

## ОБОСНОВАНИЕ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИКЛИЧЕСКОГО РЕЖИМА ЭКСПЛУАТАЦИИ ПЛАСТИНЧАТЫХ РЕКУПЕРАТИВНЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ В УСЛОВИЯХ ОБМЕРЗАНИЯ

Кавыгин А.А.<sup>1</sup>, Колодяжный С.А.<sup>1</sup>, Куцыгина О.А.<sup>1</sup>

*ФГБОУ ВПО «Воронежский Государственный архитектурно-строительный университет», Воронеж, Россия (394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: olga.kutsigina@rambler.ru*

Рассмотрен подход к совершенствованию энергетической эффективности систем вентиляции с применением высокоэффективных пластинчатых рекуперативных теплоутилизаторов в результате организации их работы в циклическом режиме при эксплуатации в условиях обмерзания. Преимущества предлагаемого метода эксплуатации вентиляционной установки обусловлены высокой эффективностью рекуперации, отсутствием смешения потоков приточного и вытяжного воздуха, а также необходимости дополнительного нагрева приточного воздуха в режиме обмерзания. Однако, предложенный подход к использованию вторичных энергоресурсов в системах вентиляции влечет дополнительные расходы энергетических и финансовых ресурсов, что требует экономического обоснования для текущих параметров системы. А изменение стоимостных показателей с течением времени предопределяет важность выявления области экономической целесообразности эксплуатации пластинчатых рекуперативных теплоутилизаторов в циклическом режиме как эффективного энергосберегающего мероприятия. Приведена адаптированная методика обоснования экономической эффективности циклического режима эксплуатации пластинчатых рекуперативных теплообменников и области экономической целесообразности его применения. Представлен пример расчета, подтверждающий экономическую эффективность, предлагаемого метода эксплуатации пластинчатых рекуперативных теплоутилизаторов в циклическом режиме, несмотря на дополнительные затраты. Определена область экономической целесообразности применения предлагаемого метода относительно стоимости приобретения и установки теплообменника в системах вентиляции.

Ключевые слова: пластинчатый рекуперативный теплоутилизатор, энергетическая и экономическая эффективность, циклический режим, условия обмерзания, эксплуатация, область экономической целесообразности

## THE ECONOMIC EFFICIENCY JUSTIFICATION OF THE CYCLIC OPERATION MODE FOR RECUPERATIVE HEAT EXCHANGER PLATE IN CONDITIONS OF FROSTING

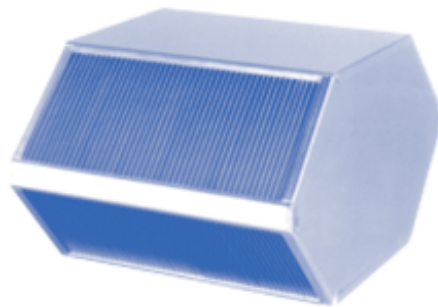
Kavygin A.A.<sup>1</sup>, Kolodyazhnyy S.A.<sup>1</sup>, Kutsygina O.A.<sup>1</sup>

*Federal State Budget-Financed Establishment of Supreme Professional Education Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering (84, 20-letija Oktjabrja street, Voronezh, 394006), e-mail: olga.kutsigina@rambler.ru*

Considered the approach to energy efficiency improving of ventilation systems using high-efficiency plate type recuperative heat recovery as a result of their work in cyclic mode when operating in conditions of frosting. Advantages of the proposed method of ventilation installation's using are due to the high efficiency recovery, the lack of supply and exhaust air flows mixing, and also the need for additional fresh air heating in the mode of frosting. However, the proposed approach to the waste energy using in ventilation leads to additional costs of energy and financial resources, which calls economic justification for the current system settings. And over time cost values changing predetermines the importance of identifying the areas of the economic feasibility of exploitation plate heat recovery in cyclic mode as an effective energy-saving activity. See adapted technique of economic efficiency substantiation with regard to the cyclic operating mode of plate heat exchangers and HRB area economic feasibility of its application. Is submitted the calculation example, confirming the economic efficiency of the proposed method of the plate heat recovery operation in cyclic mode, despite the additional costs. Defined the area of economic feasibility of the proposed method in relation to the cost of acquisition and installation of the heat exchanger in ventilation systems.

Keywords: recuperative heat exchanger plate, energy and economic efficiency, cyclic mode, frosting conditions, operation, scope of the economic feasibility

Вторичное использование топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) представляет собой источник энергии, образующийся в результате жизнедеятельности людей и производственных процессов. Вторичные энергоресурсы (ВЭР) систем вентиляции содержатся в вытяжном воздухе, а их использование для подогрева приточного воздуха в зимний период обеспечивается применением теплоутилизационных установок. Наиболее перспективным методом экономии ТЭР вследствие использования ВЭР в системах вентиляции признается использование пластинчатых рекуперативных теплоутилизаторов (ПРТ) [1,4,9 и др.]. Преимущество современных конструкций ПРТ определяется высокой температурной эффективностью, достигающей 90 %, что подтверждено приведенными в [6] исследованиями. Такой результат обеспечивается применением перекрестно-противоточной схемы движения потоков вытяжного и приточного воздуха, а также большой площадью теплообмена. Внешний облик современной конструкции ПРТ приведен на рис. 1.



*Рис.1. Перекрестно-противоточный ПРТ*

Важной физико-технической проблемой, возникающей при эксплуатации противоточных ПРТ, является выпадение конденсата из потока вытяжного воздуха и, как следствие, образование наледи в каналах рекуператора (обмерзание). В результате создается дополнительное аэродинамическое сопротивление прохождению воздуха, что снижает как энергетическую, так и экономическую эффективность использования ПРТ [5].

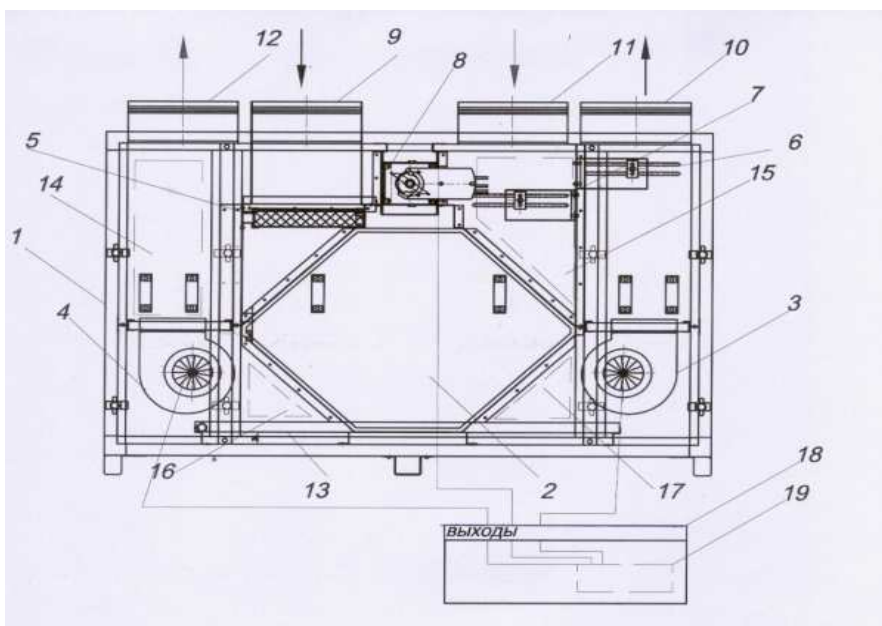
Для предотвращения обмерзания каналов рекуператора нами предлагается способ его эксплуатации в циклическом режиме в составе приточно-вытяжной установки [3]. Соответствующая схема приточно-вытяжной системы вентиляции, приведена на рис. 2.

Особенность функционирования приточно-вытяжной установки с ПРТ в условиях обмерзания состоит в чередовании двух циклов работы установки (1):

-первый цикл– режим теплоутилизации, при котором приточный воздух через патрубок (9) поступает в установку, проходит фильтрацию в фильтре (5), после чего проходит через рекуператор (2) в зону (17) и выходит через отверстие (10). Движение приточного воздуха обеспечивает вентилятор (3), а дополнительный нагрев - нагревательный элемент (6). Вытяжной воздух поступает в установку через отверстие (11), после чего проходит через

рекуператор (2) в зону (16) и выходит через отверстие (12). Движение вытяжного воздуха обеспечивает вентилятор (4). В режиме тепло утилизации байпасный клапан (8) закрыт и дополнительный нагревательный элемент (7) выключен;

-второй цикл–режим оттаивания рекуператора, при котором движение приточного воздуха останавливается отключением вентилятора (3). При этом байпасный клапан (8) открывается и вытяжной воздух из зоны (14) попадает в зону (15), что обеспечивает циркуляцию вытяжного воздуха через рекуператор по замкнутому контуру. Движение вытяжного воздуха обеспечивает вентилятор (4), а дополнительный нагрев воздуха - нагревательный элемент (7). Образовавшаяся в результате оттаивания влага удаляется через поддон (13). Таким образом, в цикле оттаивания работа приточно-вытяжной установки относительно вентиляционной системы временно приостанавливается, а оттаивание рекуператора обеспечивается путем циркуляции вытяжного воздуха по замкнутому контуру с подогревом. Управление работой установки обеспечивает контроллер (19), размещенный в шкафу автоматического управления (18).



*Рис.2. Схема функционирования приточно-вытяжной установки с ПРТ (1-установка;2-рекуператор;3-вентилятор;4-вентилятор;5-фильтр;6-нагревательный элемент; 7-дополнительный нагревательный элемент; 8-байпасный клапан; 9-патрубок; 10,11,12-отверстия;13-поддон;14,15,16,17-зоны прохода воздуха; 18-шкаф автоматического управления; 19-контроллер)*

Преимущество предлагаемого способа использования ПРТ в системе вентиляции с чередованием двух циклов работы в режиме обмерзания, по сравнению с предлагаемыми методами, например, в [2], состоит в невозможности смешивания потоков приточного и вытяжного воздуха.

При использовании рекуператора достигается существенная экономия ТЭР. Однако, следует учесть, что установка ПРТ в системах вентиляции влечет дополнительные единовременные инвестиции при монтаже, включая дублирующую установку (при необходимости), и годовые текущие затраты при последующей эксплуатации, включая стоимость ТЭР для работы нагревательного элемента в режиме оттаивания и обслуживания. Экономическая эффективность применения ПРТ будет обеспечиваться только в том случае, если стоимость замещаемых вторичными энергетическими ресурсами ТЭР будет больше, чем суммарные затраты на установку и эксплуатацию в течение срока службы системы [7]. Соблюдается условие

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=-m}^m \Delta\theta_{it} \cdot \mu_{it} \cdot \sigma_t > \sum_{t=-m}^m \sum_{h=1}^H Z_{th} \cdot \delta_t + \sum_{t=-m}^m \sum_{g=1}^G K_{tg} \cdot \delta_t, \quad (1)$$

где  $\Delta\theta_{it}$  – количество ТЭР, сэкономленных в результате внедрения энергосберегающих мероприятий вида  $i$  в  $t$ -м году строительства или эксплуатации (в рассматриваемом случае равно годовому количеству утилизированной теплоты в рекуператоре, кВт);  $\mu$  – тариф (цена) за единицу сэкономленного ТЭР вида  $i$  в году  $t$ ;  $Z_{th}$  – годовые эксплуатационные затраты вида  $h$ , необходимые для осуществления энергосберегающего мероприятия, р.;  $K_{tg}$  – единовременные инвестиции, приведенные по фактору времени к началу эксплуатации (периоду  $t=0$ ), осуществляемые до периода эксплуатации при  $t=-m$  и после эксплуатации при  $t=m$ , р.;  $g$  – направление использования капитальных вложений в периоде;  $\delta_t$  – коэффициент дисконтирования, или приведения разновременных затрат, результатов и эффектов к базисному периоду, определяемый по формуле (2) в зависимости от нормы дисконта ( $e$ ), принимаемой равной норме дохода на капитал или банковской ставке по депозиту, и срока службы оборудования

$$\delta_t = 1/(1 + e)^t, \quad (2)$$

Годовое количество утилизированной теплоты в рекуператоре ( $\Delta\theta_{it}$ ) определяется по формуле

$$\Delta\theta_{it} = \sum_{p=1}^{12} \theta_{wp} = \sum_{p=1}^{12} \theta_w \cdot p \cdot z, \quad (3)$$

где  $\theta_{wp}$  количество утилизированной теплоты за время работы в режиме обмерзания за месяц года;  $\theta_w$  – количество утилизированной теплоты за один цикл работы в режиме обмерзания, определяется по формуле (5);  $p$  – количество дней в месяце;  $z$  – количество циклов работы системы в сутки, определяемое по формуле (4)

$$z = 24 \cdot 60 / (\tau_w + \tau_d), \quad (4)$$

где 24 и 60-24 и 60-соответственно число часов в сутках и минут в часах.

Для определения расчетного количества теплоты, утилизируемой при работе рекуператора в режиме обмерзания за один цикл, исходя из результатов исследований, приведенных в [5,6], получена зависимость (5)

$$\theta_w = c \cdot G_s \cdot (t_e - t_s) \cdot (\eta_s \cdot \tau_w - 0,000012 \cdot \beta \cdot \tau_w^2), \quad (5)$$

где  $c$ -теплоемкость воздуха;  $G_s$ -расход воздуха;  $t_e$ - температура вытяжного воздуха на входе в рекуператор, °С;  $t_s$ - температура приточного воздуха на входе в рекуператор, °С;  $\eta_s$ - температурная эффективность рекуператора во время работы, до начала процесса обмерзания, определяется по методике, приведенной в [6];  $\tau_w$ - время работы рекуператора в режиме обмерзания, с;  $\beta$ - безразмерный коэффициент скорости обмерзания, зависящий от параметров холодного и теплого воздуха.

Годовые расходы на эксплуатацию ПРТ включают стоимость теплоты, расходуемой электронагревательным элементом при работе установки в режиме оттаивания, а также обслуживания рекуператора, принимаемой в размере 5 % от его стоимости ( $K_{tg}$ ).

Для учета погрешностей, связанных с отклонениями фактических показателей температуры наружного воздуха от значений, принятых в расчетах, стоимость теплоты увеличиваем на 10%, применяя поправочный коэффициент 1,1.

$$Z_{th} = \theta_{dp}^{год} \cdot \mu_{it} \cdot 1,1 + 0,05 \cdot K_{tg}, \quad (6)$$

Годовое количество теплоты, дополнительно расходуемое при работе приточно-вытяжной установки в режиме оттаивания ( $\theta_{dp}^{год}$ ), определяется по формуле (7)

$$\theta_{dp}^{год} = \sum_{p=1}^{12} \theta_{dp} = \sum_{p=1}^{12} \theta_d \cdot p \cdot z \quad (7)$$

где  $\theta_{dp}$ -количество теплоты, дополнительно расходуемое при работе приточно-вытяжной установки в режиме оттаивания в течение месяца;  $\theta_d$ - количество теплоты, дополнительно расходуемое при работе приточно-вытяжной установки в режиме оттаивания за один цикл, определяется по формуле (8)

$$\theta_d = 7,97 \cdot (\beta \cdot t_d)^{0,6} \cdot N, \quad (8)$$

где  $t_d$  – время одного цикла работы рекуператора в режиме оттаивания, с;  $N$ - мощность электронагревательного элемента, Вт.

Из формулы (5) очевидна зависимость количества утилизированной теплоты вентиляционного воздуха от его наружной температуры. Поэтому особенно важно определить ее расчетное значение. Использование показателя средней температуры за

отопительный период в соответствии с данными [8] для расчета эффективности утилизации с учетом процесса обмерзания нецелесообразно, так как интенсивный процесс обмерзания происходит при более низких температурах. Так, для г. Рязань средняя температура отопительного периода согласно [8] составляет лишь  $-3,5^{\circ}\text{C}$ , что не приемлемо для расчетов эффективности рекуператора, поскольку обмерзание происходит при более низкой температуре наружного воздуха. Поэтому целесообразно использовать в расчетах среднюю температуру наружного воздуха для каждого месяца.

В табл.1 приведены расчетные показатели количества утилизированной теплоты и теплоты, затраченной на оттаивание в режиме обмерзания при работе системы вентиляции с ПРТ в течение года, характеризуемой следующими параметрами:  $G_s=1000$  куб.м/час;  $t_s$  соответствует средней температуре соответствующего месяца года для г. Рязань;  $t_e = 22^{\circ}\text{C}$ .

Для рассматриваемого примера стоимость электроэнергии по одноставочному тарифу принята равной  $\mu_{it} = 5$ р./кВт·ч., стоимость утилизатора и его установки  $K_{tg}=89$  тыс. руб., а сумма коэффициентов дисконтирования при сроке службы утилизатора  $t=6$  лет и норме дисконта  $e=0,1=10\%$  составит  $\sum_{t=1}^6 \delta_t=4,35$ . Левая часть условия экономической эффективности (5) имеет значение

$$\sum_{i=1}^I \sum_{t=-m}^m \Delta\theta_{it} \cdot \mu_{it} \cdot \sigma_t = 37608 \cdot 5 \cdot 4,35 = 818963 \text{ руб.}, \quad (9)$$

а правая часть этого условия имеет значение

$$\begin{aligned} \sum_{t=-m}^m \sum_{h=1}^H 3_{th} \cdot \delta_t + \sum_{t=-m}^m \sum_{g=1}^G K_{tg} \cdot \delta_t &= (\theta_{dp}^{\text{год}} \cdot \mu_{it} \cdot 1,1 + 0,05 \cdot K_{tg}) \delta_t + K_{tg} = \\ &= (382 \cdot 5 \cdot 1,1 + 0,05 \cdot 89000) \cdot 4,35 + 89000 = 117497 \text{ руб.} \end{aligned} \quad (10)$$

**Таблица 1**

Расчетные показатели годовой экономии ТЭР и дополнительного расхода электроэнергии при эксплуатации приточно-вытяжной системы вентиляции с ПРТ в циклическом режиме

Месяцы года	Расчетные показатели								
	$t_s, ^{\circ}\text{C}$	$\eta_s, \%$	$\tau_w, \text{мин.}$	$\tau_d, \text{мин.}$	$\theta_w, \text{МДж}$	$\theta_d, \text{МДж}$	$n, \text{циклы в сут.}$	$\theta_{wp}, \text{МДж}$	$\theta_{dp}, \text{МДж}$
Январь	-9,2	90,9	124	16,1	66,4	1,94	10,3	21157	618
Февраль	-7,10	90,4	157	13,6	78,9	1,64	8,4	18647	387,6
Март	-3,07	89,5	330	7,5	146,5	0,9	4,3	19377	119
Апрель	7,50	83,2	400	0	96,5	0	3,6	10422	0
Май	16,67	81,24	400	0	34,6	0	3,6	3861	0
Июнь	17,83	76,01	400	0	25,4	0	3,6	2743	0
Июль	19,80	54,5	400	0	9,6	0	3,6	1071	0
Август	18,57	70,8	400	0	19,4	0	3,6	2165	0
Сентябрь	12,00	82,9	400	0	66,3	0	3,6	7160	0
Октябрь	5,57	84,3	400	0	110,8	0	3,6	12365	0
Ноябрь	0,77	87,9	400	0	149,3	0	3,6	16124	0

Декабрь	-5,07	90	222	10,5	105,7	1,3	6,2	20294	249,6
Итого за год, МДж								$\Delta\theta_{it} = 135389$	$\theta_{dp}^{год} = 1374$
Итого за год, кВт·час								$\Delta\theta_{it} = 37608$	$\theta_{dp}^{год} = 382$

Поскольку условие (5) соблюдается ( $818963 > 117497$ ), следует вывод об экономической целесообразности предложенного метода эксплуатации ПРТ в циклическом режиме в условиях обмерзания для показателей примера. Экономический эффект от его применения в течение срока использования составит 700 тыс. р. Следует учесть, что при изменении параметров результаты расчетов могут измениться на противоположные. А принимая во внимание, что стоимостные характеристики изменяются с течением времени, целесообразно определить область экономической целесообразности применения метода эксплуатации ПРТ в циклическом режиме (рис.3). Так, относительно стоимости приобретения и установки ПРТ в системах вентиляции ее величина ограничивается значением 664,34 тыс. руб., что значительно превышает расчетный показатель 89 тыс. руб. и определяет значительный запас прочности.

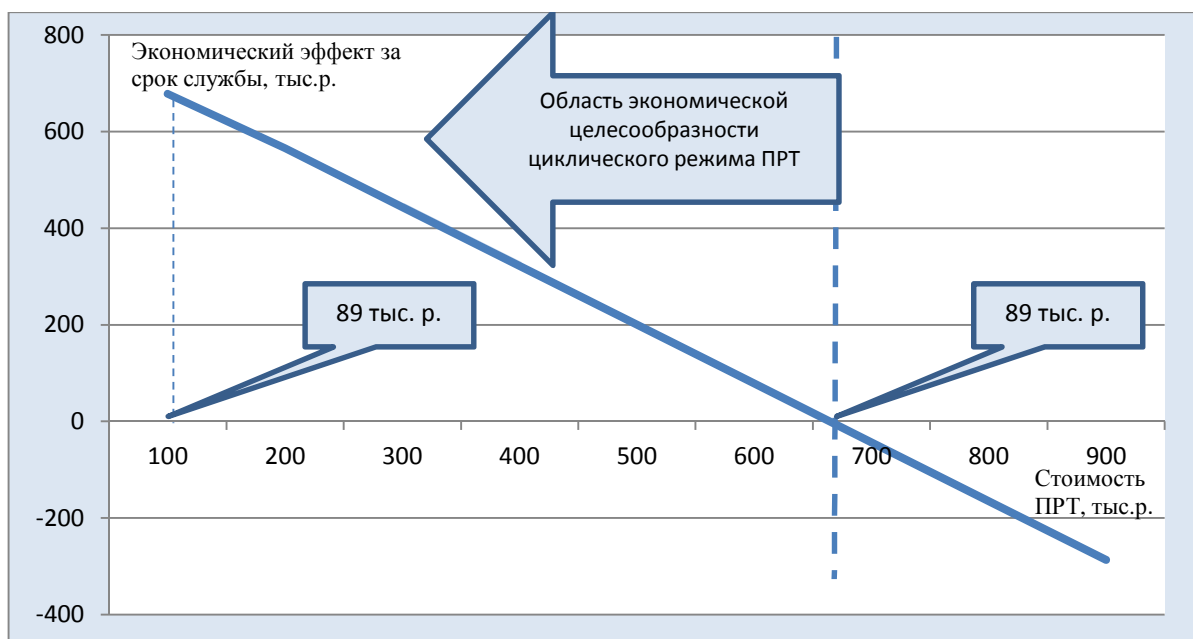


Рис.3. Область экономической целесообразности применения циклического режима работы ПРТ в зависимости от его стоимости

#### Выводы:

1. В целях совершенствования управления энергоэффективностью систем вентиляции предложен метод использования пластинчатых рекуперативных теплообменников в циклическом режиме при эксплуатации в условиях обмерзания.

Предложенный метод эксплуатации установки является перспективным, поскольку обладает следующими преимуществами: отсутствие смешения потоков приточного и вытяжного воздуха, а также необходимости дополнительного нагрева приточного воздуха в режиме обмерзания; высокая эффективность рекуперации 80-90%.

2. Предложенный подход к использованию вторичных энергоресурсов в системах вентиляции посредством применения ПРТ, эксплуатируемых в циклическом режиме, влечет дополнительные расходы энергетических и финансовых ресурсов, что требует экономического обоснования для текущих параметров системы. А изменение стоимостных показателей с течением времени предопределяет важность выявления области экономической целесообразности эксплуатации ПРТ в циклическом режиме как эффективного энергосберегающего мероприятия.

3. Приведенный пример подтверждает экономическую эффективность, эксплуатации ПРТ в циклическом режиме при работе в условиях обмерзания, несмотря на дополнительные затраты. Область экономической целесообразности применения предлагаемого метода показывает значительный запас прочности относительно стоимости приобретения и установки ПРТ в системах вентиляции, поскольку расчетная стоимость, составляющая 89 тыс. р., значительно меньше критического значения 664,34 тыс. р.

### Список литературы

1. Богословский В.Н., Поз. М.Я. Теплофизика аппаратов утилизации тепла систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха.-М.: Стройиздат, 1983-319 с.
2. Данилевский Л.Н., Таурогинский Б.И. Устройство и способ предотвращения замерзания сконденсированной влаги в рекуперационном теплообменнике//Патент № 016248 Евраз. Пат. Ведомства, МПК F28F 17/00. Бюллетень евразийского патентного ведомства. №3.2012.С.337.
3. Кавыгин А.А., Колодяжный С.А. Приточно-вытяжная установка с пластинчатым рекуперативным теплоутилизатором//Патент РФ №134619.2913. 2013. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/253/2538516.html> (дата обращения 27.07.2015)
4. Карпис Е.Е. Энергосбережение в системах кондиционирования воздуха.-М.: Стройиздат, 1986.-267 с.
5. Колодяжный С.А., Кавыгин А.А., Камбург В.Г. Экспериментальные исследования пластинчатого перекрестно-противоточного теплоутилизатора в условиях обмерзания//Научный вестник Воронеж. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура.– 2014 -№1 (33). – С. 20-28.



6. Колодяжный С.А., Кавыгин А.А. Расчет современных пластинчатых рекуператоров с использованием функции коэффициента полезного действия // Научный вестник ВолгГАСУ. Строительство и архитектура.-2014 –Вып.36(55).-С. 182-188.

7. Куцыгина О.А. Энергоменеджмент зданий: учебное пособие.-Воронеж.: Воронеж.гос.арх.-строит.университет, 2004-132 с.

8. СНиП 23-01-99\* Строительная климатология//Госстрой России. Москва.-2003. URL: [http://gostrf.com/norma\\_data/7/7001/](http://gostrf.com/norma_data/7/7001/) (дата обращения 27.07.2015)

9. Шаталов М.П. Обоснование параметров теплоутилизационной установки на базе полимерного перекрестноточного пластинчатого теплообменника для животноводческих помещений: дис...канд. техн. наук.-М.,2010.-165 с.

**Рецензенты:**

Сотникова О.А., д.т.н., профессор кафедры «Теплогазоснабжение и нефтегазовое дело» ВГАСУ, г. Воронеж;

Шibaева М.А., д.э.н., доцент, профессор кафедры «Экономики и основ предпринимательства» ВГАСУ, г. Воронеж.