3. **Ruslan Makhmutov**, master of department is electric machines and electrical equipment, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», 450001, Ufa, 50-letiya Oktyabrya St., 34, phone: +7 (347) 252-66-10, e-mail: Ruslanmaha@mail.ru.

4. **Rinat Yarullin**, Doctor of Technical Sciences, Professor of department is machines, devices, instruments and service technology Institute of Economics and Service Ufa State Petroleum Technical University, Ufa, Chernyshevsky st., 145, phone: +7 (347) 252-08-06, e-mail: Rin.yarullin@yandex.ru.

The article discusses the control system of a cylindrical linear electric drive of a grain cleaning machine, which allows to adjust the traction force of the electric motor when changing the mass of grain

material located on the surface of the sieve. The results of a theoretical study of a cylindrical linear electric drive are presented.

© Туктаров М.Ф., Байназаров В.Г., Махмутов Р.Ф. Яруллин, Р.Б.

УДК 621.362.1

DOI: 10.31563/1684-7628-2020-54-2-138-143

Ф.Ф. Хабилов, В.С. Вохмин

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ В ПРИТОЧНО-ВЫТЯЖНОЙ РЕКУПЕРАЦИОННОЙ УСТАНОВКЕ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ АПК

Ключевые слова: *система вентиляции; энергоэффективность; тепловые потери; пластинчатый рекуператор; термоэлектрический преобразователь.*

Введение. Актуальность проблемы энергосбережения в настоящее время становится все более масштабной и существенной. При проектировании и строительстве современных зданий и сооружений особое внимание уделяется не только их комфортности, но и функциональности. Не менее важно учитывать энергоэффективность оборудования и конструкции. Это связано с большим вниманием к проблемам сохранения окружающей среды, а также существенной финансовой экономией, которой можно добиться, оптимизируя расход энергоресурсов. Научно-технический прогресс современного производства также направлен на повышение энергетической эффективности общего производства, т. е. имеет энергосберегающую направленность [3, 4].

Всем известно, что часть энергоресурсов, направляемых поставщиками, расходуется на отопление, вентиляцию, кондиционирование воздуха и горячее водоснабжение административных зданий, производственных и сельскохозяйственных сооружений. Поэтому снижение расходов энергии в системах инженерного обеспечения зданий является актуальным вопросом.

Существуют различные способы и технологии снижения тепловых потерь в системах вентиляции воздуха. И, как показывает практика, к одним из наиболее эффективных способов можно отнести применение рекуператоров теп-

лоты. Данные устройства широко используются в приточно-вытяжных установках. Применяемые рекуператоры бывают разных типов, как-то: роторные, пластинчатые и камерные.

Главными недостатками таких устройств являются стоимость и неспециализированность под применение в сельском хозяйстве, так как большая часть выпускаемого оборудования производится и модернизируется для частных и промышленных потребителей [1].

Цель исследования. Определение целесообразности использования термоэлектрических модулей в конструкции пластинчатого рекуператора для возможности регулирования температуры воздушной смеси в помещении предприятий АПК.

Материалы и методы исследования. Использование применяемых энергосберегающих устройств повышает энергоэффективность вентиляционного оборудования в целом, но хотелось бы повысить их функциональность. Поэтому, исходя из анализа современных энергоэффективных систем и средств, был сделан акцент на интеграцию альтернативных источников энергии. В нашем случае к ним можно отнести термоэлектрический преобразователь, принцип работы которого основывается на разности подводимых к его поверхности температур. При подводе источника теплоты с одной стороны пластины и охлаждении с другой создается пе-

репад температур, образуется термо-ЭДС, или получается так называемый эффект Зеебека, т. е. в зависимости от разности температур на термоэлектрическом модуле мы получаем постоянное напряжение, которое при накоплении с помощью аккумуляторной батареи (АКБ) может быть использовано в определенных целях. Имеет место и обратный эффект. Если подать

постоянное напряжение на термоэлемент, он будет нагреваться с одной стороны и охлаждаться с другой; данное явление называется эффектом Пельтье [5]. Применяв описанные эффекты в пластинчатом рекуператоре, можно увеличить функциональность и КПД приточно-вытяжной системы. Внешний вид и устройство термоэлектрического модуля представлены на рисунке 1.

Рисунок 1
Внешний вид термоэлектрического модуля

Чтобы применить предлагаемое техническое решение на основе термоэлектрического эффекта, необходимо рассчитать конструктивные размеры пластинчатого рекуператора, найти температуру смешиваемого воздуха внутри рекуператора, чтобы по полученной температуре подобрать наиболее подходящий термоэлектрический модуль [1].

Произведём расчет и определим размеры пакета пластин (А, В, С) рекуператора (рисунок 2), предназначенного для системы вентиляции животноводческого помещения (коровника).

Исходные данные: расчетное число голов – 20; коэффициент регенерации тепла не менее $\rho = 0,5$; тип рекуператора – противоточный, поверхность теплообмена из алюминиевой фольги толщиной $\Delta = 0,2$ мм; шаг пластин $\delta = 5$ мм; кратность длины сторон $A / B = x = 2$.

Вычислим по формуле (1) скорость воздуха:

$$w = \left(0,8 \cdot \frac{0,00833}{0,005^2} \cdot \frac{5,3}{1300} \cdot \frac{1 - 0,5}{0,5} \cdot 2 \right)^{0,5} = 0,4 \text{ м/с.} \quad (1)$$

По формуле (2) найдем длину пластин:

$$A = \frac{1,3}{5,3} \cdot \frac{1,4}{2} \cdot \frac{0,5}{1 - 0,5} = 0,9 \text{ м.} \quad (2)$$

Ширину пластин найдем по формуле (3):

$$B = A / x = 0,9 / 2 = 0,45 \text{ м.} \quad (3)$$

Рисунок 2
Конструкция рекуператора

По формуле (5) количество пластин:

$$n = \frac{20 \cdot 1,3 \cdot 0,83}{0,9 \cdot 0,45 \cdot 5,3} \cdot \frac{1,3}{1 - 0,5} = 100,5 \text{ шт.} \quad (5)$$

Высота пакета пластин будет равна:

$$C = 0,005 \cdot 100,5 = 0,5 \text{ м.} \quad (6)$$

Размеры пакета пластин:

$$A \times B \times C = 0,9 \cdot 0,45 \cdot 0,5 \text{ м.} \quad (7)$$

Вычислим площадь поверхности пластин:

$$F_n = 100 \cdot 0,9 \cdot 0,45 = 40,5 \text{ м}^2. \quad (8)$$

Площадь поверхности теплообмена найдем по формуле (9):

$$F_T = \frac{1,3 \cdot 20 \cdot 8,33}{5,3} \cdot \frac{0,5}{1-0,5} = 40,8 \text{ м}^2. \quad (9)$$

Расчет сошелся: $F_T \approx F_{\Pi}$, $\delta F = 0,1 \%$.

По формуле (10) вычислим коэффициент регенерации:

$$\rho_p = \left(\frac{1,3 \cdot 8,33 \cdot 20}{5,3 \cdot 42,5} + 1 \right)^{-1} = 0,51. \quad (10)$$

Расчет сошелся: $\rho_p \approx \rho$, $\delta \rho = 2 \%$.

Тепловая мощность регенерации на единицу располагаемого температурного напора, Вт/°C:

$$\frac{Q}{\Delta t_p} = c_v \cdot m \cdot v \cdot \rho = 1,3 \cdot 8,33 \cdot 20 \cdot 0,51 = 110 \text{ Вт/}^\circ\text{C}. \quad (11)$$

Произведём поверочный расчет.

Целью поверочных расчетов является определение тепловой нагрузки аппарата и конечных температур теплоносителей при заданных их расходах и начальных температурах. В основе расчетов лежат те же уравнения тепловых балансов и теплопередачи [2].

Вычислим тепловую мощность рекуператора с размерами пластин $0,9 \times 0,45 \times 0,5$ м при расчетной скорости воздуха 1,43 м/с; с усиленной вентиляцией с удвоенной скоростью 2,86 м/с; при «спящем» режиме и сниженным в 4 раза расходом воздуха.

Номинальная тепловая мощность:

$$\frac{Q_1}{\Delta t_p} = \left(\frac{1}{5,3 \cdot 42,5} + \frac{1}{1,3 \cdot 20 \cdot 8,33} \right) = 110,5 \text{ Вт/}^\circ\text{C}. \quad (12)$$

Тепловая мощность при усиленной вентиляции:

$$\frac{Q_2}{\Delta t_p} = \left(\frac{1}{5,3 \cdot 42,5} + \frac{1}{1,3 \cdot 40 \cdot 8,33} \right) = 148,5 \text{ Вт/}^\circ\text{C}. \quad (13)$$

Тепловая мощность при слабой вентиляции:

$$\frac{Q_3}{\Delta t_p} = \left(\frac{1}{5,3 \cdot 42,5} + \frac{1}{1,3 \cdot 5 \cdot 8,33} \right) = 43,6 \text{ Вт/}^\circ\text{C}. \quad (14)$$

Коэффициент рекуперации при слабой вентиляции:

$$\rho_3 = \left(\frac{1,3 \cdot 5 \cdot 8,33}{5,3 \cdot 42,5} \right)^{-1} = 0,81. \quad (15)$$

При температуре воздуха в помещении 22°C и наружного воздуха -12°C температура, подаваемая рекуператором воздуха, составит:

$$t_p = -12 + 0,81 \cdot (22 + 12) = 15^\circ\text{C}. \quad (16)$$

По проделанным расчетам, зная температуру смеси воздуха в рекуператоре, возможно произвести подбор термоэлектрического модуля.

Наиболее подходящий по расчетам является низкотемпературный термоэлектрический модуль TEC1-12706. Габаритный чертеж и размеры модуля представлены на рисунке 3 [6].

Обозначение	Размер
A	40 мм
B	40 мм
C	3,8 мм

Рисунок 3
Габаритный чертеж и размеры модуля TEC1-12706

Технические характеристики выбранного термоэлектрического элемента TEC1-12706 представленные на рисунке 4.

После подбора термоэлектрического элемента необходимо его интегрировать в конструкцию пластинчатого рекуператора и разработать его конструкцию. Принцип работы пластинчатого рекуператора с термоэлектрическим модулем будет следующим: при прохождении наружного воздуха через фильтр приточного воздуха в теплообменник с одной стороны элемент будет охлаждаться, а при прохождении вытяжного воздуха через фильтр вытяжного воз-

духа другая сторона элемента будет нагреваться, в результате чего будет вырабатываться постоянный электрический ток, который можно накопить в АКБ и использовать для своих нужд. Для получения обратного эффекта полученную термо-ЭДС можно направить на дополнительный термоэлектрический модуль, тем самым модуль начнет с одной стороны нагреваться, а с другой – охлаждаться, что даст возможность нагревать или охлаждать приточный воздух [2].

Конструкция пластинчатого рекуператора с термоэлектрическим модулем представлена на рисунке 5.

Рисунок 4
Графические характеристики TEC1-12706

Рисунок 5
Конструкция пластинчатого рекуператора с термоэлектрическим модулем:
1 – медные шины; 2 – теплообменные пластины; 3 – термоэлемент Пельтье; 4 – полупроводники р-п-типа

Результаты исследования. После разработки конструкции пластинчатого рекуператора совместно с термоэлектрическим модулем определим по значениям теоретически рассчитанной температуры количество термоэлементов, которое потребуется для питания электроприемника напряжением 12 В.

При температуре 15°C (рисунок 4) при использовании термоэлектрического модуля TEC1-12706 можно получить 0,5 В; исходя из

этого, чтобы получить 12 В постоянного напряжения, понадобится 24 термоэлектрических модуля TEC1-12706.

Результаты теоретических исследований, которые направлены на получение постоянного напряжения с использованием термоэлектрического модуля TEC1-12706, при различных температурах внутри пластинчатого рекуператора представлены на рисунке 6.

Рисунок 6

Теоретические данные получения термо-ЭДС с одного термоэлектрического модуля в пластинчатом рекуператоре

Выводы. Использование термоэлектрических модулей в конструкции пластинчатого рекуператора можно считать целесообразным, так как при использовании термоэлектрических модулей появляется возможность регулирования температуры воздушной смеси в помещении. Также можно получить дополнительный источник электрической энергии.

Основным фактором, влияющим на КПД термоэлектрических элементов, является разность температур между его «теплой» и «холодной» сторонами. Поэтому больший энергетический эффект предлагаемого технического решения конструкции будет наблюдаться только в холодное время года, при минусовых температурах.

Библиографический список

1. Хабилов, Ф.Ф. Обоснование применения термоэлектрического генератора в системе дымоотведения котельной [Текст] / Ф.Ф. Хабилов, В.С. Вохмин // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. № 3 (32). С. 285–292.
2. Шагимарданова, А.Р. Энергосберегающая приточно-вытяжная установка с термоэлектрическим модулем [Текст] / А.Р. Шагимарданова, В.С. Вохмин // Актуальные проблемы энергообеспечения предприятий: материалы III Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 20-летию образования энергетического факультета Башкирского ГАУ, в рамках Российского энергетического форума и международной выставки «Энергетика Урала». Уфа: Башкирский ГАУ, 2018. С. 116–119.
3. Шамукаев, С.Б. Источники и системы теплоснабжения предприятий АПК [Текст]: учебное пособие / С.Б. Шамукаев, Э.М. Гайсин. Уфа: Башкирский ГАУ, 2018. 84 с.
4. Chernoiivanov V., Katkov A., Gabitov I., Yukhin G., Martynov V., Khasanov E., Mudar-isov S., Baltikov D., Khammatov R., Kovalev P. (2019). Technical equipment of farms for comfortable cow keeping in winter conditions. Bulgarian Journal of Agricultural Science, 25 (Suppl. 2), 45–53.
5. Юхин, Д.П. Применение термоэлектрических преобразователей в молочном животноводстве [Текст] / Д.П. Юхин, А.Н. Юхина, А.П. Козловцев // Актуальные проблемы энергообеспечения предприятий: материалы III Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 20-летию образования энергетического факультета Башкирского ГАУ, в рамках Российского энергетического форума и международной выставки «Энергетика Урала». Уфа: Башкирский ГАУ, 2018. С. 136–139.
6. Элемент Пельтье TEC1-12706. Характеристики, применение, условия эксплуатации [Электронный ресурс]: каталог / Оборудование. Технологии. Разработки. Режим доступа: <http://mypractic.ru/element-pelte-tec1-12706-xarakteristiki-primenenie-usloviya-ekspluatatsii.html> – 13.04.2020.

Сведения об авторах

1. **Хабилов Фидан Фазитович**, студент 3 курса магистратуры направления «Агроинженерия», ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, 450001, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, e-mail: fidan.20@mail.ru.
2. **Вохмин Вячеслав Сергеевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин и электрооборудования, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, 450001, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, e-mail: v_vohmin@mail.ru.

В статье рассматривается возможность использования термоэлектрических элементов в приточно-вытяжной системе предприятий АПК. Предлагается конструкция пластинчатого рекуператора с термоэлектрическими модулями.

Произведен конструктивный расчет предлагаемой конструкции рекуператора. Подобран низкотемпературный термоэлектрический модуль, проведены исследования получения ЭДС с расчетными значениями температур.

F. Khabirov, V. Vokhmin

THEORETICAL SUBSTANTIATION OF APPLICATION OF A THERMOELECTRIC MODULE IN A SUPPLY AND EXHAUST RECOVERY INSTALLATION FOR AGRICULTURAL ENTERPRISES

Key words: *ventilation system; energy efficiency; heat loss; plate heat exchanger; thermoelectric converter.*

Authors' personal details

1. **Fidan Khabirov**, a student of the second year of the master's program, the direction «Agroengineering», Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», 450001, Ufa, 50-letiya Oktyabrya St., 34, e-mail: fidan.20@mail.ru.

2. **Vyacheslav Vokhmin**, associate professor, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», 450001, Ufa, 50-letiya Oktyabrya St., 34, e-mail: v_vohmin@mail.ru.

The article considers the possibility of using thermoelectric elements in the supply and exhaust system of agricultural enterprises. A plate heat exchanger design with thermoelectric modules is proposed. A constructive calculation of the proposed

design of the recovery installation is made. A low-temperature thermoelectric module was selected, studies were conducted to obtain an electromotive force with calculated temperatures.

© Хабилов Ф.Ф., Вохмин В.С.