

УДК 631.3:628.8

## ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ОБМЕРЗАННЯ ТЕПЛООБМІННОЇ ПОВЕРХНІ РЕКУПЕРАТИВНИХ ТЕПЛОУТИЛІЗАТОРІВ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ ВИКИДІВ ТВАРИННИЦЬКИХ ПРИМІЩЕНЬ

*Ю. В. ГЕРАСИМЧУК, к. т. н., с. н. с., e-mail: ger\_yuri@mail.ru – Національний науковий центр «Інститут механізації та електрифікації сільського господарства» НААН*

### РЕЗЮМЕ

**Мета.** Отримати аналітичну залежність для визначення температури обмерзання теплообмінної поверхні рекуперативних теплоутилізаторів вентиляційних викидів тваринницьких приміщень з урахуванням показників їх призначення та теплофізичних параметрів повітряних потоків через припливні і викидні канали.

**Методи.** Метод розподілу рекуперативного теплоутилізатора вентиляційних викидів тваринницьких приміщень на дві послідовно з'єднані частини, аналіз процесу передачі теплової енергії від потоку викидного повітря до потоку припливного повітря, синтез взаємозв'язків між показниками призначення рекуперативного теплоутилізатора та теплофізичними параметрами повітряних потоків через припливні і викидні канали, факторний експеримент, математико-статистичні методи оброблення результатів експерименту.

**Результати.** Отримана аналітична залежність для визначення температури обмерзання теплообмінної поверхні рекуперативних теплоутилізаторів

вентиляційних викидів тваринницьких приміщень з урахуванням показників призначення теплоутилізаторів та теплофізичних параметрів повітряних потоків через припливні і викидні канали.

**Висновки.** Методичний підхід щодо використання факторного експерименту на базі математичної моделі рекуперативного теплоутилізатора і вихідних параметрів режиму його роботи на межі обмерзання в тваринницькому приміщенні забезпечили отримання аналітичної залежності для визначення температури обмерзання теплообмінної поверхні. Якщо теплофізичні параметри повітряного середовища тваринницьких приміщень відповідають нормативним вимогам, то температура обмерзання теплообмінної поверхні рекуперативних теплоутилізаторів вентиляційних викидів знаходиться в межах від мінус 2 °С до мінус 14 °С.

**Ключові слова:** рекуперативний теплоутилізатор вентиляційних викидів тваринницьких приміщень, математична модель, теплообмінна поверхня, температура обмерзання.

UDC 631.3:628.8

## DETERMINATION OF TEMPERATURE OF ICING OF HEAT EXCHANGING SURFACE OF RECUPERATIVE HEAT UTILIZER VENTILATION EXHAUSTS OF LIVESTOCK PREMISES

*Y. V. GERASYMCHUK, PhD, Senior Researcher, e-mail: ger\_yuri@mail.ru – National Scientific Center «Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture» of the NAAS*

### SUMMARY

**The purpose.** Get the analytical dependence for determining the temperature of icing of heat exchanging surface of recuperative heat utilizers ventilation exhausts of livestock premises considering indicators of their appointment and thermophysical parameters of air flows through the tidal and miscarriages channels.

**Methods.** The method of distribution of recuperative heat utilizers ventilation exhausts livestock premises into two parts connected in series,

analysis of the process of heat energy transfer from the miscarriage air flow to the supply air flow, the synthesis of relationships between indicators appointment recuperative heat utilizers and and thermophysical parameters of air flow through the inlet and miscarriages channels factorial experiment, mathematical and statistical methods for processing of experimental results.

**Results.** Analytical dependence for determining the temperature of icing of heat transfer surface of recuperative heat utilizers ventilation exhausts livestock premises on the basis of indicators

appointment heat utilizers and thermophysical parameters of air flow through the inlet and miscarriages channels is received.

**Conclusions.** Methodical approach to using factorial experiment based on a mathematical model of regenerative heat utilizers and output parameters its mode of operation on the brink of icing in the livestock buildings assured obtaining analytical dependence for determining the temperature of icing

heat transfer surface. If the thermophysical parameters of the air environment in livestock premises meet regulatory requirement then the icing temperature of heat transfer surface of recuperative heat utilizers vent emissions ranges from minus 2 °C to minus 14 °C.

**Key words:** recuperative heat utilizer ventilation exhausts livestock premises, mathematical model, heat transfer surface, icing temperature.

УДК 631.3:628.8

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ОБЛЕДЕНЕНИЯ ТЕПЛООБМЕННОЙ ПОВЕРХНОСТИ РЕКУПЕРАТИВНЫХ ТЕПЛОУТИЛИЗАТОРОВ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ ЖИВОТНОВОДЧЕСКИХ ПОМЕЩЕНИЙ

*Ю. В. ГЕРАСИМЧУК, к. т. н., с. н. с., e-mail: ger\_yuri@mail.ru – Национальный научный центр «Институт механизации и электрификации сельского хозяйства» НААН*

### РЕЗЮМЕ

**Цель.** Получить аналитическую зависимость для определения температуры обледенения теплообменной поверхности рекуперативных теплоутилизаторов вентиляционных выбросов животноводческих помещений с учетом показателей их назначения и теплофизических параметров воздушных потоков через приточные и выкидные каналы.

**Методы.** Метод разделения рекуперативного теплоутилизатора вентиляционных выбросов животноводческих помещений на две последовательно соединенных части, анализ процесса передачи тепловой энергии от потока удаляемого воздуха к потоку приточного воздуха, синтез взаимосвязей между показателями назначения рекуперативного теплоутилизатора и теплофизическими параметрами воздушных потоков через приточные и выкидные каналы, факторный эксперимент, математико-статистические методы обработки результатов эксперимента.

**Результаты.** Получена аналитическая зависимость для определения температуры обледенения теплообменной поверхности рекуператив-

ных теплоутилизаторов вентиляционных выбросов животноводческих помещений с учетом показателей назначения теплоутилизаторов и теплофизических параметров воздушных потоков через приточные и выкидные каналы.

**Выводы.** Методический подход относительно использования факторного эксперимента на базе математической модели рекуперативного теплоутилизатора и исходных параметров режима его работы на грани обледенения в животноводческом помещении обеспечили получение аналитической зависимости для определения температуры обледенения теплообменной поверхности. Если теплофизические параметры воздушной среды животноводческих помещений отвечают нормативным требованиям, то температура обледенения теплообменной поверхности рекуперативных теплоутилизаторов вентиляционных выбросов находится в пределах от минус 2 °C до минус 14 °C.

**Ключевые слова:** рекуперативный теплоутилизатор вентиляционных выбросов животноводческих помещений, математическая модель, теплообменная поверхность, температура обледенения.

### ПРОБЛЕМА

За показником енергоємності валовий внутрішній продукт України, в тому числі і сільськогосподарської продукції, в декілька разів перевищує показники країн Західної і Східної Європи [1, 2]. В переліку заходів, направлених на збільшення енергоефектив-

ності економіки, передбачено широке використання вторинних джерел енергії. Вторинна енергія утворюється із первинної в результаті неповного її використання в технологічних процесах. У тваринництві – це теплова енергія, яка видаляється в навколишнє середовище з викидним вентиляційним повітрям, яка витрачається разом з екскрементами і із про-

дуктами горіння палива в системах опалення виробничих приміщень [3]. Теплову енергію вентиляційних викидів можна використовувати в холодний і перехідний періоди року для підігріву припливного повітря, яке поступає в тваринницькі приміщення при створенні необхідних параметрів повітряного середовища [4, 5, 6]. Для цього застосовують рекуперативні теплоутилізатори з зустрічним рухом повітряних потоків [7, 8]. У таких теплоутилізаторах передача теплової енергії від потоку викидного повітря до припливного здійснюється через теплообмінну поверхню, тому відбувається «сухий» підігрів припливного повітря, що особливо важливо для перенасичених вологою тваринницьких приміщень. Але наявний вітчизняний і зарубіжний досвід застосування рекуперативних теплоутилізаторів показує, що на ефективність їх застосування суттєво впливають специфічні умови експлуатації, характерні для тваринницьких приміщень [8, 9, 10]. Найбільший вплив має обмерзання теплообмінної поверхні. Це пов'язано з тим, що в рекуперативних теплоутилізаторах при охолодженні потоку повітря вентиляційних викидів, з температурою 10...21°C і відносною вологістю 40...80%, на теплообмінній поверхні зі сторони викидних каналів відбувається збільшення відносної вологості до стану насичення, після чого конденсується надлишкова водяна пара, яка при температурі теплообмінної поверхні, меншій нуля градусів, обмерзає і теплоутилізатор стає нероботоздатним. Відсутність методичних підходів для визначення температури обмерзання теплообмінної поверхні з урахуванням температури і відносної вологості повітряних потоків через припливні і викидні канали та показників призначення теплоутилізаторів стримує їх ефективне використання при забезпеченні мікроклімату тваринницьких приміщень.

#### АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Нормативними документами [4, 5, 6] з метою економії паливно – енергетичних ресурсів передбачається застосування теплоутилізаційних установок у системах вентиляції виробничих приміщень тільки при наявності систем захисту від обмерзання

теплообмінної поверхні і техніко – економічного обґрунтування. Крім того, досвід експлуатації рекуперативних тепло-утилізаторів у тваринницьких приміщеннях [8, 9, 10, 11] показав, що не приймаючи до уваги обмерзання теплообмінної поверхні, не можна об'єктивно оцінити їх ефективність. При цьому, в ряді робіт [8, 9, 12] наведені дані про обмерзання теплообмінної поверхні рекуперативних теплоутилізаторів уже при температурі зовнішнього повітря, меншій –10...–5°C. З [13, 14] випливає, що реперною точкою при визначенні температури обмерзання служить температура «холодного кутка» теплообмінної поверхні, а найбільша теплова продуктивність теплоутилізатора буде при температурі в реперній точці 0°C. Автори [13, 14] й інші підкреслюють, що температура обмерзання залежить від теплофізичних параметрів повітряних потоків на входах і виходах теплоутилізатора, його конструкційного виконання, ефективності теплообміну між припливним і викидним потоками та масовим співвідношенням між цими потоками. Водночас, у розроблених методиках для розрахунку техніко – економічної ефективності теплоутилізаційних установок [15, 16, 17] та в інших, не передбачене врахування впливу обмерзання теплообмінної поверхні на теплопродуктивність рекуперативних теплоутилізаторів при створенні мікроклімату в тваринницьких приміщеннях у холодний період року. Автором [18] запропоновано проводити розрахунки температури обмерзання теплообмінної поверхні рекуперативного теплоутилізатора методом кінцевих елементів. Але використання цього методу потребує громіздких обчислень і прийняття припущень, які суттєво впливають на результати розрахунків. Отже, для визначення температури обмерзання теплообмінної поверхні необхідно використовувати математичні моделі, які отримані з урахуванням особливостей процесу тепломасообміну між потоками припливного та викидного повітря з теплофізичними параметрами, характерними для тваринницьких приміщень у холодний період року.

**Мета досліджень.** Отримати аналітичну залежність для визначення температури обмерзання теплообмінної поверхні рекуперативних теплоутилізаторів вентиляційних

викидів тваринницьких приміщень з урахуванням показників їх призначення та теплофізичних параметрів повітряних потоків через припливні і викидні канали.

**Результати досліджень.** У доступній науково-технічній літературі опис процесу обмерзання теплообмінної поверхні рекуперативних теплоутилізаторів носить якісний характер і базується на фізичних уявленнях. Математичної моделі цього процесу і необхідних емпіричних даних немає. Разом з тим, для визначення температури обмерзання теплообмінної поверхні можна використати математичну модель рекуперативного теплоутилізатора. Відмінною особливістю цієї моделі повинна бути можливість введення таких вихідних даних, які забезпечують режим роботи теплоутилізатора на межі обмерзання. Для отримання такої моделі проведений аналіз і синтез процесів передачі теплової енергії від потоку викидного повітря до потоку припливного в рекуперативному теплоутилізаторі. При цьому враховано, що в холодний і перехідний пори року вологовміст потоку повітря, який видається з тваринницького приміщення, значно перевищує вологовміст припливного повітря. Характерною особливістю теплообміну між цими потоками повітря в рекуперативному теплоутилізаторі є конденсація водяної пари на теплообмінній поверхні зі сторони викидних

каналів та стовідсоткова вологість потоку повітря на виході викидних каналів теплоутилізатора. Причому, початок конденсації водяної пари відбувається не при вході у викидні канали теплоутилізатора, а на деякій відстані від входу. Тому, на тій частині теплообмінної поверхні, яка примикає до входу викидних каналів теплоутилізатора, відбувається процес явного теплообміну між потоками припливного і викидного повітря, а на іншій частині – процес з конденсацією водяної пари. Отже, рекуперативний теплоутилізатор з зустрічним рухом повітряних потоків в умовах тваринницьких і птахівничих приміщеннях можна представити у вигляді двох послідовно з'єднаних, один з яких працює в «сухому» режимі роботи, а другий – з конденсацією водяної пари на теплообмінній поверхні. Такий аналіз роботи рекуперативного теплоутилізатора з розподілом на два послідовно з'єднані забезпечив отримання взаємозв'язків у вигляді відповідних аналітичних залежностей між показниками призначення теплоутилізатора і теплофізичними параметрами повітряних потоків – температурою і відносною вологістю [19]. Результатом синтезу цих взаємозв'язків є математична модель рекуперативного теплоутилізатора вентиляційних викидів тваринницьких приміщень у вигляді таких аналітичних залежностей:

$$t_{K2} - t_{П2} = \eta_t \cdot (t_{П1} - t_{П2}) + \xi \cdot r \cdot (d_{П1} - d_{К1}) \cdot \frac{\eta_t \cdot (t_{П1} - t_{П1}^K) + t_{П1}^K - t_{K2}}{c \cdot (t_{П1} - t_{K2})} \quad (1)$$

$$(t_{K2} - t_{П2}) \cdot (c + c_B \cdot d_{П2}) = c \cdot (t_{П1} - t_{К1}) + c_B \cdot (t_{П1} \cdot d_{П1} - t_{К1} \cdot d_{К1}) + r \cdot (d_{П1} - d_{К1}), \quad (2)$$

де  $t_{K2}$  – температура потоку повітря на виході припливних каналів теплоутилізатора, °С;

$t_{П2}$  – температура потоку повітря на вході припливних каналів, °С;

$\eta_t$  – коефіцієнт температурної ефективності теплоутилізатора;

$t_{П1}$  – температура потоку повітря на вході викидних каналів теплоутилізатора, °С;

$\xi$  – коефіцієнт використання теплоти конденсації водяної пари викидного повітря;

$r$  – питома теплота пароутворення, кДж/кг<sub>вп</sub>;

$d_{П1}$  – вологовміст повітряного потоку на вході викидних каналів теплоутилізатора, кг<sub>вп</sub>/кг<sub>сп</sub>;

$d_{К1}$  – вологовміст повітряного потоку на виході викидних каналів теплоутилізатора, кг<sub>вп</sub>/кг<sub>сп</sub>;

$t_{П1}^K$  – температура конденсації водяної пари потоку викидного повітря, °С;

$c$  – питома теплоємність сухого повітря, кДж/(кг<sub>сп</sub>·°С);

$c_B$  – питома теплоємність водяної пари, кДж/(кг<sub>вп</sub>·°С);

$d_{П2}$  – вологовміст повітряного потоку на вході припливних каналів теплоутилізатора, кг<sub>вп</sub>/кг<sub>сп</sub>;

$t_{К1}$  – температура потоку повітря на виході викидних каналів теплоутилізатора, °С.

Вологовміст повітряних потоків на вході і виході викидних каналів та на вході припливних каналів теплоутилізатора і температура конденсації водяної пари потоку викидного повітря визначаються за формулами:

$$d_{П1} = \frac{0,622 \cdot \varphi_{П1} \cdot P_0 \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot t_{П1}}{\beta + t_{П1}}\right)}{P_a - \varphi_{П1} \cdot P_0 \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot t_{П1}}{\beta + t_{П1}}\right)}; \quad (3)$$

$$d_{К1} = \frac{62,2 \cdot P_0 \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot t_{К1}}{\beta + t_{К1}}\right)}{P_a - 100 \cdot P_0 \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot t_{К1}}{\beta + t_{К1}}\right)}; \quad (4)$$

$$d_{П2} = \frac{0,622 \cdot \varphi_{П2} \cdot P_0 \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot t_{П2}}{\beta + t_{П2}}\right)}{P_a - \varphi_{П2} \cdot P_0 \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot t_{П2}}{\beta + t_{П2}}\right)}; \quad (5)$$

$$t_{П1}^K = \frac{\beta \cdot \left(\ln \frac{\varphi_{П1}}{100} \cdot (\beta + t_{П1}) + \alpha \cdot t_{П1}\right)}{\beta \cdot \alpha - \ln \frac{\varphi_{П1}}{100} \cdot (\beta + t_{П1})}, \quad (6)$$

де  $\varphi_{П1}$  – відносна вологість повітря на вході у викидні канали теплоутилізатора (відносна вологість повітря в приміщенні), %;

$\varphi_{П2}$  – відносна вологість повітря на вході в припливні канали теплоутилізатора (відносна вологість повітря зовнішнього середовища), %;

$P_a$  – атмосферний тиск, Па;

$P_0$ ,  $\alpha$  і  $\beta$  – постійні коефіцієнти,

згідно [20]  $P_0 = 6,1121$  гПа,  $\alpha = 17,5045$ ,  $\beta = 241,2$  °С.

Обмеження цієї математичної моделі рекуперативного теплоутилізатора вентиляційних викидів тваринницьких приміщень наступні:  $t_{П1} > t_{П2}$ ;  $t_{К1} < t_{П1}^K$ ; якщо  $t_{К1} \geq t_{П1}^K$ , то  $d_{К1} = d_{П1}$ .

Вихідні дані для забезпечення режиму роботи рекуперативного теплоутилізатора вентиляційних викидів тваринницьких приміщень на межі обмерзання отримуємо із наступних міркувань.

Відомо [14, 15], що обмерзання конденсації водяної пари викидного повітря на теплообмінній поверхні починається в «холодному кутку», який примикає до входу в припливні канали теплоутилізатора. Ця частина теплообмінної поверхні з однієї сторони знаходиться під дією теплового потоку припливного повітря з температурою  $t_{П2}$ , а з іншої сторони, під дією теплового потоку викидного повітря з температурою  $t_{К1}$ . Тому, коли сума температур  $t_{П2}$  і  $t_{К1}$  більша нуля, то і більша нуля температура теплообмінної поверхні в «холодному кутку», а коли ця сума температур менша нуля, то менша нуля і температура теплообмінної поверхні. На межі обмерзання теплообмінна поверхня буде знаходитись тоді, коли сума температур  $t_{П2}$  і  $t_{К1}$  дорівнює нулю. Аналітична форма цієї умови має такий вигляд:

$$t_{об} = t_{П2} = -t_{К1}, \quad (7)$$

де  $t_{об}$  – температура обмерзання теплообмінної поверхні, °С.

Врахувавши в математичній моделі рекуперативного теплоутилізатора (1), (2) умову перебування теплообмінної поверхні на межі обмерзання (7), шляхом заміни температури  $t_{П2}$  і  $-t_{К1}$  на  $t_{об}$ , отримуємо аналітичний вираз для визначення температури обмерзання теплообмінної поверхні:

$$\eta_t \cdot (t_{II1} - t_{o6}) - \frac{c \cdot (t_{II1} + t_{o6}) + c_B \cdot (t_{II1} \cdot d_{II1} + t_{o6} \cdot d_{K1}^{o6}) + r \cdot (d_{II1} - d_{K1}^{o6})}{c + c_B \cdot d_{II2}^{o6}} + \xi \cdot \frac{r}{c} \cdot (d_{II1} - d_{K1}^{o6}) \times$$

$$\eta_t \cdot (t_{II1} - t_{II1}^K) + t_{II1}^K - t_{o6} - \frac{c \cdot (t_{II1} + t_{o6}) + c_B \cdot (t_{II1} \cdot d_{II1} + t_{o6} \cdot d_{K1}^{o6}) + r \cdot (d_{II1} - d_{K1}^{o6})}{c + c_B \cdot d_{II2}^{o6}}$$

$$\times \frac{t_{II1} - t_{o6} - \frac{c \cdot (t_{II1} + t_{o6}) + c_B \cdot (t_{II1} \cdot d_{II1} + t_{o6} \cdot d_{K1}^{o6}) + r \cdot (d_{II1} - d_{K1}^{o6})}{c + c_B \cdot d_{II2}^{o6}}}{c + c_B \cdot d_{II2}^{o6}} = 0, \quad (8)$$

де  $d_{K1}^{o6}$ ,  $d_{II2}^{o6}$  – вологовміст повітряного потоку на виході викидних каналів і на вході припливних каналів при температурі обмерзання теплообмінної поверхні, кг<sub>вп</sub>/кг<sub>сп</sub>. Визначаються за формулами:

$$d_{II2}^{o6} = \frac{0,622 \cdot \varphi_{II2} \cdot P_0 \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot t_{o6}}{\beta + t_{o6}}\right)}{P_a - \varphi_{II2} \cdot P_0 \cdot \exp\left(\frac{\alpha \cdot t_{o6}}{\beta + t_{o6}}\right)}; \quad (9)$$

$$d_{K1}^{o6} = \frac{62,2 \cdot P_0 \cdot \exp\left(\frac{-\alpha \cdot t_{o6}}{\beta - t_{o6}}\right)}{P_a - 100 \cdot P_0 \cdot \exp\left(\frac{-\alpha \cdot t_{o6}}{\beta - t_{o6}}\right)}$$

(10)

З рівняння (8) неможливо виразити в явному вигляді залежність температури обмерзання від показників призначення теплоутилізатора і теплофізичних параметрів повітряних потоків через припливні і викидні канали. Тому, така залежність була отримана у вигляді рівняння регресії після проведення чотири-факторного експерименту з використанням аналітичного виразу (8). При цьому, рівні варіювання факторів знаходились у таких межах:

- коефіцієнт температурної ефективності теплоутилізатора,  $\eta_t$  – 0,35; 0,5; 0,65;

- коефіцієнт використання теплоти конденсації водяної пари викидного повітря,  $\xi$  –

$$t_{o6}^* = -8,96 + 12,1029 \cdot \eta_t - 7,2397 \cdot \xi + 0,1429 \cdot \varphi_{II1} - 6,1181 \cdot \eta_t^2 + 3,5 \cdot \eta_t \cdot \xi -$$

$$- 0,0515 \cdot \eta_t \cdot \varphi_{II1} + 0,4408 \cdot \eta_t \cdot t_{II1} + 0,0633 \cdot \xi \cdot \varphi_{II1} + 0,1708 \cdot \xi \cdot t_{II1} - 0,0007 \varphi_{II1}^2 -$$

$$- 0,0078 \cdot \varphi_{II1} \cdot t_{II1} - 0,0105 \cdot t_{II1}^2 \quad (11)$$

Рівняння адекватне на рівні 0,95. Коефіцієнт детермінації становить 0,998.

З використанням залежності (11) визначена температура обмерзання теплообмінної поверхні рекуперативного теплоутилізатора вентиляційних викидів тваринницьких приміщень при різних показниках призначення і теплофізичних параметрах повітряного середовища. Результати розрахунку приведені в таблиці.

0,15; 0,25; 0,35;

- температура повітряного потоку на вході у викидні канали теплоутилізатора (температура повітря в приміщенні),  $t_{I1}$  – 10 °C; 15 °C; 20 °C;

- відносна вологість повітряного потоку на вході у викидні канали теплоутилізатора (відносна вологість повітря в приміщенні),  $\varphi_{I1}$  – 50%; 65%; 80%.

Межі варіювання факторів визначались з урахуванням параметрів рекуперативних теплоутилізаторів, які можуть використовуватись у тваринницьких приміщеннях, а межі зміни теплофізичних параметрів повітряного середовища – згідно нормативних документів [4, 5, 6]. Крім того, попередні дослідження показали, що коливання відносної вологості припливного повітря не мають суттєвого впливу на температуру обмерзання теплообмінної поверхні в холодний період року тому, що вологовміст припливного повітря в цей період знаходиться в межах від 0,0005 кг<sub>вп</sub>/кг<sub>сп</sub> до 0,003 кг<sub>вп</sub>/кг<sub>сп</sub>, а вологовміст викидного повітря – на порядок більший. В зв'язку з цим, при проведенні експерименту відносна вологість припливного повітря не змінювалась і приймалась рівною середній вологості зовнішнього повітря в холодний період року.

За результатами дослідження отримане рівняння регресії для визначення температури обмерзання теплообмінної поверхні рекуперативного теплоутилізатора в такому вигляді:

**Таблиця** – Температура обмерзання теплообмінної поверхні при різних показниках призначення рекуперативного теплоутилізатора і теплофізичних параметрах повітря в тваринницькому приміщенні.

**Table** – Icing temperature of heat transfer surface at different indicators appointment recuperative heat utilizer and thermophysical parameters of the air in livestock premise.

Температура повітря в приміщенні, $t_{f1}$ , °C	Коефіцієнт використання теплоти конденсації водяної пари, $\xi$	Відносна вологість повітря в приміщенні, $\varphi_{f1}$ , %	Коефіцієнт температурної ефективності, $\eta_t$			
			0,3	0,4	0,5	0,6
10	0,15	50	-5,1	-4,1	-3,2	-2,4
		65	-5,4	-4,5	-3,7	-3,0
		80	-6,1	-5,2	-4,5	-3,9
	0,35	50	-5,4	-4,5	-3,6	-2,5
		65	-5,5	-4,5	-3,6	-2,8
		80	-6,0	-5,0	-4,2	-3,5
15	0,15	50	-7,6	-6,3	-5,2	-4,1
		65	-8,5	-7,3	-6,3	-5,4
		80	-9,7	-8,6	-7,7	-6,8
	0,35	50	-7,7	-6,4	-5,2	-4,1
		65	-8,4	-7,2	-6,1	-5,1
		80	-9,4	-8,3	-7,3	-6,4
20	0,15	50	-10,1	-9,1	-7,8	-6,6
		65	-12,1	-10,7	-9,5	-8,3
		80	-13,9	-12,6	-11,4	-10,4
	0,35	50	-10,0	-9,0	-7,6	-6,3
		65	-11,8	-10,4	-9,0	-7,8
		80	-13,5	-12,1	-10,8	-9,7

З таблиці випливає, що температура обмерзання теплообмінної поверхні рекуперативних теплоутилізаторів, з показниками призначення згідно [21], знаходиться в межах від мінус 2 °C до мінус 14 °C, якщо теплофізичні параметри повітряного середовища в тваринницьких приміщеннях відповідають вимогам нормативних документів [4, 5, 6]. При збільшенні температури і відносної вологості повітря в тваринницькому приміщенні температура обмерзання теплообмінної поверхні зменшується, а при збільшенні коефіцієнта температурної ефективності – збільшується.

#### ВИСНОВКИ

Методичний підхід щодо використання факторного експерименту на базі математичної моделі рекуперативного теплоутилізатора і вихідних параметрів режиму його роботи на межі обмерзання в тваринницькому приміщенні забезпечили отримання аналітичної залежності для визначення температури обмерзання теплообмінної поверхні. Відрізняється можливістю визначення як темпе-

ратури обмерзання теплообмінної поверхні, так і впливу динаміки змін показників призначення рекуперативного теплоутилізатора та теплофізичних параметрів повітряного потоку через його викидні канали на температуру обмерзання.

Температура обмерзання теплообмінної поверхні рекуперативних теплоутилізаторів вентиляційних викидів тваринницьких приміщень знаходиться в межах від мінус 2 °C до мінус 14 °C, якщо теплофізичні параметри повітряного середовища приміщень відповідають нормативним вимогам. При збільшенні температури і відносної вологості повітря в тваринницькому приміщенні температура обмерзання теплообмінної поверхні зменшується, а при збільшенні коефіцієнта температурної ефективності – збільшується.

#### БІБЛІОГРАФІЯ

1. Енергетична стратегія України на період до 2030 року / Схвалена розпорядженням Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 № 1071-р. [Електронний ресурс].– Режим доступу: //

<http://document.ua/energetichna-strategija-ukrayini-na-period-do-2030-r.-doc195024.html>.

2. Адамчук В. В. Наукове забезпечення ефективного застосування електричної енергії в технологічних процесах агропромислового виробництва / В. В. Адамчук, В. Ф. Петриченко, В. Г. Мироненко, Ю. В. Герасимчук // Механізація та електрифікація сільського господарства // Міжвідомчий тематичний науковий збірник. – Глеваха, 2014. – Вип. 99. Т.1 – С. 14–33.

3. Адамовски Р. Использование вторичной теплоты вентиляционного воздуха для обогрева помещений в животноводстве / Р. Адамовски, Д. Адамовски // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2004. – №6. – С.16,17.

4. Відомчі норми технологічного проектування. Скотарські підприємства (комплекси, ферми, малі ферми): ВНТП-АПК-01.05. – К.: Мінагрополітики України, 2005. – 112 с.

5. Відомчі норми технологічного проектування. Свилярські підприємства (комплекси, ферми, малі ферми): ВНТП-АПК-02.05. – К.: Мінагрополітики України, 2005. – 98 с.

6. Відомчі норми технологічного проектування. Підприємства птахівництва: ВНТП-АПК-04.05. – К.: Мінагрополітики України, 2005. – 90 с.

7. Мишуров Н.П., Кузьмина Т. Н. Энергосберегающее оборудование для обеспечения микроклимата в животноводческих помещениях. Научно -аналитический обзор. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2004. – 106 с.

8. Раяк М. Б. Анализ результатов испытаний рекуперативных теплообменников / М. Б. Раяк, В. А. Шмидт, Е. Е. Карпис, В. И. Прохоров, Б. И. Макаров // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1981.–№4. – С.20–23.

9. Харитонович М. В. Энергетическая оценка теплообменников в системах вентиляции ферм / М. В. Харитонович // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1980. – №9. – С. 15–18.

10. Соколов А. Г. Работоспособность рекуперативных теплообменников при низких наружных температурах // Исследование машин и оборудования для механизации свиноводства. Сборник научных трудов. / Всероссийский научно – исследовательский и проектно–технологический институт животноводства. Подольск. – 1988. – С.99–103.

11. Ходченко Н. К. Утилизация теплоты удаляемого воздуха на фермах / Н. К. Ходченко // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1981. – №4. – С. 18–20.

12. Белоногов Н. В. Утилизация теплоты в перекрестно-точных пластинчатых рекуператорах / Н. В. Белоногов // Сантехніка, опалення, кондиціонування. – 2012. – №2 [Електронний

ресурс]. – Режим доступу: <http://www.c-o-k.ru/articles/utlizaciya-teploty-v-perekrestnotochnyh-plastinchatyh-rekuperatorah-1>.

13. Быстров В. П. Утилизация тепла вытяжного воздуха с помощью рекуперативных теплообменников типа «воздух – воздух» / В. П. Быстров, Л. И. Ефимов, М. В. Корзакова, Ю. М. Соснер // Водоснабжение и санитарная техника. – 1981. – № 3. – С. 10–12.

14. Вишневский Е. П. Технические решения систем вентиляции / Е. П. Вишневский // Сантехніка, опалення, кондиціонування. – 2010. – №12 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: // <http://www.c-o-k.ru/articles/tehnicheskie-resheniya-sistem-ventilyacii>.

15. Рекомендации по расчету и проектированию систем обеспечения микроклимата животноводческих и птицеводческих зданий при новом строительстве и реконструкции с учетом экономии топливно-энергетических ресурсов. – К.: УкрНИИагропроект. 1986. – 82 с.

16. Рекомендации по расчету и проектированию систем обеспечения микроклимата животноводческих помещений с утилизацией теплоты выбросного воздуха [Електронний ресурс]. – Режим доступу: // <http://www.gostrf.com/normadata/1/4293845/4293845766.htm>.

17. Растрыгин В. Н. Методика расчета энергосберегающей системы микроклимата с электротеплоутилизатором и озонатором / В. Н. Растрыгин, А. В. Тихомиров, Д. А. Тихомиров, А. Ф. Першин // Техника в сельском хозяйстве. – 2006. – № 2. – С. 19–23.

18. Вишневский Е. П. Пластинчатые теплообменники рекуперативного типа / Е. П. Вишневский // Сантехніка, опалення, кондиціонування. – 2011. – №6 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: // <http://www.c-o-k.ru/articles/plastinchatye-teploobmenniki-rekuperativnogo-tipa>.

19. Герасимчук Ю. В. Математична модель рекуперативного теплоутилизатора вентиляційних викидів тваринницьких приміщень / Ю. В. Герасимчук // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2014. – №194. Ч. 2 – С.93–100.

20. Таблицы психрометрические. Построение, содержание, расчетные соотношения: ГОСТ 8.524-85. – [Чинний від1986-07-01]. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1985. – 34 с.

21. Техніка сільськогосподарська. Рекуперативні теплоутилизатори вентиляційних викидів тваринницьких приміщень. Основні параметри й загальні технічні вимоги: СОУ 29.3–37–448: 2006. – К.: Мінагрополітики України, 2006. – 13 с.



REFERENCES

1. Energetichna strategija Ukraïni na period do 2030 roku / Shvalena rozporjadzhennjam Kabinetu Ministriv Ukraïni vid 24 lipnja 2013 № 1071-r. [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu: // <http://document.ua/energetichna-strategija-ukrayini-na-period-do-2030-r.-doc195024.html>.
2. Adamchuk V. V. Naukove zabezpechennja efektyvnogo zastosuvannja elektrichnoï energii v tehnologichnih procesah agropromislovogo virobnictva / V. V. Adamchuk, V. F. Petrichenko, V. G. Mironenko, Ju. V. Gerasimchuk // *Mehanizacija ta elektrifikacija sil'skogo gospodarstva // Mizhvidomchij tematicnij naukovij zbirnik*. – Glevaha, 2014. – Vip. 99, t.1 – S. 14 – 33.
3. Adamovski R. Ispol'zovanie vtorichnoj teploty ventiljacionnogo vozduha dlja obogreva pomeshhenij v zhivotnovodstve / R. Adamovski, D. Adamovski // *Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva*. – 2004. – №6. – S.16,17.
4. Vidomchi normi tehnologichnogo proektuvannja. Skotars'ki pidpriemstva (kompleksi, fermi, mali fermi): VNTP-APK-01.05. – K.: Minagropolitiki Ukraïni, 2005. – 112 s.
5. Vidomchi normi tehnologichnogo proektuvannja. Svinars'ki pidpriemstva (kompleksi, fermi, mali fermi): VNTP-APK-02.05. – K.: Minagropolitiki Ukraïni, 2005. – 98 s.
6. Vidomchi normi tehnologichnogo proektuvannja. Pidpriemstva ptahivnictva: VNTP-APK-04.05. – K.: Minagropolitiki Ukraïni, 2005. – 90 s.
7. Mishurov N.P., Kuz'mina T. N. Jenergo-zberegajushhee oborudovanie dlja obespechenija mikroklimata v zhivotnovodcheskih pomeshhenijah. *Nauchno analiticheskij obzor*. – M.: FGNU «Rosinformagroteh», 2004. – 106 s.
8. Rajak M. B. Analiz rezul'tatov ispytanj rekuperativnyh teploobmennikov / M. B. Rajak, V. A. Shmidt, E. E. Karpis, V. I. Prohorov, B. I. Makarov // *Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva*. – 1981.–№4. – S.20 – 23.
9. Haritonovich M. V. Jenergeticheskaja ocenka teploobmennikov v sistemah ventiljacji ferm / M. V. Haritonovich // *Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva*. – 1980. – №9. – S. 15 – 18.
10. Sokolov A. G. Rabotosposobnost' rekuperativnyh teploobmennikov pri nizkih naruzhnyh temperaturah // *Issledovanie mashin i oborudovanija dlja mehanizacii svinovodstva. Sbornik nauchnyh trudov. / Vserossijskij nauchno – issledovatel'skij i proektno–tehnologicheskij institut zhivotnovodstva. Podol'sk*. – 1988. – S.99 – 103.
11. Hodchenko N. K. Utilizacija teploty udaljaemogo vozduha na fermah / N. K. Hodchenko // *Mehanizacija i jelektrifikacija sel'skogo hozjajstva*. – 1981. – №4. – S. 18 – 20.
12. Belonogov N. V. Utilizacija teploty v perekrestno-tochnyh plastinchatyh rekuperatorah / N. V. Belonogov // *Santehnika, opalennja, kondicijuvannja*. – 2012. – №2 [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu: <http://www.c-o-k.ru/articles/-utilizacija-teploty-v-perekrestnotochnyh-plastinchatyh-rekuperatorah-1>.
13. Bystrov V. P. Utilizacija tepla vytjazhnogo vozduha s pomoshh'ju rekuperativnyh teploobmennikov tipa «vozduh – vozduh» / V. P. Bystrov, L. I. Efimov, M. V. Korzakova, Ju. M. Sosner // *Vodosnabzhenie i sanitarnaja tehnika*. – 1981. – № 3. – S. 10 – 12.
14. Vishnevskij E. P. Tehnicheskie reshenija sistem ventiljacji / E. P. Vishnevskij // *Santehnika, opalennja, kondicijuvannja*. – 2010. – №12 [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu: // <http://www.c-o-k.ru/articles/tehnicheskie-resheniya-sistem-ventilyacii>.
15. Rekomendacii po raschetu i proektirovaniju sistem obespechenija mikroklimata zhivotnovodcheskih i pticevodcheskih zdaniy pri novom stroitel'stve i rekonstrukcii s uchetom jekonomii toplivno-jenergeticheskikh resursov. – K.: UkrNIIagropoekt. 1986. – 82 s.
16. Rekomendacii po raschetu i proektirovaniju sistem obespechenija mikroklimata zhivotnovodcheskih pomeshhenij s utilizaciej teploty vybrosnogo vozduha [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu: // <http://www.gostrf.com/normadata/1/-4293845/4293845766.htm>.
17. Rastrygin V. N. Metodika rascheta jenergo-sberegajushhej sistemy mikroklimata s jelektro-teploutilizatorom i ozonatorom / V. N. Rastrygin, A. V. Tihomirov, D. A. Tihomirov, A. F. Pershin // *Tehnika v sel'skom hozjajstve*. – 2006. – № 2. – S. 19 – 23.
18. Vishnevskij E. P. Plastinchatye teploobmenniki rekuperativnogo tipa / E. P. Vishnevskij // *Santehnika, opalennja, kondicijuvannja*. – 2011. – №6 [Elektronnij resurs]. – Rezhim dostupu: // <http://www.c-o-k.ru/articles/plastinchatye-teploobmenniki-rekuperativnogo-tipa>.
19. Gerasimchuk Ju. V. Matematichna model' rekuperativnogo teploutilizatora ventiljacijnih vikidiv tvarinnic'kih primishhen' / Ju. V. Gerasimchuk // *Naukovij visnik Nacional'nogo universitetu biosursiv i prirodokoristuvannja Ukraïni*. – 2014. – №194, ch. 2 – S.93 – 100.
20. Tablicy psihrometricheskie. Postroenie, sodержanie, raschetnye sootnoshenija: GOST 8.524-85. – [Chinnij vid1986-07-01]. – M.: Gosudarstvennyj komitet SSSR po standartam, 1985. – 34 s.
21. Tehnika sil'skogogospodars'ka. Rekuperativni teploutilizatori ventiljacijnih vikidiv tvarinnic'kih primishhen'. Osnovni parametri j zagal'ni tehnicni vimogi: SOU 29.3–37–448: 2006. – K.: Minagropolitiki Ukraïni, 2006. – 13 s.