

УДК 621.565:536.24:664.002

**В. В. Клименко, проф., канд. техн. наук**

*Полтавський національний технічний університет ім. Ю. Кондратюка*

**В. Н. Корнієнко, канд. техн. наук**

*Державна наукова установа «Всеросійський науково-дослідний інститут холодильної промисловості Россільгопакадемії»*

**О. В. Скрипник, канд. техн. наук**

*Кіровоградський національний технічний університет*

## Стендові випробовування макетного зразка газогідратного акумулятора природного холоду

У статті описано конструкцію макетного зразка газогідратного акумулятора природного холоду (ГАПХ) для систем охолодження плодів і овочів з активним вентиляванням і стенд для його випробовувань. Приведено методику і результати випробовувань. Підтверджено працездатність макетного зразка в умовах, характерних для експлуатації систем охолодження плодів і овочів з активним вентиляванням. За результатами досліджень рекомендовано проводити конструктивні розрахунки промислових ГАПХ з умов теплообміну.

**газогідратний холодоакумулятор – охолодження – природний холод – макетний зразок – стенд для випробовувань – утворення і плавлення газогідратів – теплообмін**

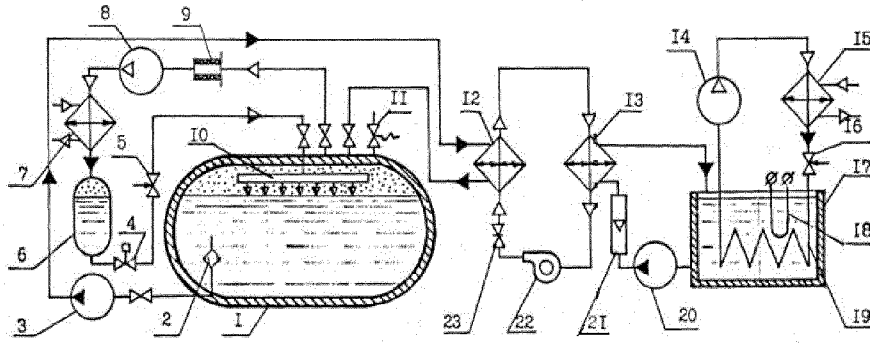
З метою зменшення енерговитрат для охолодження плодів і овочів часто застосовують системи активного вентилявання, що використовують природний холод, термодинамічна цінність якого визначається добовою термічною нерівновагою зовнішнього повітря [1 – 3].

Підвищити ефективність таких систем можна включенням в їхню схему газогідратного акумулятора природного холоду (ГАПХ) [3]. Проведені теоретичні і експериментальні дослідження термодинаміки і кінетики газогідратних процесів підтвердили перевагу застосування газогідратів для акумулювання природного холоду [4, 5].

Створенню і впровадженню промислових зразків ГАПХ передують розробка й випробовування макетного зразка, що дозволить перевірити обґрунтованість застосування отриманих результатів досліджень лабораторних моделей для розробки ГАПХ промислових масштабів, працездатність холодоакумулятора в умовах, характерних для натурних умов використання природного холоду.

Для досліджень процесів газогідратного акумулювання природного холоду в умовах, близьких до промислових, розроблено і створено макетний зразок акумулятора номінальною холодоємністю 100 МДж та стенд для його випробовувань, схема яких представлена на рис.1, а загальний вигляд – на рис. 2. Конструкційні матеріали для макетного зразка вибирали з урахуванням даних експериментальних досліджень по корозійній і хімічній активності гідратовмісних систем [6].

Конструкція макетного зразка акумулятора природного холоду включає такі основні елементи: ємність для утворення, зберігання і плавлення гідратів 1, компресорно-конденсаторний агрегат для циркуляції гідратоутворювача, повітряний охолоджувач гідратної води 12 і насос гідратної води 3 (рис.1). Всі елементи акумулятора скомпоновані в єдиний блок, розташований на шасі автомобільного



1 – ємність для утворення, збереження і плавлення газогідратів; 2 – сітчастий фільтр; 3, 20 – водяні насоси; 4 – соленоїдний вентиль; 5, 16 – регулюючі вентилі; 6 – ресивер; 7, 15 – повітряні конденсатори; 8, 14 – компресори; 9 – фільтр-осушувач; 10 – розподільник гідратоутворюючого агента; 11 – запобіжний клапан; 12 – повітряний охолоджувач гідратної води; 13 – повітроохолоджувач; 17 – бак; 18 – електронагрівальний елемент(ТЕН); 19 – занурений випарник; 21 – ротаметр; 22 – вентилятор; 23 – повітряна заслінка

Рисунок 1 – Схема макетного зразка газогідратного акумулятора природного холоду і стенда для його випробовувань

причепи для зручності транспортування до місця проведення промислових випробовувань (рис. 2).

Ємність 1, об'ємом  $1 \text{ м}^3$ , виконана зі сталі 20 товщиною 6 мм і розрахована на робочий тиск 1,0 МПа. У верхній частині ємності встановлений розподільник гідратоутворюючого агента 10 з нержавіючої труби діаметром  $10 \times 1,5$  мм, зігнутої у вигляді синусоїди. У ньому просвердлені 74 отвори діаметром 1,5 мм для подачі гідратоутворювача (парорідиної суміші R – 22) у процесі зарядки акумулятора. Ємність обладнана запобіжним клапаном, відрегульованим на тиск 1,1 МПа.

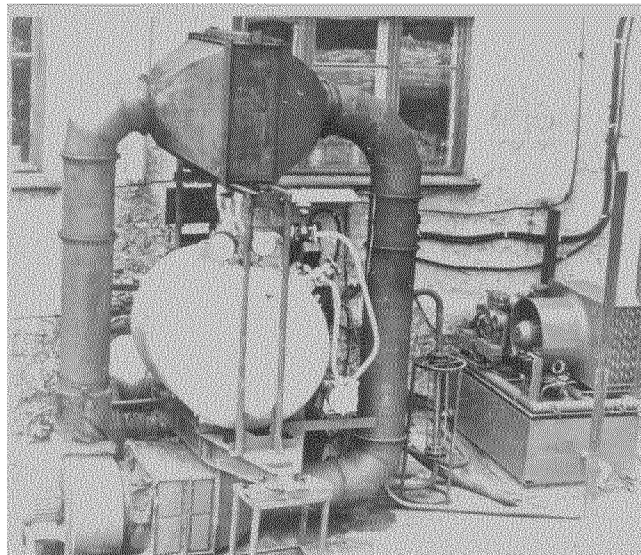


Рисунок 2 – Загальний вигляд макетного зразка газогідратного акумулятора природного холоду і стенда для його випробовувань.

Над ємністю розміщений охолоджувач гідратної води 12 із площею теплопередаючої поверхні з боку повітря  $27 \text{ м}^2$  і коефіцієнтом оребрення 5,7. Вода надходить у нього зверху на трубні ґрати і стікає вниз по вертикально розташованих трубах, оребрених з боку повітряного потоку. Збоку ємності на рамі для подачі

гідратної води встановлено вихровий насос 3 марки ВКО – 1/16 продуктивністю 3,6 м<sup>3</sup>/год і напором 16 м. вод. стовпа при 1450 об/хв. Щоб уникнути втрат R – 22 через витoki для насоса 3 був виготовлений новий сальник з парою тертя поліуретан–бронза. На всмоктувальній стороні цього насоса в нижній частині ємності передбачено сітчастий фільтр.

Контур циркуляції гідратоутворювача містить крейцкопфний компресор 8, виготовлений на базі стандартного компресора 2ФВ – 4, повітряний конденсатор 7 від агрегату ФАК – 0,7, електродвигун для приводу компресора і вентилятора конденсатора, ресивер обсягом 0,2 м<sup>3</sup> для збереження R – 22, дросельний 5 і соленоїдний 4 вентиля, фільтр–осушувач 9, встановлений на всмоктувальній стороні компресора 8. Зміни в конструкції компресора 8 були спрямовані на запобігання попадання мастила в ємність. Крейцкопфами і їхніми напрямними служать поршні і циліндри компресора 2ФВ – 4. Над базовим блоком циліндрів встановлена приставка, у якій розташовані сальникові ущільнення штовхачів, закріплені на поршнях компресора 2ФВ – 4. До приставки кріпиться стандартний блок циліндрів. На різьбленні штовхачів закріплені поршні, виготовлені зі сталі 45 з канавками під графітофторпластові кільця.

Стенд для випробовувань складається з власне акумулятора холоду, повітряного циркуляційного контуру і холодильно–нагрівальної установки. Остання виконана на базі МХУ – 8 і включає: компресор ФВ – 6 (на рис. 1 – позиція 14) і повітряний конденсатор 15 у вигляді компресорно–конденсаторного агрегату, розташованого на теплоізолюваному баці 17 об'ємом 1 м<sup>3</sup>, заглибний випарник 19, електронагрівальні елементи 18, загальною потужністю 8 кВт, насос 20 марки 1,5 К – 6 б, продуктивністю 9,6 м<sup>3</sup>/г і напором 12 м. вод. стовпа при 1450 про/хв.

Температуру суспензії і пари гідратоутворювача в ємності, води і повітря до і після повітроохолоджувача 12 вимірювали лабораторними термометрами з ціною розподілу 0,1°С і термопарами ТКХ – 4009, приєднаними до приладу КСП – 4. Тиск у ємності контролювали зразковим манометром з діапазоном вимірів 0÷1 МПа і класом точності 0,4.

Витрати холодоносія через повітроохолоджувач 13 визначали ротаметром РМ 1,6 Ж УЗ, гідратної води через охолоджувач 12 – за допомогою діафрагми і дифманометру ДТ – 50 з діапазоном вимірів 0÷700 мм рідини і похибкою ±2 мм, а повітря в контурі – за допомогою кутової напірної трубки, встановленої у повітропровід після охолоджувача 12, яка працює в комплекті з мікроманометром ММН – 240 (5) – 1,0 з діапазоном вимірів 0÷10 кПа і класом точності 1,0; гідратоутворюючого агенту – по мірних мітках покажчика рівня в ресивері, який показує обсяг рідкого гідратоутворювача в літрах.

Після монтажу контрольних–вимірювальних приладів були проведені випробовування на міцність і герметичність макетного зразка холодоакумулятора (з урахуванням використання в якості гідратоутворювача R – 22) і стенда для його випробовувань.

Стенові іспити макетного зразка проводили таким чином. У режимі зарядки акумулятора спочатку включали холодильну установку і насос 20. При цьому холодоносії, поступово охолоджуючись до 274÷276 К, забирався з бака насосом і прокачувався через повітроохолоджувач 13. Одночасно уключався вентилятор і повітря, циркулюючи в повітряному контурі, охолоджувалось до 279÷286 К. При сталому режимі вода з ємності подавалася насосом 3 в охолоджувач 12, де її температура знижувалася на 1,5÷3 К менше рівноважної температури гідратоутворення, яка відповідає робочому тиску в ємності. Через дросельний вентиль 5 з ресивера в ємність надходив у виді парорідинової суміші R – 22. Робочий тиск у ємності підтримували періодичним включенням (відключенням) компресора 8.

Момент початку утворення гідратів фіксували по стрибку температури суспензії і тискові гідратоутворювача в ємності 1.

Після утворення гідратів відключали всі агрегати і створювали необхідні умови для іспитів у режимі розрядки. Для цього за допомогою ТЕН нагрівали холодоносії у баці 17 і підвищували температуру повітря, яке циркулює через охолоджувач 12. При сталому режимі гідратна вода подавалася в охолоджувач 12, нагрівалася і направлялася в ємність 1 для плавлення гідратів. Необхідний рівноважний тиск у ній підтримували шляхом відсмоктування за допомогою компресора 8 пароподібного R – 22, що після конденсатора 7 у рідкому виді направлявся в ресивер.

У ході налагодження і попередніх випробовувань виявилось, що через сальник насоса 3 гідратної води відбувається витік гідратоутворювача, а через деякий час після початку роботи холодоакумулятора гідратоутворюючий агент перестає надходити в ємність з водою 1.

Це викликало необхідність змінити конструкцію сальника і пару тертя поліуретан–бронза замінити на графіт–сталь 45, а розподільник гідратоутворюючого агенту 10, що знаходився внизу ємності під шаром води, розмістити над рівнем води в паровій області. Після цих змін вдалося досягти усталеної роботи макетного зразка холодоакумулятора в різних режимах випробовувань.

Результати стендових випробовувань і їхній аналіз показали, що в початковий період процесу гідратоутворення швидкість зарядки  $q_3$  акумулятора досягає  $50 \div 60$  кВт/м<sup>3</sup> (рис.3), що добре узгоджується з даними по швидкостях гідратоутворення, отриманими в лабораторних кристалізаторах. Однак реальні середні швидкості зарядки після першої години роботи акумулятора виявилися істотно нижче:  $15 \div 20$  кВт/м<sup>3</sup>. Це пов'язано, на нашу думку, з недостатньою поверхнею теплообміну в охолоджувачі 12, що не дозволило досягти необхідних значень теплових потоків у процесі зарядки, незважаючи на частковий відвід теплоти гідратоутворення киплячим гідратоутворювачем.

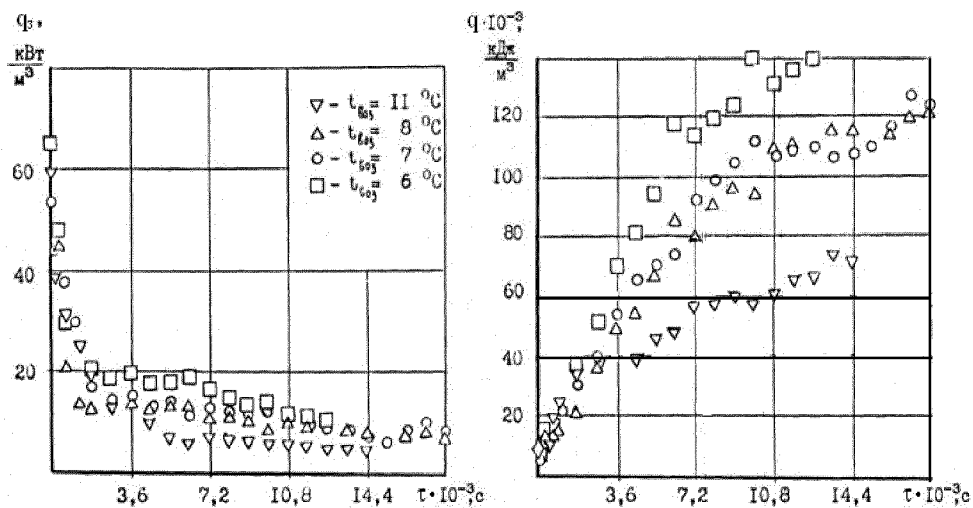


Рисунок 3 – Залежність швидкості зарядки  $q_3$  і холодоємності  $q$  макетного зразка від тривалості процесу  $\tau$  і температури повітря  $t_{\text{пов}}$  на вході в повітряний охолоджувач гідратної води

Установлено, що при температурах циркулюючого повітря  $279 \div 281$  К в акумуляторі підтримується різниця температур  $2 \div 4$  К між гідратною водою після охолоджувача 12 і рівноважною температурою в ємності 1. Процес гідратоутворення при цьому протікає з достатнім ступенем інтенсивності: холодоємність  $q$  складає

120÷150 МДж/м<sup>3</sup> за 3...4 години роботи. При температурах повітря на вході в охолоджувач 12 понад 283 К процес гідратування погіршується, що помітно позначається на величині  $q$ , яка за чотири години досягала 70 МДж/м<sup>3</sup> (рис.3).

У режимі розрядки акумулятор працював більш стійко при температурах циркулюючого повітря 288÷298 К. При цьому швидкість розрядки коливалася в межах 20÷35 кВт/м<sup>3</sup>, а її значення лімітувалося тільки умовами зовнішнього теплообміну, так само, як для лабораторних моделей і макетного зразка газогідратного акумулятора в системі з холодильною машиною [7].

Експериментально при випробуваннях встановлено, що швидкість процесів зарядки і розрядки, які прямо пропорційно залежать відповідно від величин швидкості утворення і плавлення газогідратів, у макетному зразку ГАПХ лімітується умовами теплопередачі, тому конструктивні розрахунки промислових акумуляторів такого типу можна проводити з умов теплообміну.

## Список літератури

1. Жадан В. З. Теплофизические основы хранения сочного растительного сырья на пищевых предприятиях / В. З. Жадан. – М.: Пищевая промышленность, 1976. – 238 с
2. Жадан В. З. Критерий климатического районирования страны в целях использования естественного холода в картофеле – и овощехранилищах / В. З. Жадан, Н. Н. Рослов, Л. В. Мартынова, С. И. Кулаков // Холодильная техника. – 1986. – №6. – С. 16 – 21.
3. Клименко В. В. Рациональное использование термической неравновесности наружного воздуха / В. В. Клименко, В. Н. Корниенко // Холодильная техника – 1989. – № 6. – С. 24 – 27.
4. Клименко В. В. Термодинамический анализ холодильных установок с аккумуляторами холода / Клименко В. В., Корниенко В. Н. // Холодильная техника. – 1994. – № 6. – С. 13 – 15.
5. Клименко В. В. Экспериментальная оценка процесса гидратообразования при аккумуляции холода / Клименко В. В. // Холодильная техника. – 1986. – № 10. – С. 33 – 36.
6. Клименко В. В., Бандуріна О. В., Корнієнко В. М. Експериментальне дослідження взаємодії гетерогених систем, які містять газогідрати, з конструкційними та ущільнюючими матеріалами / В. В. Клименко, О. В. Бандуріна, В. М. Корнієнко // Галузеве машинобудування та будівництво: збірник наукових праць ПолтНТУ. – 2011. – Вип. 1(29). – С. 225 – 229.
7. Корниенко В. Н. Экспериментальное исследование макетного образца газогидратного хладоаккумулятора для систем с холодильными машинами / В. Н. Корниенко, В. В. Клименко, А. В. Скрипник // Холодильная техника і технологія. – 2011. – № 6(134). – С. 15 – 18.

*В. Клименко, В. Корниенко, А. Скрипник*

### **Стеновые испытания макетного образца газогидратного аккумулятора естественного холода**

В статье описано конструкцию макетного образца газогидратного аккумулятора естественного холода (ГАКЕХ) для систем охлаждения плодов и овощей с активным вентилированием и стенд для его испытаний. Приведена методика и результаты испытаний. Подтверждена работоспособность макетного образца в условиях, характерных для эксплуатации систем охлаждения плодов и овощей с активным вентилированием. По результатам испытаний рекомендовано проводить конструктивные расчеты промышленных ГАКЕХ из условий теплообмена.

*V. Klymenko, V. Kornienko, A. Skrypnyk,*

### **Bench tests of a model sample gas hydrate the accumulator of a natural cold**

In article it is described a design of a model sample gas hydrate accumulator natural cold (GHANC) for systems of cooling fruits and vegetables with active aeration and the stand for its tests. The technique and results of tests is resulted. Serviceability of a model sample in conditions is confirmed, characteristic for operation of systems cooling fruits and vegetables with active aeration. By results of tests it is recommended to carry out constructive calculations industrial GHANC from conditions of heat exchange.

Одержано 21.09.12