

**ИГНАТКИН ИВАН ЮРЬЕВИЧ**, канд. техн. наук, доцент

E-mail: ignatkinivan@gmail.com

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана; 105005,  
ул. 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1, Москва, Российская Федерация

## ОПТИМИЗАЦИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ТЕПЛОТЫ ВОЗДУХО-ВОЗДУШНОГО РЕКУПЕРАТОРА

Рассматривается пример оптимизации параметров рекуперативного теплообменника с учетом текущих экономических условий и особенностей объекта. Задача оптимизации рассмотрена на примере секции откорма свиноводческой фермы с замкнутым циклом производства ООО «Фирма «Мортадель». Помещение предназначено для выращивания 280 голов свиней на откорме массой от 30 до 110 кг. Секция откорма оборудована тремя рекуператорами: два аппарата УТ-6000С и один УТ-3000. Суммарная производительность рекуператоров составляет приблизительно 15000 м<sup>3</sup>/ч. Проведены теплотехнические и аэродинамические расчеты рекуператора с целью определения влияния площади теплообменной поверхности на коэффициент эффективности утилизации теплоты и аэродинамическое сопротивление аппарата. Расчетное гидравлическое сопротивление составило 127,4 Па (длина теплообменника 1,71 м). На основании расчетов определены потребности в тепловой энергии для рассматриваемой секции откорма и зависимость срока окупаемости и прибыли от длины теплообменника (определяющей площадь, размер). Рассчитано, что срок окупаемости рекуператоров тепла уменьшается до значения коэффициента эффективности утилизации теплоты 24,18%, а после этого значения скачкообразно увеличивается до 28,25% и далее незначительно изменяется. Это объясняется зависимостью гидравлического сопротивления от длины теплообменника. С увеличением длины рекуператора повышается его стоимость, а производительность – снижается. По критерию окупаемости целесообразно применять рекуператоры с небольшим коэффициентом утилизации теплоты и длиной около 1 м. С целью же получения максимальной прибыли подтверждена целесообразность применения рекуператоров с большей длиной теплообменника.

**Ключевые слова:** вентиляция, микроклимат, отопление, рекуперация теплоты, свиноводство, система микроклимата, теплообмен, теплоперенос, утилизация теплоты, энергосбережение.

**Введение.** Свиноводство является крупным потребителем топливно-энергетических ресурсов. Из них свыше 65% используется в системах отопления производственных объектов. Теплота используется в технологических процессах обеспечения микроклимата, горячего водоснабжения, тепловой обработки кормов, сушки, хранения и переработки различных видов сельскохозяйственной продукции и ряде других технологических процессов [1, 2].

Отечественное производство вентиляционного оборудования для сельского хозяйства во многом разрушено, технически отстало, поэтому в значительной мере поставляется и используется дорогостоящее зарубежное оборудование. Это связано с рядом политических и экономических факторов, которые привели к стагнации в этой сфере.

Имеется прямая связь производства продукции с энергозатратами, доля которых в её себестоимости составляет 7...30%, что связано с видом энергоносителя, климатической зоной, качеством теплоизоляции зданий, а также с опережающим ростом тарифов на электроэнергию и топливо в сравнении с ценами на свинину. Ощущается острая потребность в новых технологиях, сокращающих затраты тепловой и электрической энергии. Поэтому важным фактором, определяющим вектор развития энергетических систем,

является снижение себестоимости продукции за счет применения энергосберегающих технологий [3].

Одним из направлений снижения энергетических затрат в процессе обеспечения микроклимата является утилизация теплоты вытяжного воздуха. Известны различные способы реализации этой задачи, наиболее эффективным для свиноводства является применение воздухо-воздушных рекуперативных теплообменников. В таких системах теплый вытяжной воздух подогревает свежий приточный, теплообмен осуществляется через разделяющую стенку, что исключает смешивание потоков. Энергетическая эффективность применения этой системы определяется коэффициентом эффективности утилизации теплоты [4-6].

При этом известно, что эффективность утилизации теплоты зависит от множества факторов: температурного напора, площади теплообменной поверхности, схемы организации воздушных потоков, режима течения флюидов, теплопроводности материала теплообменника и многих других. Некоторые из них определяются погодными условиями и требованиями для содержания животных, и повлиять на них практически невозможно, изменение других влечет за собой шлейф негативных последствий, третьи малозначительны. Изменение этих факторов – всегда компромисс и связано с решением технических противоречий [7].

В свою очередь, свиноводу важна не столько техническая характеристика оборудования, сколько прибыль, которая зависит от экономии, капитальных и эксплуатационных затрат.

В сложившейся экономической и политической ситуации нестабильное положение рубля приводит к значительным колебаниям цен на комплектующие с импортными компонентами. Следовательно, наиболее значимым и удобным для варьирования фактором является площадь теплообменной поверхности за счет ее сильного влияния на эффективность и стоимость аппарата.

**Цель исследования** – оптимизация срока окупаемости воздухо-воздушного рекуперативного теплообменника с учетом текущих экономических условий и особенностей объекта.

**Материал и методы.** Объектом исследования явилось устройство для утилизации теплоты – рекуператор; предмет исследования – зависимость экономической эффективности рекуператора от длины теплообменника. В качестве методов исследований использован эксперимент и теорети-

ческие изыскания с применением эмпирических данных.

Экспериментальные исследования проводились поверенными термоанемометрами с функцией влагомера TESTO 425 в соответствии с «СТО АИСТ 31.2-2007 Испытания сельхозтехники. Комплекты оборудования для создания микроклимата в животноводческих и птицеводческих помещениях. Методы оценки функциональных показателей».

**Результаты и обсуждение.** Рассмотрим решение поставленной задачи на примере секции откорма свиноводческой фермы с замкнутым циклом производства ООО «Фирма «Мортадель». Помещение предназначено для выращивания 280 голов свиней на откорме массой от 30 до 110 кг (рис. 1).

Секция откорма оборудована тремя рекуператорами. Два аппарата УТ-6000С обеспечивают общеобменную вентиляцию, и один рекуператор УТ-3000 осуществляет вытяжку воздуха из подпольного пространства, снижая поступление вредных веществ из навозного канала ( $H_2S$ ,  $NH_3$ ,  $CO_2$ ,  $H_2O$ ) в помещение для содержания животных [8].

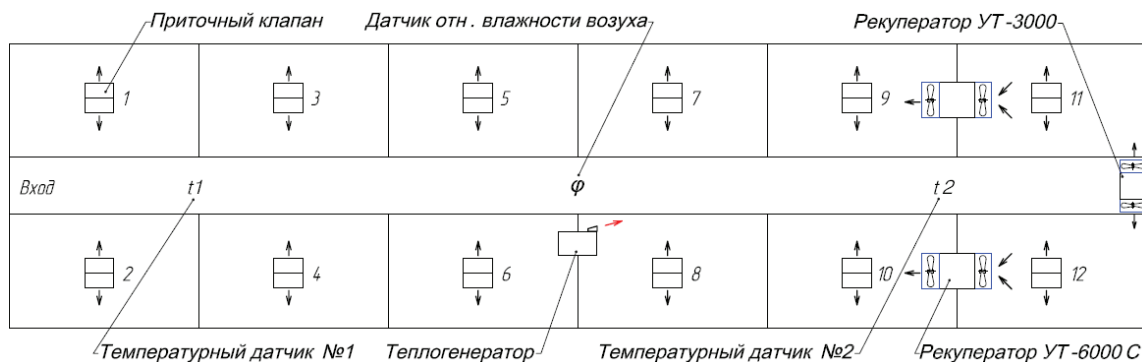


Рис. 1. Схема размещения контрольных точек в опытной секции откорма с рекуперацией теплоты

Суммарная производительность рекуператоров составляет приблизительно  $15000 \text{ м}^3/\text{ч}$  и обеспечивает необходимый воздухообмен вплоть до переходного периода из расчета  $0,5 \text{ м}^3/\text{кг}$  живой массы. В зимний период при температуре ниже  $-15^\circ\text{C}$  рекуператоры УТ-6000С работают поочередно, чередуя режим рекуперации и оттаивания, что снижает их производительность в два раза [9].

Для нахождения оптимальной площади теплообменной поверхности необходимо провести теплотехнические и аэродинамические расчеты рекуператора с целью определения влияния площади теплообменной поверхности на коэффициент эффективности утилизации теплоты и аэродинамическое сопротивление (производительность) аппарата.

Площадь поверхности теплообмена в рамках имеющегося конструктива наиболее удобно варьировать, изменяя длину теплообменника, так как размеры поперечного сечения связаны с характеристиками вентиляторов и поддона [10].

Увеличение длины рекуператора  $L_i$  (рис. 2) предполагает пропорциональное увеличение гидрав-

лического сопротивления, что необходимо учитывать в расчете.

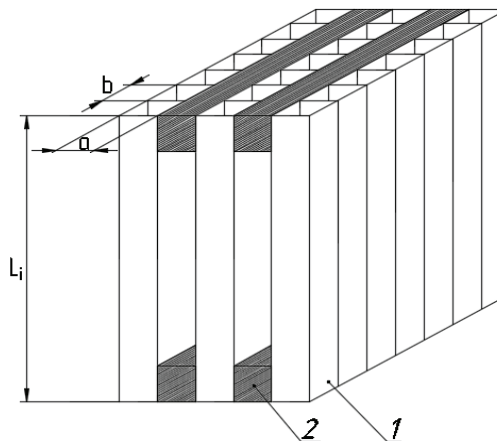


Рис. 2. Фрагмент теплообменника:  
1 – лист сотового поликарбоната;  
2 – дистанционная вставка

Согласно упрощенной теоретической модели зависимость коэффициента утилизации теплоты от длины рекуператора носит линейный харак-

тер, что отражено на рисунке 3. Расчет произведен для теплообменников длиной в диапазоне от 0,1 до 2,5 м, с шагом 0,1 м.

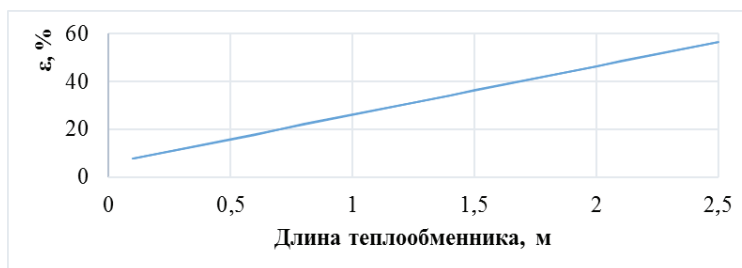


Рис. 3. Зависимость коэффициента эффективности утилизации теплоты от длины теплообменника

Для оценки влияния изменения гидравлического сопротивления примем следующее допущение: система стабилизируется на сопротивлении, соответствующем стандартному рекуператору (УТ-6000С), – 127,4 Па (длина теплообменника 1,71 м).

Изменение длины теплообменника сказывается только на расходе воздуха. Исходя из описанного условия, расходная характеристика аппарата в зависимости от его длины примет вид, изображенный на рисунке 4.

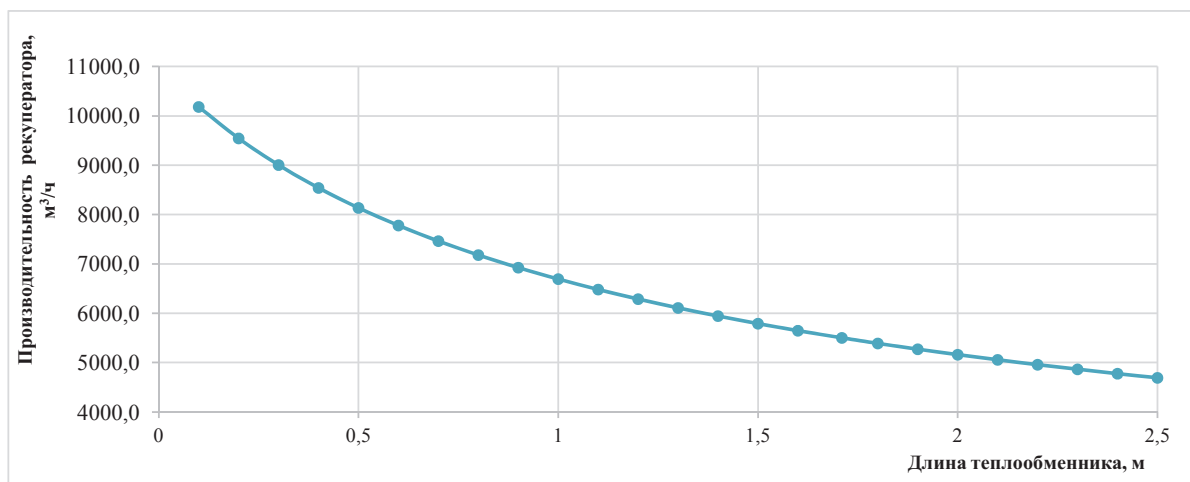


Рис. 4. Зависимость производительности рекуператора от длины теплообменника

На основании полученных данных проведем расчеты потребности в тепловой энергии для рассматриваемой секции откорма, оборудованной рекуператорами, варьируя длиной теплообменника, а следовательно, производительностью и эффективностью утилизации теплоты (рис. 5).

Критериями оптимальности примем минимальный срок окупаемости и максимальную прибыль.

Срок окупаемости рекуператоров определим по формуле

$$T = Z_{\text{кап}} / \Delta_{\text{год}}$$

где  $T$  – срок окупаемости, лет;  $Z_{\text{кап}}$  – капитальные затраты на приобретение рекуператоров, руб.;  $\Delta_{\text{год}}$  – годовая экономия на дополнительное отопление, руб.

$$Z_{\text{кап}} = Z_{\text{м}} + Z_{\text{тр}} + Z_{\text{пр}} + Z_{\text{д}} + Z_{\text{уп}} + Z_{\text{вн}} + Z_{\text{зар}} + N,$$

где  $Z_{\text{м}}$  – затраты на материал, руб.;  $Z_{\text{тр}}$  – транспортные затраты, руб.;  $Z_{\text{пр}}$  – производственные затраты, руб.;  $Z_{\text{д}}$  – дополнительные затраты, руб.;  $Z_{\text{уп}}$  – затраты на упаковку, руб.;  $Z_{\text{вн}}$  – внепроизводственные затраты, руб.;  $Z_{\text{зар}}$  – зарплата, руб.;  $N$  – налоги, руб.

Годовую экономию можно определить по формуле

$$\Delta_{\text{год}} = 3600 \cdot C_{\text{газ}} \cdot (Q_{\text{без рек.}} + Q_{\text{рек.}}) / q_{\text{газа}}$$

где  $Q_{\text{без рек.}}$  – энергопотребление за год без рекуперации, кВт·ч;  $Q_{\text{рек.}}$  – энергопотребление за год с рекуперацией, кВт·ч;  $C_{\text{газ}}$  – тариф на 1 м³ природного газа, руб.;  $q_{\text{газа}}$  – теплотворная способность природного газа, кДж/м³.

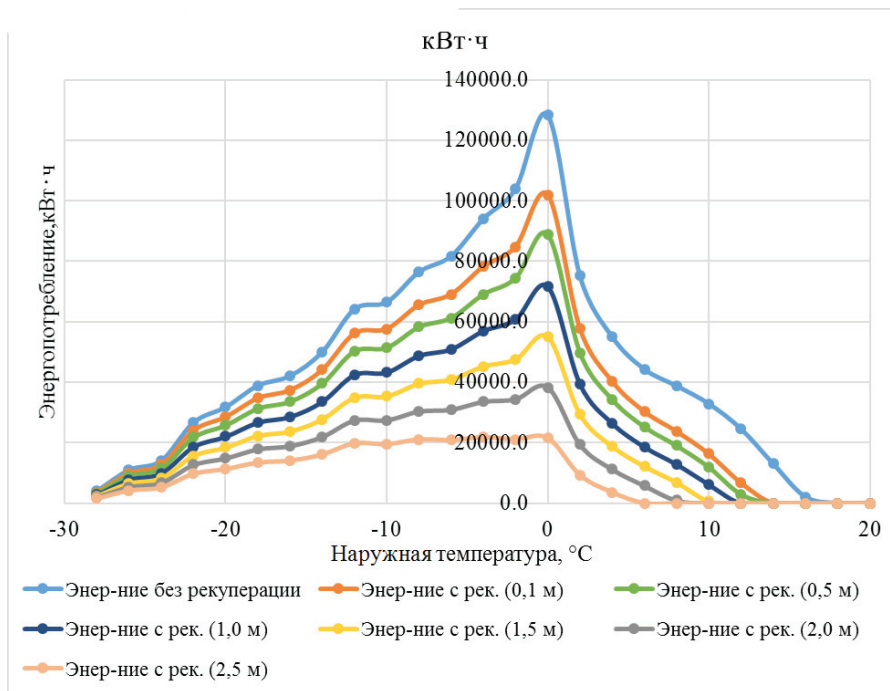


Рис. 5. Энергопотребление для секции откорма

Построим график срока окупаемости в зависимости от коэффициента эффективности утилизации теплоты (рис. 6). В расчете учтено изменение производительности рекуператоров в зависимости от длины теплообменника. Из графика следует, что срок окупаемости рекуператоров уменьшается до значения 24,18%. Это связано с монотонным увеличени-

ем экономии энергии и небольшими капитальными затратами, так как для обеспечения необходимого воздухообмена требуется всего 2. По мере увеличения длины рекуператора гидравлическое сопротивление растет и на отметке 28,25% наблюдается скачок, так как для обеспечения необходимого воздухообмена требуется на 1 рекуператор больше.

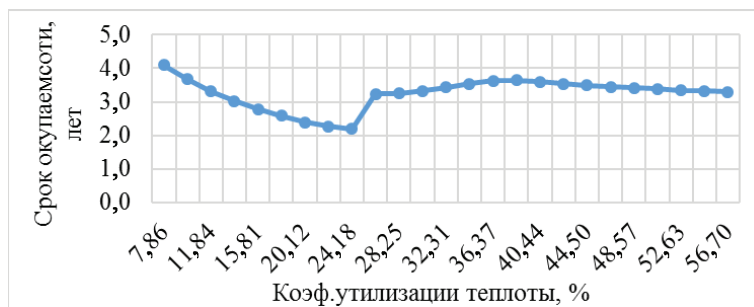


Рис. 6. Зависимость срока окупаемости системы от коэффициента эффективности утилизации теплоты

По критерию окупаемости можно сделать вывод, что целесообразно применять рекуператоры с небольшим коэффициентом утилизации теплоты и длиной около 1 м.

Прибыль за 10 лет от применения рекуператоров определим по формуле

$$П = (\text{Э}_{\text{год}} \cdot n - \text{З}_{\text{кап}}) / 1000,$$

где  $n$  – количество лет, 1000 – переводной коэффициент из руб. в тыс. руб.

По полученным данным построим график прибыли в зависимости от коэффициента утилизации теплоты (рис. 7).

Максимальную прибыль за 10 лет можно получить от рекуператоров с большим коэффициентом утилизации теплоты, т.е. с большей длиной теплообменника. Следовательно, можно сделать вывод, что с целью достижения максимальной прибыли целесообразно применять рекуператоры с большей длиной теплообменника.

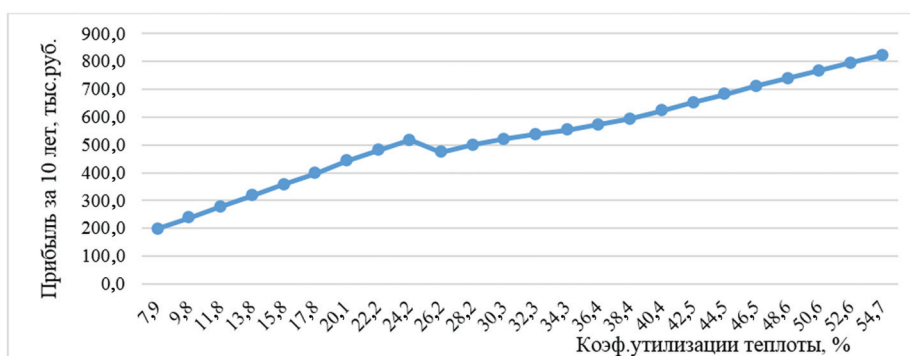


Рис. 7. Зависимость экономии от коэффициента утилизации теплоты

### Выводы

1. С увеличением площади теплообменной поверхности увеличивается эффективность утилизации теплоты.

2. В рассматриваемых условиях срок окупаемости рекуператоров тепла уменьшается до значения коэффициента эффективности утилизации теплоты 24,18%, а после этого значение скачкообразно увеличивается и далее незначительно изменяется. Это связано с тем, что гидравлическое сопротивление пропорционально длине теплообменника, с ростом длины рекуператора повышается его стоимость, а производительность – снижается.

3. Максимальную прибыль за период эксплуатации дают рекуператоры с большей длиной теплообменника.

### Библиографический список

1. Тихомиров Д.А. Энергосберегающие электрические системы и технические средства теплообеспечения основных технологических процессов в животноводстве: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2015.  
 2. Механизация и технология животноводства / В.В. Кирсанов, Д.Н. Мурусидзе, В.Ф. Некрашевич, В.В. Шевцов, Р.Ф. Филонов: Учебник. М., 2013. 585 с.  
 3. Гулевский В.А., Шацкий В.П., Спирина Н.Г. Применение теплообменников (рекуператоров) для нормализации микроклимата животноводческих

помещений // Известия ВУЗов. Строительство. № 9. Новосибирск, 2013. С. 64-68.

4. Гулевский В.А., Шацкий В.П. Моделирование теплообмена в пластинчатых теплообменниках // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2012. № 2. С. 140-144.

5. Игнаткин И.Ю., Казанцев С.П. Рекуператор теплоты для свиноводческого комплекса // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2013. № 4. С. 17-18.

6. Кононенко А.С., Киселев Р.В. Восстановление радиаторов // Сельский механизатор. 2004. № 6. С. 22-23.

7. Ильин И.В., Игнаткин И.Ю., Курячий М.Г., Бондарев А.М. Рекуперация теплоты в свиноводстве // Эффективное животноводство. 2015. № 9 (118). С. 40-41.

8. Игнаткин И.Ю. Оценка эффективности рекуперации теплоты в свинарнике-откормочнике ООО «Фирма Мортадель» // Вестник ФГОУ ВПО «МГАУ имени В.П. Горячкина». 2016. № 1 (71). С. 14-20.

9. Игнаткин И.Ю., Бондарев А.М., Курячий М.Г., Пуган А.А., Архипцев А.В. Опыт внедрения системы рекуперации тепла вентиляционного воздуха в систему поддержания микроклимата в свинарнике ООО «Фирма «Мортадель» // Инновации в сельском хозяйстве. 2014. № 4 (9). С. 256-261.

10. Кирсанов В.В., Игнаткин И.Ю. Универсальная установка обеспечения микроклимата // Вестник НГИЭИ. 2016. № 8 (63). С. 110-116.

Статья поступила 08.09.2017

## OPTIMIZING UTILIZATION EFFICIENCY OF HEAT DEVELOPED BY AIR-TO-AIR RECUPERATOR

*IVAN Yu. IGNATKIN, PhD (Eng), Associate Professor*

E-mail: ignatkinivan@gmail.com

Bauman Moscow State Technical University; 105005, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya Str., 5, bld. 1, Moscow, Russian Federation

The paper provides an example of the optimization of parameters of a recuperative heat exchanger with account of current economic conditions and specific features of an object. The problem of optimization is exem-

plified by the fattening section of a pig-breeding farm with a closed production cycle of JSC "Firma "Mortadel". The premises are intended for keeping 280 pig heads for fattening in weight values ranging from 30 to 110 kg. The fattening section is equipped with three recuperators: two UT-6000S models and one UT-3000 model. The total capacity of the recuperators is approximately 15,000 m<sup>3</sup>/h. Thermo-technical and aerodynamic calculations of the recuperator parameters have been carried out in order to determine the effect of the heat exchange surface area on the efficiency factor of heat utilization and the aerodynamic resistance of the device. The calculated hydraulic resistance has amounted to 127.4 Pa (with a heat exchanger length of 1.71 m). Basing on the calculation results, the author determines requirements for thermal energy for the considered fattening section and the dependence of the payback period and profit on the heat exchanger length (that determines the area and the size). It has been calculated that the payback period of heat recuperators is reduced to the value of the heat recovery efficiency coefficient of 24.18%, and after reaching that value it grows rapidly to 28.25% and then slightly changes. This is explained by the dependence of the hydraulic resistance on the heat exchanger length. When the recuperator length increases, its cost increases too, while its productivity decreases. According to the recoupment criterion, it is advisable to use recuperators with a small coefficient of heat utilization and a length of about 1 m. In order to obtain maximum profit, it has been proved expedient to use recuperators with a longer length of the heat exchanger.

**Key words:** ventilation, microclimate, heating, heat recovery, hog breeding, microclimate system, heat exchange, heat transfer, heat utilization, energy saving.

### References

1. Tikhomirov D.A. Energosberegayushchiye elektricheskiye sistemy i tekhnicheskiye sredstva teploobespecheniya osnovnykh tekhnologicheskikh protsessov v zhivotnovodstve [Energy-saving electrical systems and technical means of heat supply of basic technological processes in livestock breeding]: PhD (Eng) thesis. Moscow, 2015. (in Rus.)
2. Kirsanov V.V., Murusidze D.N., Nekrashevich V.F., Shevtsov V.V., Filonov R.F. Mekhanizatsiya i tekhnologiya zhivotnovodstva [Mechanization and technology of animal husbandry]: Study manual. Moscow, 2013. 585 p. (in Rus.)
3. Gulevskiy V.A., Shatskiy V.P., Spirina N.G. Primeneniye teploobmennikov (rekuperatorov) dlya normalizatsii mikroklimata zhivotnovodcheskikh pomeshcheniy [Application of heat exchangers (recuperators) for the normalization of the microclimate of cattle-breeding premises]. *Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo*, No. 9. Novosibirsk, 2013. Pp. 64-68. (in Rus.)
4. Gulevskiy V.A., Shatskiy V.P. Modelirovaniye teploobmena v plastinchatykh teploobmennikakh [Modeling of heat exchange in plate-type heat exchangers]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*, 2012, No. 2. Pp. 140-144. (in Rus.)
5. Ignatkin I. Yu., Kazantsev S.P. Rekuperator teplooty dlya svinovodcheskogo kompleksa [Heat recuperator for pig-breeding facilities]. *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel'skogo khozyaystva*, 2013, No. 4. Pp. 17-18. (in Rus.)
6. Kononenko A.S., Kiselev R.V. Vosstanovleniye radiatorov [Restoration of radiators]. *Sel'skiy mekhanizator*, 2004, No. 6. Pp. 22-23. (in Rus.)
7. Il'in I.V., Ignatkin I. Yu., Kuryachiy M.G., Bondarev A.M. Rekuperatsiya teplooty v svinovodstve [Heat recovery in hog breeding]. *Effektivnoye zhivotnovodstvo*, 2015, No. 9 (118). Pp. 40-41. (in Rus.)
8. Ignatkin I.Yu. Otsenka effektivnosti rekuperatsii teplooty v svinarnike-otkormochnike OOO "Firma Mortadel" [Evaluation of heat recovery efficiency on the pig-breeding farm of JSC "Firma "Mortadel"']. *Vestnik of Moscow Goryachkin Agroengineering University*, 2016, No. 1 (71). Pp. 14-20. (in Rus.)
9. Ignatkin I. Yu., Bondarev A.M., Kuryachiy M.G., Putan A.A., Arkhiptsev A.V. Opyt vnedreniya sistemy rekuperatsii tepla ventilyatsionnogo vozdukha v sistemu podderzhaniya mikroklimata v svinarnike OOO "Firma "Mortadel" [Experience of introducing a system of heat recuperation of ventilating air in the microclimate control system in a pigsty of LLC "Firm" Mortadel"']. *Innovatsii v sel'skom khozyaystve*, 2014, No. 4 (9). Pp. 256-261. (in Rus.)
10. Kirsanov V.V., Ignatkin I.Yu. Universal'naya ustanovka obespecheniya mikroklimata [Universal installation of microclimate control]. *Vestnik NGIEI*, 2016, No. 8 (63). Pp. 110-116. (in Rus.)

*The paper was received on September 8, 2017*