

СТИСНЕННЯ ПОВІТРЯ ПРИ ЗАМЕРЗАННІ ВОДИ В РЕЗЕРВУАРІ ТА ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ ДЛЯ ЗЛИВАННЯ ВОДИ З СОНЯЧНИХ КОЛЕКТОРІВ

Розглядається використання ефекту збільшення об'єму льоду при замерзанні води для стиснення повітря в резервуарі, частково заповненому водою. Метою дослідження є створення умов для руху поверхні льоду та визначення кінцевого тиску повітря після замерзання води. Розроблений спосіб стиснення повітря та виконані теоретичні і експериментальні дослідження кінцевого тиску повітря. Проведена експериментальна перевірка запатентованого способу стиснення повітря з забезпеченням рухомої поверхні льоду шляхом накладання теплоізоляції на повітряну камеру верхівки резервуару. Для цього виготовлені два стискувачі повітря різного розміру з використанням холоду з повітря та з суміші льоду з сіллю. Отримані надлишкові тиски повітря від 0,3 до 0,5 бар. Проведений термодинамічний аналіз процесу. Отримане рівняння для визначення тиску при повному замерзанні води, при постійному перерізі стискувача повітря. Розрахунки стиснення близькі до експериментальних даних. Дослідження показали реальну технічну можливість стиснення повітря при замерзанні води в жорсткому герметичному резервуарі та його використання для автоматичного зливання води з сонячних колекторів при початку морозів. Запропонований і експериментально досліджений спосіб забезпечення руху льодяної поверхні відносно стін резервуару при стисненні повітря в резервуарі, шляхом теплоізоляції повітряного простору. Основні результати досліджень: отримано: термодинамічний аналізом рівняння для кінцевого тиску стиснутого льодом повітря; при використанні резервуару з постійним горизонтальним перерізом кінцевий тиск не залежить від площі перерізу і зростає з підвищенням рівня води; проведені експерименти на двох установках показали, що надлишковий тиск сягає 0,3 – 0,5 бар; резервуар з водою, що замерзає, пропонується використовувати як температурний датчик, а стиснене повітря може приводити в рух клапан прямої дії; розрахунки часу замерзання води для стиснення повітря показали його значне скорочення при зростанні коефіцієнта об'ємного розширення резервуару.

Ключові слова: замерзання води в резервуарі, створення рухомої поверхні льоду, стиснення повітря льодом, використання стисненого повітря для зливання води з сонячних колекторів в морози.

Вступ Отримання енергії з довкілля приваблює як дослідників, так і конструкторів нової техніки. Якщо теплова енергія довкілля для отримання теплоти і холоду використовується дуже широко, наприклад, в теплових насосах, то виробництво механічної і електричної енергії обмежується термодинамічним використанням різниць температур між поверхневими та глибинними водами океану та між океанською водою в холодним повітрям в арктичній і антарктичній зонах. Відомий патент [1], в якому пропонується використовувати теплоту кристалізації води в циклі, де розпилені краплі води нагрівають стиснене холодне повітря в ізотермічному процесі. Відзначимо, що вода в краплях замерзає лише при температурах, нижчих мінус 20 – 25 °С через відсутність центрів кристалізації.

В нашій роботі розглядається використання ефекту розширення льоду при замерзанні води (збільшення об'єму в порівнянні з водою, яка кристалізується) для стиснення повітря. Останнє може бути використано в пристроях автоматики і для інших цілей, коли не потрібна значна витрата повітря.

Однією з аномалій води є її густина. Більшість рідин, кристалів і газів зменшуються при нагріванні та збільшуються при охолодженні, аж до процесу конденсації або кристалізації. Густина води під час охолодження від 100 до 3,98 °С збільшується, як у переважній більшості рідин. Але, досягнувши максимального значення при температурі 3,98 °С, густина з подальшим охолодженням води починає зменшуватися. Іншими словами, максимальна густина води спостерігається при температурі 3,98 °С, а не при температурі заморожування 0 °С [2].

Заморожування води супроводжується різким зниженням щільності на 9%, тоді як у більшості інших речовин процес кристалізації супроводжується збільшенням щільності. У зв'язку з цим лід займає більший об'єм, ніж рідка вода, і тримається на її поверхні [3]. Коли вода у стані рідини охолоджується, вона стискається, до досягнення температури близько 4 градусів Цельсія. Після цього вода трохи розширюється, поки не досягне точки замерзання, а потім при заморожуванні розширюється приблизно на 9% [4]. І навпаки, плавлення льоду при атмосферному тиску супроводжується зменшенням об'єму на 9%.

Ця незвична поведінка пов'язана зі структурою молекули води [5].

Збільшення густини при плавленні льоду в основному пов'язане з заповненням порожнеч у структурі рідкої води. Наявність у води максимуму густини (при $t = 3,98$ °С) може бути пов'язане з тим,

що зі збільшенням температури (вище $0\text{ }^{\circ}\text{C}$), у воді, з одного боку, посилюються коливання молекул поблизу положення рівноваги в структурі і, відповідно, збільшується ефективний радіус молекул, з іншого боку, посилюється трансляційний рух, і все більша кількість молекул потрапляє у порожнечі. Перша обставина призводить до збільшення об'єму, друга - до ущільнення. Сукупність цих двох протилежних процесів визначає існування максимуму густини. Зрозуміло, що все це відбувається на тлі поступового руйнування структури льоду зі збільшенням температури - порушення трансляційним рухом порядку в розташуванні молекул. Таким чином, модель води з заповненням порожнеч поясне аномалію густини [6].

Мета дослідження - створення умов для руху поверхні льоду та визначення кінцевого тиску повітря після замерзання води.

Матеріали та результати досліджень

1. Розробка конструкції льодяного стискувача повітря.

Проблемою організації рухомої поверхні льоду, що контактує з повітрям в резервуарі є те, що вода найважча приблизно при $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ і розташована біля дна. Без запобіжних заходів вода спочатку замерзає зверху і з боків, а в останню чергу біля дна, тому лід руйнує чи вигинає дно. Автором в патенті [7] запропоновано використати теплоту кристалізації води для підтримання поверхні води у незамерзломому стані, який дозволяє транспортувати уверх воду, що стискується льодом. Для цього в зоні біля поверхні води і вище, на резервуар накладається теплоізоляція, яка не дозволяє охолоджуватись повітрю над водою. Куди поступає теплота від кристалізації води. Таким чином, поверхня води замерзає останньою, поступово стискаючи повітря, що розташоване вище. На рис.1 показана труба, частково заповнена водою з теплоізоляцією на верхівці труби (збоку і на кришці).



Рисунок 1 – Труба з теплоізолюванням верхом

Також в патенті запропоновано робити на трубі ребра в зоні нижче теплоізоляції для прискорення замерзання води. При необхідності, для прискорення процесу стиснення повітря, трубу також слід обдувати морозним повітрям. При цьому покращується теплообмін з повітрям, який менш інтенсивний ніж при кристалізації води [8].

2. Теоретичне знаходження кінцевого тиску повітря в резервуарі.

Задачею дослідження є визначення тиску повітря при повному замерзанні в залежності від висоти повітряного простору над водою в початковому стані. Оскільки стиснення повітря в резервуарі проходить повільно, а повітря має температуру близьку до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, то процес вважаємо ізотермічним.

Розглядається резервуар постійного перерізу f з висотою h , налита вода до висоти h_v , висота льоду після замерзання води h_l , висота повітря над водою перед замерзанням h_1 , висота повітря над льодом h_2 , густина води та льоду відомі величини. Використовуючи закон Бойля-Маріотта для ізотермічного стиснення ($pv=const$), та вважаючи, що маса льоду та води однакова, знаходимо об'єм льоду у резервуарі. Прирівнюємо через однакову масу

$$\rho_v \cdot V_v = \rho_l \cdot V_l, \quad (1)$$

звідки

$$V_l = \frac{\rho_v \cdot V_v}{\rho_l} \quad (2)$$

Об'єм повітря над льодом визначаємо як різницю загального об'єму V та об'єму льоду V_l , враховуючи що $V = f \cdot h$, для посудин з постійним перерізом по висоті, маємо таку залежність:

$$V_2 = f(h - 1,087h_l), \quad (3)$$

де 1,087 – відношення густини води до густини льоду.

Використовуючи дану залежність та закон Бойля-Маріотта, можна знайти тиск повітря при

повному замерзанні

$$P_2 = P_1 \frac{V_1}{V_2}, \quad (4)$$

враховуючи, що:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{f(h-h_g)}{f(h-1,087h_g)} = \frac{h-h_g}{h-1,087h_g}. \quad (5)$$

Абсолютний тиск після повного замерзання води знаходиться з співвідношення (4) з урахуванням (5).

Наведемо такий приклад: висота резервуару $h=1,2$ м; вода налита до висоти $h_g=1$ м. Тоді маємо:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{h-h_g}{h-1,087h_g} = \frac{1,2-1}{1,2-1,087 \cdot 1} = 1,769.$$

Знаходимо абсолютний тиск повітря при повному замерзанні, приймаючи початковий тиск в резервуарі атмосферним ($P_1=1$ бар):

$$P_2 = P_1 \frac{V_1}{V_2} = 1 \cdot 1,769 = 1,769.$$

При стисненні повітря, як ми прийняли вище, процес близький до ізотермічного. Але в реальних умовах повітря над поверхнею води може охолоджуватись в порівнянні з температурою кристалізації і тим більше, чим більша висота шару повітря над водою. Збільшення площі перерізу резервуару збільшує кількість теплоти, що передається в повітря за рахунок теплоти фазового переходу води в лід. Для попередження руйнування резервуару, що виникає при замерзанні води в останню чергу на дні, слід, як показано вище, теплоізулювати повітряний простір, включно з зоною біля поверхні води [7]. Така операція також наближає процес до ізотермічного протікання.

Розглянуті аспекти стосуються випадку, коли резервуар знаходиться по всій висоті в середовищі з негативною температурою. Якщо охолоджується лише поверхня, що контактує з водою в резервуарі, тоді теплота до повітря в ємності надходить з оточуючого повітря. При цьому відпадає необхідність накладання теплоізоляції і процес стиснення стає політропним, як і у випадку високого шару повітря (мало води) в ємності. Розрахунок тиску в згаданому процесі потребує знання показника політропи, що є невизначеним, але очевидно ближчим до одиниці чим до показника адиабати $k=1,4$ (повітря) через теплообмін з довкіллям. В цьому випадку тиск при рівних умовах може бути дещо вищим, ніж при розташуванні всієї ємності в середовищі з негативною температурою.

Для наявної експериментальної труби довжиною 0,9 м і внутрішнім діаметром 100 мм (рис.1) проведені розрахунки абсолютного тиску повітря за формулами (4) і (5) при повному замерзанні в залежності від висоти рівня води у резервуарі. Початковий тиск приймаємо рівним атмосферному ($P_1=1$ бар). Результати обчислень наведені на рис.2.

Аналізуючи даний графік, бачимо, що при збільшенні висоти рівня води в резервуарі (її об'єму) тиск повітря підвищується більшими темпами збільшенням рівня води.

1. Експериментальні дослідження.

Проведені дослідження при використанні холоду з морозного повітря і з розсолу (суміші льоду з сіллю NaCl) для кристалізації води.

У першому дослідженні використана труба довжиною 0,9 м і діаметром 100 мм (рис.1). Труба охолоджувалась морозним атмосферним повітрям, де температура була мінус 9 - 14 °С. Спочатку тиск вимірювався водяним дифманометром. Виявилась його розміри недостатні, тому в подальшому тиск визначався за показаннями пружинного манометра. Через слабкий теплообмін при природній конвекції експеримент продовжувався всю ніч. Отримані тиски близькі до розрахункових, які наведені на рис.2.

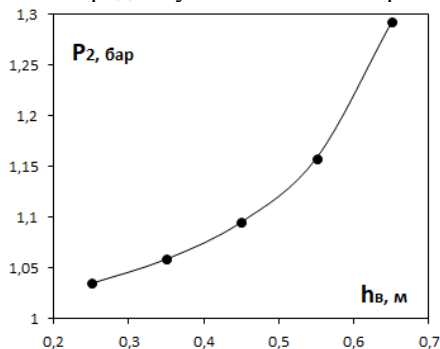


Рисунок 2 – Залежність абсолютного тиску повітря від висоти рівня води в резервуарі



Рисунок 3 – Дослідна труба із нержавіючої сталі

Для прискорення дослідів, при більш інтенсивній теплопередачі від води, що замерзає в резервуарі, використали, як засіб отримання низьких температур, суміш льоду з кухонною сіллю. Металева трубка (рис.3) виготовлена із нержавіючої сталі із загальною довжиною 260 мм. Внутрішній діаметр більшого циліндра трубки складає 22 мм, а його довжина – 210 мм. Довжина меншого циліндра 50 мм, а його внутрішній діаметр близько 4 мм. Дно металевої трубки закрито міцно кришкою.



Рисунок 4 – Експериментальна установка з охолодженням трубки сумішшю льоду з сіллю (поряд розташований термометр)



Рисунок 5 – Трьохходовий клапан з пневматичним приводом

Металева трубка помістили у ємність об'ємом 1,5 л, в яку насипали суміш 0,9 кг льоду та 0,5 кг кухонної солі (рис.4). Лід з сіллю використовували для зменшення температури розчину та інтенсифікації процесу тепловіддачі за рахунок контакту труби з холодною рідиною. До циліндра меншого діаметра металевої трубки приєднали манометр та виконали ізоляцію на резервуарі з розсолем. Тонкий елемент трубки і верхівка резервуару з водою були у контакті з теплим повітрям лабораторії.

Експеримент проводився до тих пір, поки не замерзла вся вода, яка знаходилась в трубці, що було видно по стабілізації тиску, а 85% трубки було заповнено водою. Кожних 10 хвилин часу фіксувалося значення тиску повітря над шаром льоду, утвореного в процесі замерзання води і вимірювалась температура розчину за допомогою термометра. Результати експериментального дослідження наведені в табл.1. Температура суміші знижувалась при поступовому розчиненні солі.

Таблиця 1 – Результати значень тиску повітря при замерзанні води у металевій трубці в залежності від часу

Час, хв	Надлишковий тиск повітря при замерзанні води P , бар	Температура (лід+сіль), °C
10	0,15	-12
20	0,2	-18
30	0,3	-22
40	0,4	-23
50	0,45	-24
60	0,5	-25

Отримували надлишковий тиск до 0,5 бар або 5 м вод. ст., що дозволяє мати значну силу.

3. Практичне використання стисненого повітря для зливання води з сонячних колекторів в морози.

Зливання води з сонячних колекторів в морози потрібне в сонячних водонагрівальних одноконтурних установках, які працюють з квітня по вересень – жовтень. В цих установках вода циркулює через абсорбери сонячних колекторів.

Для вирішення даної проблеми розроблена схема із використанням трьохходового клапана з пневматичним приводом, який може виконувати функцію зливання води. У якості робочого середовища, необхідного для виконання роботи виконавчого механізму пневматичного приводу може бути стиснене льодом повітря.

4. Принцип роботи трьохходового клапана з пневматичним приводом

На рисунку зображено трьохходовий клапан з пневматичним приводом, принцип роботи якого представлено нижче.

Технічні характеристики, діапазони номінальних тисків та максимальних робочих температур таких клапанів у різних виробників різні. Наведемо приклади характеристик декількох виробників трьохходових клапанів з пневматичним приводом.

1.Клапан з пневмоприводом марки Samson (Німеччина) тип 3260/2780 м, пневматичний привід

може працювати з сигналом від 0,2 до 1,5 бара.

2.Клапан з пневмоприводом марки ASCO Numatics (Великобританія, Нідерланди) типу T290, пневматичний привід може працювати з сигналом до 4 бар.

Принцип роботи трьохходового клапана з пневматичним приводом наступний. Пневматичний привід трьохходового клапану складається з виконавчого механізму та регулюючого органу. Виконавчий механізм приводу клапана перетворює командний сигнал у регулюючу дію за рахунок енергії стиснутого повітря.

Стандартний командний сигнал під певним тиском повітря впливає на мембрану, яка передає зусилля на поворотну пружину механізму, внаслідок чого переміщується шток із затвором та змінюється прохідний перетин клапану, в результаті чого і відбувається зливання води з сонячного колектора при настанні морозів. Клапан керований шляхом використання стороннього джерела тиску є непрямой дії.

Оребрення слід застосовувати для інтенсифікації процесу теплопередачі у резервуарі, а саме для того, щоб тиск в процесі замерзання води, яка знаходиться у резервуарі утворився раніше, аніж замерзне вода у абсорбері сонячного колектора.

Покажемо, яким чином оребрення, запропоноване у патенті [7], змінює час замерзання води на прикладі дослідної установки з трубою діаметром 100 мм, яка детально розглядається вище. Проведені розрахунки (табл..2) для коефіцієнтів оребрення ϕ (відношення оребреної поверхні до первісної гладкої), при $\phi = 1$ (гладка труба).

Час замерзання води в трубі обернено пропорційно залежить від коефіцієнта оребрення ϕ , він зменшується в 4 рази в порівнянні з неоребреною трубою при $\phi = 4$.

Бажано резервуар для стиснення повітря розміщувати на деякій відстані від будівлі. Але не слід мати довгих з'єднувальних трубок, які можуть призводити до зниження тиску через збільшення об'єму повітря. Бажано, щоб резервуар обдувався вітром. Зауважимо, що тиск в циліндричному резервуарі не залежить від діаметра, тому слід брати оребрені резервуари діаметром 20-50 мм, в яких менша маса води і час їх замерзання буде біля 1-2 годин.

Таблиця 2 – Результати розрахунку часу повного замерзання води в трубі при температурі повітря мінус 6 °С.

Коефіцієнт оребрення ϕ	Коефіцієнт теплопередачі K_{op} , Вт/м ² ·°С	Тепловий потік Q , Вт	Час замерзання води, год
1	4,67	9,8	23,7
2	8,92	18,73	12,4
3	12,8	26,9	8,6
4	16,36	34,4	6,8

Висновки

1.Запропонований і експериментально досліджений спосіб забезпечення руху льодяної поверхні відносно стін резервуару при стисненні повітря в резервуарі, шляхом теплоізоляції повітряного простору.

2.Отримано термодинамічний аналіз рівняння для кінцевого тиску стиснутого льодом повітря.

3.При використанні резервуару з постійним горизонтальним перерізом кінцевий тиск не залежить від площі перерізу і зростає з підвищенням рівня води.

4.Проведені експерименти на двох установках показали, що надлишковий тиск сягає 0,3 – 0.5 бар.

5.Резервуар з водою, що замерзає, пропонується використовувати як температурний датчик, а стиснене повітря може приводити в рух клапан прямої дії.

6.Розрахунки часу замерзання води для стиснення повітря показали його значне скорочення при зростанні коефіцієнта оребрення резервуару.

Список використаної літератури

1.Сухин Д.Е., Мостовов М.В. Устройство для получения механической энергии Патент Рос. Федерации 2105192, 20.02. 1998 г.

2.Chaplin M. Water Structure and Behavior. South Bank University, London. 2008. – С. 37-38.

3.Игнатов И., Мосин О.В., Великов Б. Математические модели, описывающие структуру воды. Институт Государственного управления, права и инновационных технологий // Науковедение. 2013. № 3. – С. 125- 126.

4.Beall P.T. States of water in biological systems. – Cryobiology, 1983, v.20, Nr. 3, p. 324 – 334

5.Water – a Comprehensive Treatise, v.1. The Physics and Chemistry of Water. Ed. F. Franks. New York – London, Plenum Press. 1972. – P. 77-78.

6.Масимов Э.А. ВОДА. Состояние и роль воды в биологических системах. Вода в природе. 2018. -

С. 62-63.

7. Пуховий І.І. Спосіб стиснення повітря в резервуарах та запобігання їх руйнуванню при замерзанні води і водних розчинів // Патент України на корисну модель № 101397, 10.09.2015 р.

8. Пуховий І.І. Замерзання води в циліндричних пластикових ємностях і тепловий потік, що отримується для нагрівання повітря теплотою кристалізації // Відновлювальна енергетика. 2007. - №4. - С. 43-46.

I. Pukhovi, Dr. Sc. (Eng.), Prof, ORCID 0000-0003-4915-9699

I. Nazarova, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-5809-2898

National Technical University of Ukraine Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

COMPRESSING AIR IN A TANK PARTIALLY FILLED FROZEN WATER AND ITS USE TO DRAIN WATER FROM SOLAR COLLECTORS

The use of the effect of increasing the volume of ice when freezing water to compress the air in a tank partially filled with water is considered. The aim of the study is to create conditions for the movement of the ice surface and determine the final air pressure after freezing water. A method of air compression has been developed and theoretical and experimental studies of the final air pressure have been performed. Experimental tests of a patented method of air compression with the provision of a movable ice surface by applying thermal insulation to the air chamber at the top of the tank were carried out. For this purpose, two air compressors of different sizes are made using cold air and a mixture of ice and salt. Obtained excess air pressures from 0.3 to 0.5 bar. The thermodynamic analysis of the process is carried out. The equation for determining the pressure at complete freezing of water, with a constant cross-section of the air compressor is obtained. Compression calculations are close to experimental data. Studies have shown the real technical possibility of air compression when water freezes in a rigid sealed tank and its use for automatic drainage of water from solar panels at the onset of frost. 1. The proposed and experimentally investigated method of ensuring the movement of the ice surface relative to the walls of the tank when compression of the air in the tank, by thermal insulation of the airspace. Obtained thermodynamic analysis of the equation for the final pressure of the air compressed by ice. When using a tank with a constant horizontal section, the final pressure does not depend on the area of the cross section and increases with increasing water level. The experiments on two installations showed that excess pressure reaches 0.3 - 0.5 bar. Freezing water tank is proposed to be used as a temperature sensor, and compressed air can drive a direct action valve. Calculations of water freezing time for compression of the air showed its significant reduction with the growth of the tank coefficient.

Key words: freezing of water in the tank, creation of a moving ice surface, compression of air by ice, use of compressed air to drain water from solar collectors in frost.

References

1. D.E. Sukhin, M.V. Mostovov, "Device for obtaining mechanical energy," (in Russian), RU Patent Utility Model 2105192, Febr. 20, 1998.
2. Chaplin M. Water Structure and Behavior. South Bank University, London. 2008. – P. 181-182.
3. Ignatov I., Mosin O.V., Velikov B., Mathematical models describing the structure of water. Institute of Public Administration, Law and Innovative Technologies // Scientific. 2013. № 3. – P. 125- 126.
4. Beall P.T. States of water in biological systems. – Cryobiology, 1983, v.20, Nr. 3, p. 324 – 334
5. Water – a Comprehensive Treatise, v.1. The Physics and Chemistry of Water. Ed. F. Franks. New York – London, Plenum Press, 1972. P. 77-78.
6. Masimov E.A., WATER. The state and role of water in biological systems. Water in nature. 2018. - P. 62-63.
7. I. Pukhovi, Freezing of water in cylindrical plastic containers and the heat flow obtained to heat the air by the heat of crystallization // Renewable energy. 2007. - №4. - P. 43-46.
8. I. Pukhovi, "Method of compressing air in tanks and preventing their destruction during freezing of water and aqueous solutions," (in Ukraine), Ukraine Patent Utility Model 101397, Sept. 10, 2015.

Надійшла 17.05.2022

Received 17.05.2022