\text{П}}, q_{BH}^{\text{П}}, q_{O.P.}^{\text{П}}, q_{M.K.}^{\text{П}}$ – променеві теплові потоки відповідно до зовнішніх теплоємких та внутрішніх огорожувальних конструкцій, опалювального приладу і малотеплоємних огорожувальних конструкцій;

$F_{3H}^{\text{П}}, F_{BH}^{\text{П}}, F_{O.P.}^{\text{П}}, F_{M.K.}^{\text{П}}$ – площі теплообмінних поверхонь відповідно до променевих теплових потоків зовнішніх теплоємних та внутрішніх огорожувальних конструкцій, опалювального приладу і малотеплоємних огорожувальних конструкцій;

$Q_{\text{ПБ}}^{\text{П}}$ – променеві побутові (технологічні) тепловиділення.

Для оцінки кількісного ефекту утеплення будівлі була створена математична модель перехідних теплових процесів цієї будівлі.

Основними елементами, що розглядаються, є зовнішні та внутрішні огорожуючі конструкції, система опалення будівлі та внутрішній мікроклімат приміщення.

При постановці даної задачі були використані такі спрощення умови: реальна система опалення замінена еквівалентним за тепловіддачею опалювальним приладом; розглядаються багат шарові зовнішні огорожуючі конструкції з ідеальним тепловим контактуванням між шарами; температурне поле в них одномірне; питома теплоємності в робочому діапазоні температур постійні; теплоакуююча ємність малотеплоємних огорожуючих конструкцій (вікна, двері) дорівнює нулю; нерівномірністю розподілу температури повітря в приміщенні нехтуємо.

У якості початкового розподілу температур можна задати умову стаціонарного режиму. У якості збудовуючої дії будемо використовувати графік температур теплоносія в умовах «якісного» програмного регулювання.

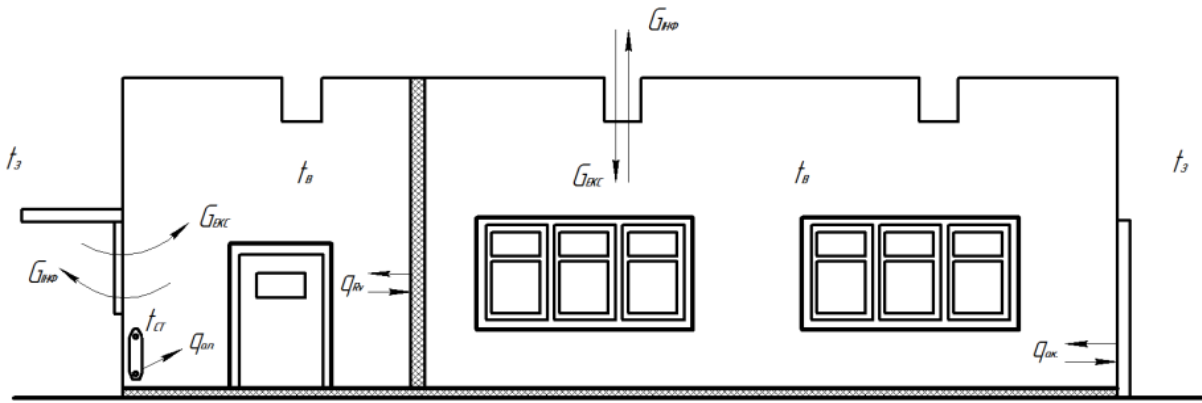


Рисунок 1 – Схема розподілу теплових потоків будівлі операторної

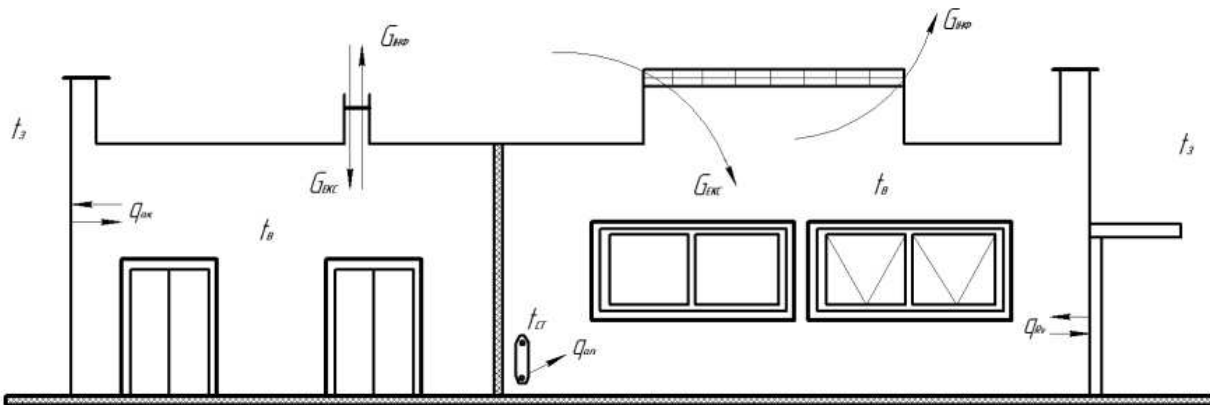


Рисунок 2 – Схема розподілу теплових потоків будівлі циркуляційної насосної станії

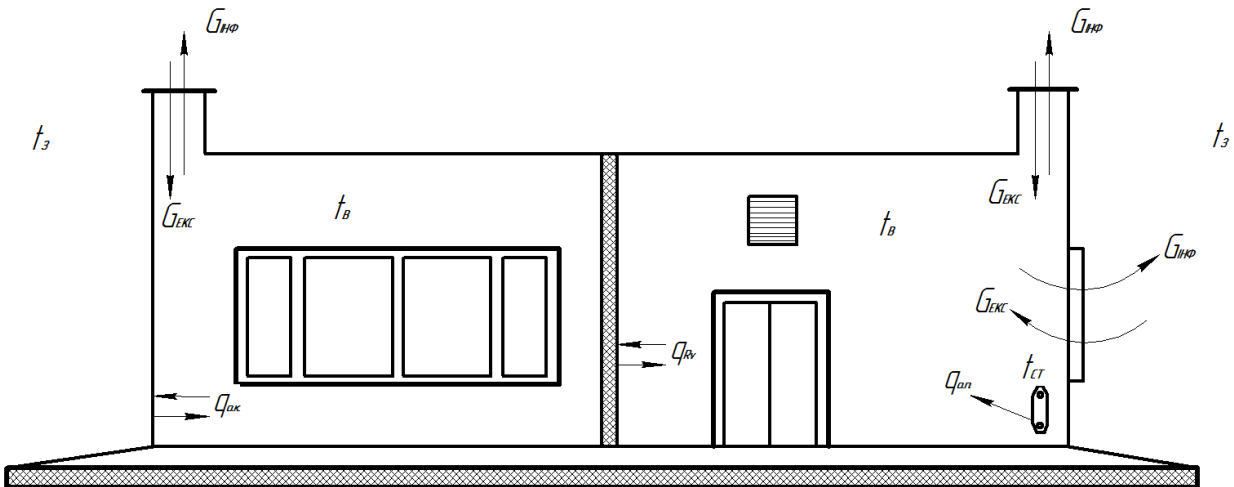


Рисунок 3 – Схема розподілу теплових потоків будівлі складу паливно-мастильних матеріалів

$t_з$ – температура зовнішнього повітря; $t_в$ – температура внутрішнього повітря будівлі;
 $t_{СТ}$ – температура поверхні системи опалення; $q_{о.л.}$ – тепловий потік, який надходить у будівлю від системи опалення; $q_{о.к.}$ – тепловий потік, який надходить у приміщення і відходить з нього через зовнішні огорожуючі конструкції будівлі; $q_{рв}$ – тепловий потік, який проходить через внутрішні огорожуючі конструкції будівлі; $G_{ІФ}$ – об'єм інфільтраційного повітря;
 $G_{ЕКС}$ – об'єм ексфільтраційного повітря

Робота автоматичного регулятора в режимі програмного регулювання описується рівнянням, у якому з кількома невідомими. Автоматичний регулятор дозволяє регулювати темпе-

ратуру теплоносія в системі опалення залежно від температури зовнішнього та внутрішнього повітря будівлі. Розрахункова температура теплоносія в системі опалення описується рівнянням:

$$\tau_{10} = t_B + (t_{O.П.}^{CP} - t_B) \cdot Q^{0,8} + (\tau_1 - t_{O.П.}^{CP}) \cdot Q, \quad (4)$$

де t_B – температура внутрішнього повітря будівлі (наприклад, 18 °С);

$t_{O.П.}^{CP}$ – середня температура опалювального приладу (наприклад, 82,5 °С);

τ_1 – температура теплоносія в подаючому трубопроводі системи опалення, що приймається за опалювальним графіком (наприклад, з параметрами 95/70 °С);

Q – відносна кількість теплоти, необхідної для системи опалення, яка залежить від температури зовнішнього повітря та визначається за формулою:

$$Q = \frac{t_B - t_3}{t_B + t_{3P}}, \quad (5)$$

де t_3 – діюча температура зовнішнього повітря навколо будівлі.

Необхідна температура теплоносія в системі опалення описується рівнянням:

$$\tau_{10}^{НЕОБХІД} = t_{10} + K_t \cdot 0,1 \cdot (t_B^{НЕОБХІД} - t_B^{ФАКТИЧ}), \quad (6)$$

де K_t – коефіцієнт впливу температури внутрішнього повітря будівлі, який приймається у межах 1-99.

Робота клапана регулятора описується рівнянням:

$$\text{Re } g = \frac{1}{X_P} \left[(\tau_{10}^{НЕОБХІД} - \tau_{10}) + \frac{1}{z} \int (\tau_{10}^{НЕОБХІД} - \tau_{10}) dz \right], \quad (7)$$

де X_P – зона пропорційності регулятора (для даного регулятора приймається у межах 1-250);

τ_{10} – температура теплоносія в системі опалення, °С.

Робота автоматичного регулятора пропорційно-інтегрального типу в режимі програмно-регулювання описується рівнянням:

$$\tau_{10}^{НЕОБХІД} = t_{10} + K_t \cdot 0,1 \cdot (t_B^{НЕОБХІД} - t_B^{ФАКТИЧ}). \quad (8)$$

Система рівнянь теплового балансу еквівалентного опалювального приладу водотрубною системою опалення має вигляд:

$$\begin{cases} \tau_{2(\infty)} = t_{CT} + (\tau_1 - t_{CT}) e^{-\frac{a_1 F_1}{cG}}; \\ c_1 m_1 \frac{d\tau_{2(z)}}{dz} = (c_1 G + a_1 F_1)(\tau_{2(\infty)} - \tau_{2(z)}); \\ c_1 m_1 \frac{d\tau_{CP(z)}}{dz} = c_1 G(\tau_1 - \tau_{2(z)}) - a_1 F_1(\tau_{CP(z)} - t_{CT(z)}); \\ c_{CT} m_{CT} \frac{dt_{CT(z)}}{dz} = a_1 F_1(\tau_{CP(z)} - t_{CT(z)}) - [a_2^K F_2^K (t_{CT(z)} - t_B) + a_2^П F_2^П (t_{CT(z)} - t_R)], \end{cases} \quad (9)$$

де c_1, m_1 – питома теплоємність і вага теплоносія системи опалення;

z – час; G – витрата теплоносія в кварталній тепловій мережі (до елеватора);

τ_1 – температура теплоносія в подаючому трубопроводі кварталної теплової мережі;

τ_{CP} – середня температура теплоносія в системі опалення;

a_1 – коефіцієнт теплообміну на внутрішній поверхні стінки еквівалентного опалювального приладу;

$a_2^П, a_2^K$ – відповідно коефіцієнт променевого та конвективного теплообміну на зовнішній поверхні стінки еквівалентного опалювального приладу;

F_1 – площа внутрішньої поверхні опалювального приладу;

$F_2^П, F_2^K$ – відповідно площа зовнішньої поверхні опалювального приладу конвективної та променевої складової;

c_{CT}, m_{CT}, t_{CT} – відповідно питома теплоємність, вага і температура стінки еквівалентного опалювального приладу;

t_B – температура внутрішнього повітря приміщення;

t_R – середня радіаційна температура внутрішнього повітря приміщення.

Рівняння теплового балансу внутрішнього повітря будівлі має вигляд:

$$c_B m_B \frac{dt_{B(z)}}{dz} = a_2^K F_2 (t_{CT(z)} - t_{B(z)}) - a_2^П F_2 (t_{CT(z)} - t_{R(z)}) - a_B F_{3K} (t_{B(z)} - t_{HK(0,z)}) - a_B F_{BK} \times (t_{B(z)} - t_{BK(\delta/2,z)}) - c_{П} G_{ИФ} (t_{B(z)} - t_{H(z)}) - \sum a_B^K F_{MK} (t_{B(z)} - t_{MK(z)}) - \sum a_B^П F_{MK} (t_{R(z)} - t_{MK(z)}) \quad (10)$$

де c_B – питома теплоємність повітря;

m_B – вага внутрішнього повітря опалювальних приміщень;

a_B – коефіцієнт теплообміну на внутрішніх поверхнях огорожувальних конструкцій;

F_{3K}, F_{BK}, F_{MK} – площі відповідно зовнішніх, внутрішніх огорожень і малотеплоємних огорожувальних конструкцій;

$t_{3K(0,z)}, t_{BK(\delta/2,z)}, t_{MK(z)}$ – температури відповідно на внутрішніх поверхнях зовнішніх, внутрішніх і малотеплоємних огорожувальних конструкцій;

$G_{ИФ}$ – витрата інфільтраційного повітря.

Наступним елементом математичної моделі тепловологічних процесів є система диференціальних рівнянь, що описує нестационарний тепловий режим теплоємних огорожуючих конструкцій, дозволяє знайти температуру на поверхні та в перерізі зовнішніх багатоповітряних теплоємних огорожуючих конструкцій.

Ця система складається з диференціального рівняння теплопровідності Фур'є для кожного i -того шару конструкції:

$$\frac{\partial t_{3K(X,Z)}}{\partial z} = \frac{\lambda_i}{c_i \rho_i} \cdot \frac{\partial t_{3K(X,Z)}^2}{\partial x^2}, \quad (11)$$

при граничних умовах біля зовнішньої поверхні ($x = \delta$):

$$-\lambda_{3K} \frac{\partial t_{3K}}{\partial x}(\delta, z) = \alpha_3^{K+\Pi} (t_{3K(\delta,Z)} - t_{3K(Z)}), \quad (12)$$

і біля внутрішньої поверхні ($x = 0$):

$$-\lambda_{3K} \frac{\partial t_{3K}}{\partial x}(0, z) = \alpha_B^K (t_{B(Z)} - t_{3K(0,Z)}) + \alpha_B^\Pi (t_{R(Z)} - t_{3K(0,Z)}). \quad (13)$$

Між шарами конструкції застосовуються граничні умови четвертого роду.

$$\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x_1}(\delta, z) = \lambda_2 \frac{\partial t_2}{\partial x_2}(0, z), \quad (14)$$

де $t_{3K(X,Z)}$ – температура в товщі зовнішньої стіни, яка залежить від координати x і часу z , °C;

λ_i – теплопровідність i -того шару конструкції, Вт/м°C;

λ_{3K} – теплопровідність зовнішньої стіни, Вт/м°C;

δ_i – товщина i -того шару зовнішньої стіни, м;

$\alpha_3^{K+\Pi}$ – коефіцієнт теплообміну на зовнішній поверхні огорожування, Вт/м²°C;

α_B^K, α_B^Π – коефіцієнти відповідно конвективного та променевого теплообміну біля внутрішньої поверхні огороження, Вт/м²°C.

Початкові умови задаються стаціонарним розподілом температур у кожному шарі:

$$t(x_i, \infty) = t(0, \infty) - \frac{x_i(t(0, \infty) - t(\delta_i, \infty))}{\delta_i}, \quad (15)$$

де δ_i – товщина i -го шару;

x_i – просторова координата;

t – температура i -того шару.

Температуру на поверхні внутрішніх огорожувальних конструкцій (перегородки, міжповерхові перекриття) можна знайти, вирішуючи систему рівнянь теплового балансу цих конструкцій.

Теплові процеси в теплоємних внутрішніх огорожувальних конструкціях описуються системою рівнянь, яка складається з диференціального рівняння теплопровідності:

$$\frac{\partial t_{BK(X,Z)}}{\partial z} = \frac{\lambda_i}{c_i \rho_i} \cdot \frac{\partial t_{BK(X,Z)}^2}{\partial x^2}, \quad (16)$$

при граничних умовах у центрі стінки:

$$-\lambda_{BK} \frac{\partial t_{BK}}{\partial x}(0, z) = 0, \quad (17)$$

і на її зовнішній поверхні:

$$-\lambda_{BK} \frac{\partial t_{BK}}{\partial x}(\delta_i, z) = \alpha_B^K (t_{BK(\delta_i,Z)} - t_{B(Z)}) + \alpha_B^\Pi (t_{BK(\delta_i,Z)} - t_{R(Z)}), \quad (18)$$

та граничні умови 4-го роду на межі матеріалів:

$$\lambda_i \frac{\partial t_i}{\partial x_i}(\delta, z) = \lambda_{i+1} \frac{\partial t_{i+1}}{\partial x_{i+1}}(0, z). \quad (19)$$

Температуру на внутрішній поверхні малотеплоємних зовнішніх огорож можна знайти, скориставшись рівністю теплових потоків на внутрішній і на зовнішній поверхнях цих конструкцій:

$$\begin{cases} q_{MK} = \alpha_3 (t_{MK(\delta)} - t_H); \\ q_{MK} = \frac{\lambda_{MK}}{\delta_{MK}} (t_{MK(0)} - t_{MK(\delta)}); \\ q_{MK} = \alpha_B^K (t_B - t_{MK(0)}) + \alpha_B^\Pi (t_R - t_{MK(0)}), \end{cases} \quad (20)$$

де q_{MK} – тепловий потік через малотеплоємні зовнішні конструкції;

$t_{MK(\delta)}, t_{MK(0)}$ – температура на зовнішній і на внутрішній поверхнях цієї огорожувальної конструкції.

В основі визначення вологості матеріалів конструкції лежить диференціальне рівняння дифузії водяної пари в сорбційному середовищі:

$$\xi_i \rho_i \frac{\partial e}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu_i \frac{\partial e}{\partial x} \right), \quad (21)$$

де ξ_i – відносна пароємність i -го шару матеріалу, г/кг;

ρ_i – густина i -того шару матеріалу, кг/м³;

e – парціальний тиск, Па;

z – час переміщення водяної пари, с;

μ_i – коефіцієнт паропроникності i -того шару матеріалу, г/(м·с·Па);

x – просторова координата, м.

Для розрахунку вологісних процесів огорожувальних конструкцій будівель рівняння (21) необхідно доповнити граничними умовами 3-го роду. Ці граничні умови біля внутрішньої та зовнішньої поверхонь зовнішньої стіни можна записати у вигляді:

$$\mu_1 \frac{\partial e_{1,z}}{\partial x} = \beta_B (e_B - e_{1,z}); \quad (22)$$

$$\mu_n \frac{\partial e_{n,z}}{\partial x} = -\beta_3 (e_{n,z} - e_3),$$

де μ_1, μ_n – коефіцієнт паропроникності відповідно внутрішнього та зовнішнього шару конструкції, г/(м·с·Па);

β_B, β_3 – коефіцієнт вологообміну біля внутрішньої та зовнішньої поверхонь, г/(м²·с·Па);

e_B, e_3 – парціальний тиск водяної пари в повітрі відповідно з внутрішнього та зовнішнього боку стінки, Па;

e_1, e_n – парціальний тиск водяної пари відповідно на внутрішній та зовнішній поверхнях конструкції, Па.

Відносну пароємність матеріалу можна визначити за формулою, г/кг

$$\xi_i = 1000 \frac{d\omega_i}{d\phi_i}, \quad (23)$$

де ω_i – масова вологість i -го шару матеріалу, %;

ϕ_i – відносна вологість повітря, %.

Коефіцієнт вологообміну β_B залежить від температури, вологості, рухливості повітря біля поверхні. В умовах природної конвекції його можна розрахувати за формулою, г/(м²·с·Па)

$$\beta_B = 1,192 \cdot 10^{-8} \Delta t^{\frac{1}{3}} \Delta e^{\frac{2}{5}}, \quad (24)$$

де Δt – різниця температур між повітрям та поверхнею огорожуючої конструкції, °C;

Δe – різниця парціальних тисків в повітрі та на поверхні стінки, Па.

$$\Delta e = e_B - e_{1,z}, \quad (25)$$

$$\Delta t = t_B - t_{1,z}, \quad (26)$$

Парціальний тиск насиченої водяної пари в Па, яка міститься в повітрі в інтервалі температур $-30 \div +20$ °C, може апроксимуватися наступною залежністю:

$$E = 479 + (11,52 + 1,62t)^2. \quad (27)$$

Середня комплексна визначення E за формулою (27) не перевищує 3%.

Головним завданням дослідження був пошук шляхів підвищення економії теплової енергії при утепленні зовнішніх стін будівлі пінобетоном.

Розглядався температурний режим приміщення адміністративної будівлі міста Полтави. Для розрахунку приймалось приміщення з такими параметрами:

- будівля цегляна;
- товщина зовнішніх стін – 0.72 м;

Початкові умови: коефіцієнт теплообміну біля зовнішньої поверхні стіни – 23 Вт/м²·°C; коефіцієнт теплообміну біля внутрішньої поверхні стіни – 8.7 Вт/м²·°C; температура внутрішнього повітря – 18 °C.

Для визначення економії енергоресурсів на прикладі такої будівлі було виконано розрахунки для утеплювання зовнішніх стін пінобетонном товщиною 100 мм.

Тепловтрати через зовнішні стіни зменшуються на

$$\Delta Q = \frac{R_{II}}{R_{CT}} = \frac{\frac{\delta_2}{\lambda_2}}{\frac{1}{\alpha_B} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_3}} = \frac{0.1}{\frac{1}{8.7} + \frac{0.72}{0.64} + \frac{0.1}{0.21} + \frac{1}{23}} = 0.27, \quad (28)$$

тобто на 27%. Проте для даної будівлі тепловтрати через зовнішні стіни складають лише 39%. Інші втрати теплоти відбуваються через скляні конструкції, за рахунок підігріву інфільтраційного повітря, через горище та підлогу 1-го по-

верху. З урахуванням цих тепловтрат, економія енергоресурсів для будівлі в цілому (при +5 °C) складе $27 \cdot 0,39 = 10,6\%$. У холодний період року зниження температури зовнішнього повітря призводить до збільшення витрат інфільтраційного повітря в будівлях з гравітаційними системами вентиляції. Ці витрати можна розрахувати за формулою:

$$L_t = L_{+5} \sqrt{\frac{\Delta P_t}{\Delta P_{+5}}} = L_{+5} \sqrt{\frac{\rho_{t_3} - \rho_B}{\rho_{+5} - \rho_B}}, \quad (29)$$

де ρ_{t_3} – густина зовнішнього повітря, кг/м³;

ρ_B – густина внутрішнього повітря, кг/м³;

ρ_{+5} – густина зовнішнього повітря при розрахунковій зовнішній температурі (+5 °C), кг/м³.

При будь-якій температурі густину повітря визначаємо за формулою, кг/м³

$$\rho_t = \frac{353}{273 + t}. \quad (30)$$

Утеплення існуючих зовнішніх стін цегляної будівлі дає відчутний енергозберігаючий ефект, проте цей захід потребує додаткових капітальних витрат.

Розрахунки перехідних режимів були виконані на основі математичної моделі, яка дозволяє визначити температуру та вологість огороження в будь-якій її точці в довільний момент часу для різних типів матеріалів. Результатами розрахунку є графіки розподілу вологості матеріалів зовнішньої стіни. Розподіл вологості товщі стіни показано на рис. 4, 5.

1. Утеплення зовнішньої стіни ззовні (рис. 4).

З графіка (рис. 4) видно, що річна вологість, накопичена в зовнішній стінці приміщення, значно менша за допустиму вологість (4%).

2. Утеплення зовнішньої стіни всередині приміщення (рис. 5).

Висновки

Оскільки у сучасному світі виграють не ті країни, які володіють енергією, а ті, які можуть ефективно її використовувати, тому енергоефективність повинна стати пріоритетом державної політики.

Найважливішими завданнями в області підвищення енергоефективності економіки України є підвищення ефективності споживання електрики, газу, тепла, а також нафтопродуктів. Тож для забезпечення цих цілей необхідно розробити комплекс галузевих програм з підвищення енергоефективності, що включає в себе введення обов'язкового енергетичного менеджменту й енергетичного аудиту на підприємствах й установах усіх форм власності; встановлення більш жорстких стандартів енергоефективності при будівництві та реконструкції будівель та встановлення темпів підвищення енергоефективності існуючих будівель тощо. Для цього потрібна активна реалізація заходів із підвищення енергоефективності за рахунок таких зусиль: модернізація промисловості з використанням енергозберігаючих технологій;

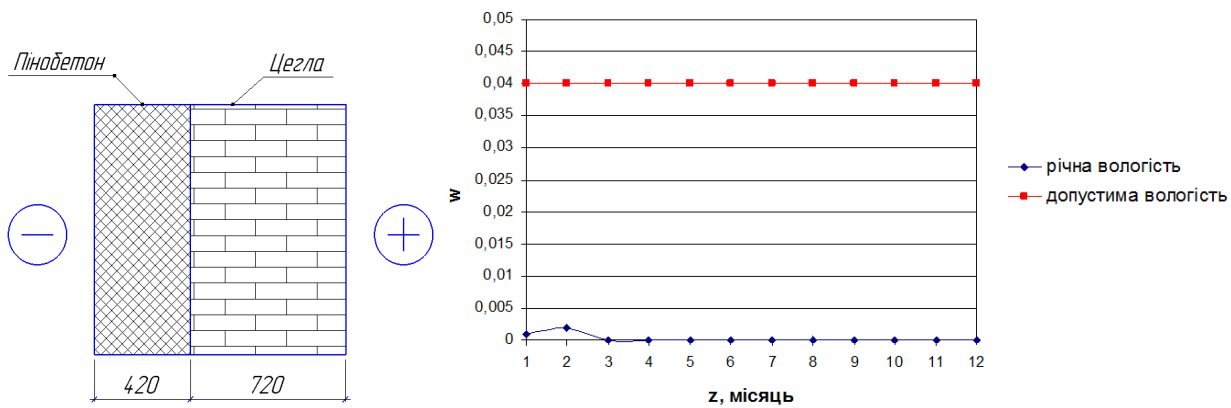


Рисунок 4 – Річний розподіл вологи всередині утепленої зовні огорожувальної конструкції

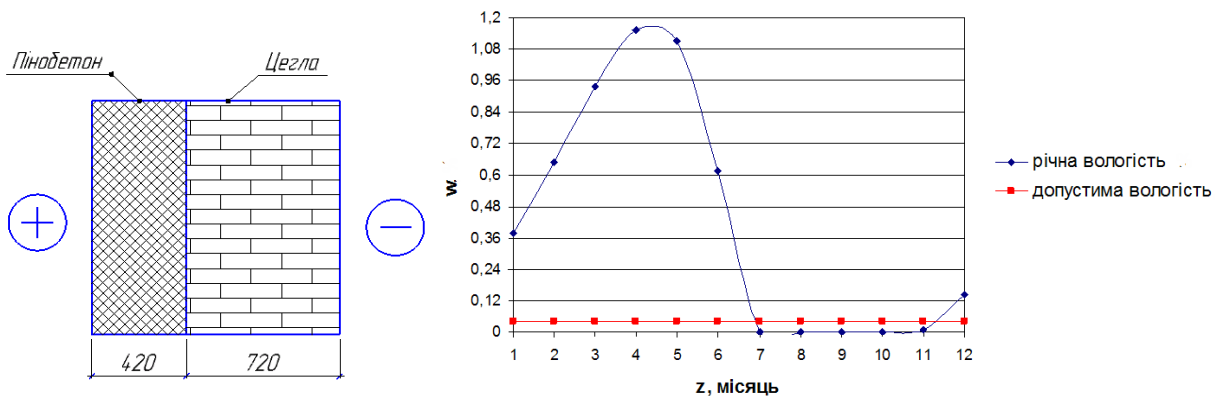


Рисунок 5 – Річний розподіл вологи всередині утепленої зсередини приміщення огорожувальної конструкції

зниження втрат газу і тепла за рахунок реконструкції газотранспортної системи; зміна законодавства України з метою посилення будівельних нормативів і реконструкція системи тепlopостачання [26].

Запропоновано здійснити утеплення виробничих будівель ЛВУМГ пористими теплоізоляційними матеріалами. Розрахунки показують, що у разі внутрішнього утеплення річна вологість, накопичена в зовнішній стіні приміщення, приблизно в 30 разів перевищує допустиме значення вологості матеріалу. Тому можна зробити остаточний висновок про недоцільність внутрішнього утеплення зовнішніх огорожувальних конструкцій пінобетоном у разі стабілізації внутрішнього мікроклімату опалюваних виробничих будівель.

Для створення динамічного мікроклімату можуть застосовуватися огорожуючі конструкції, утеплені з обох боків. Для таких конструкцій виникає необхідність у з'ясуванні теплофізичних характеристик, при яких вологість конструкції не перевищує максимального нормативного рівня. Також особливо важливою є максимальна товщина внутрішнього теплоізоляційного шару.

Таким чином, питання енергозбереження та енергоефективності слід вважати найважливішими питаннями подальшого економічного розвитку країни.

Література

- 1 Закон України "Про енергозбереження" [Електронний ресурс]: Закон України № 75/94-ВР від 01.07.94.із змінами від 09.04.2015.
- 2 Запухляк І.Б., Дзьоба О.Г. Управління потенціалом енергозбереження газотранспортних підприємств: монографія / За ред. Шегди А.В. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2011. – 208 с.
- 3 Запухляк І. Б. Теоретичні основи дослідження механізму енергозбереження / І. Б. Запухляк // Теоретичні та прикладні питання економіки: Зб. наук. пр. – К., 2006. – Вип. 9. – С 344-349.
- 4 Денисюк С.П. Особливості реалізації політики енергоефективності – пріоритети України // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2013. – №3 .
- 5 Розпорядження КМУ Про затвердження Національного плану дій з енергоефективності на період до 2020 року від 25.11.2015 № 1228-р [Електронний ресурс] / Верховна Рада України. – Режим доступу : <http://zakon3.rada.gov.ua/laws/file/text/40/f450549n7.zip>.
- 6 Джеджула В. Визначення резервів збільшення прибутку від енергозберігаючих заходів / В. Джеджула // Економічний аналіз: Зб. наук. праць / Тернопільський національний економічний університет – Тернопіль: Видавничо-полі-

графічний центр Тернопільського національного економічного університету "Економічна думка", 2012. – Вип. 11. – Частина 2. – С. 198–201.

7 Директива Європейського Парламенту та Ради 2010/31/ЄС щодо енергетичної ефективності будівель від 19 травня 2010 року // Офіційний вісник Європейського Союзу.

8 Шумська Л.П. Дослідження теплового захисту будівель при утепленні пористими теплоізоляційними матеріалами / Л.П. Шумська // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х.: НТУ «ХПІ» – 2016. – № 4(1176). – С. 102–109.

9 Середюк Т. В. Організаційно-економічний механізм енергозбереження в промисловості: монографія / Середюк Т. В. – Вінниця: УНІВЕРСУМ - Вінниця, 2005. – 154 с.

10 Сотник І. М. Проблеми та напрями підвищення енергоефективності економіки України [Текст] / І. М. Сотник, К. О. Охтеменко, Є. О. Сидоренко // Механізми регулювання економіки. – 2010. – № 4. – С. 214–218.

11 Сторчак С.О. Ключові аспекти енергоефективності нафтогазового комплексу України / С.О. Сторчак, В.Г. Маслюченко, В.А. Рамазанов, Г.Ю. Стригуненко // Нафтова і газова промисловість. – 2012. – № 6. – С. 51–55.

12 Суходоля О. М. Енергоефективність національної економіки: методологія дослідження та механізми реалізації [Текст]: монографія / О. М. Суходоля. – К.: НАДУ, 2006. – 400 с.

13 Ушаповський К. В. Проблеми енергозбереження [Текст]: монографія / К. В. Ушаповський, А. Ю. Пустовой, Ю. Д. Костін. – Х.: ООО «Компанія СМІТ», 2015. – 264 с.

14 Pavlenko A.M. Determination of energy parameters of technology of thermal pore formation [Text] / A.M. Pavlenko, L.P. Shumska // Metallurgical and Mining Industry. – 2016. – No 11. – P. 99–104.

15 Пористі теплоізоляційні матеріали [Текст]: монографія / Е.Г.Братуга, А.М.Павленко, А.В.Кошлак, О.В.Кругляков. – Х.: ТОВ «ЕДЕНА», 2010. – 107 с.

16 Боднарєва Л. Поведение легкого керамзита, бетона, подверженных воздействию высоких температур [Текст] / Л.Боднарєва, Р.Гела, М.Губертова, И.Новакова // Международный журнал гражданского, экологического, структурного строительства и архитектурного проектирования. – 2014. – № 8. – С. 1205 – 1208.

17 Nimmo J.R. Porosity and Pore Size Distribution, in Hillel, D., ed. Encyclopedia of Soils in the Environment: [Text] – London; Elsevier, 2004. – v. 3. – p. 295–303.

18 Pavlenko A. Analysis of thermal peculiarities of alloy in gwith special properties [Text] / A. Pavlenko, B. Usenko, H. Koshlak // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – No 2. – P. 50–55.

19 Lopez-Pamies O. Effects of internal pore pressure on closed-cellelastomericfoams [Electronic resource] / O. Lopez-Pamies, P. Ponte Castañeda, M. Idiart // International Journal of

Solids and Structures. – 2012. – No 49. – from http: 10.1016/j.ijsol-str.2012.02.024.

20 Aboudi J. Micromechanics of Composite Materials: A Generalized Multiscale Analysis Approach [Text] / J. Aboudi, S. Arnold, B. Bednarczyk. – London: Elsevier, 2012. – 1006 p.

21 Pavlenko A. Design of processes of thermal bloating of silicates [Text] / A. Pavlenko, H. Koshlak // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – №1. – P. 123–127.

22 Pavlenko A. Production of porous material with projected ther mophysical characteristics [Text] / A. Pavlenko, H. Koshlak // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – No 1. – P. 50–55.

23 Pavlenko A. M. Peculiarities control the forming of the porous structure [Text] / A. M. Pavlenko, H. V. Koshlak, B. O. Usenko // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – Issue 6. – P. 50–55.

24 Pavlenko A. Thermal conductivity of the gas in small spase [Text] / A. Pavlenko, H. Koshlak, B. Usenko // Metallurgical and Mining Industry. – 2014. – No 2. – P. 20–24.

25 Pavlenko A. Study of theformation of gas-vapor in the liquid mixture [Text] / A. Pavlenko, H. Koshlak, A. Cheilytko, M. Nosov // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – No 5(82). – P.58– 65.

26 Енергетична стратегія України на період до 2030 року схвалена розпорядженням КМУ від 24 липня 2013 р. № 1071-р.: <http://zakon.rada.gov.ua/>.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
12.06.17*

*Рекомендована до друку
професором Карнашем М.О.
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором Голіком Ю.С.*

*(Полтавський національний університет
ім. Ю. Кондратюка, м. Полтава)*