



Исследование тепло- и массо-обменных свойств рекуператоров на примере овощехранилища

Системы холодоснабжения зданий и сооружений остаются одним из основных потребителей электроэнергии. Исследования в области повышения энергоэффективности систем холодоснабжения позволяют снизить антропогенное воздействие на окружающую среду. Вместе с этим применение энергоэффективных систем холодоснабжения приводит к уменьшению коммунальных платежей. В условиях повышения требований к поддержанию заданных параметров микроклимата данное направление исследований является особенно актуальным.

Для снижения энергопотребления в зданиях и сооружениях на работу системы холодоснабжения и кондиционирования необходимо предпринимать комплексные меры, которые включают в себя: использование современной качественной теплоизоляции; применение тепловых завес в дверных проёмах с высокой проходимостью; использование стеклопакетов с пониженным коэффициентом пропускания солнечной энергии; применение рекуператоров.

Рекуператоры подразделяются на два вида: с передачей только явной энергии и с передачей явной и скрытой энергии. Наибольшее распространение получили рекуператоры, в которых передаётся только явная энергия. К ним относятся: пластинчатый, с промежуточным теплоносителем, с тепловой трубой.

Преимуществом данных теплообменников является низкая стоимость, относительная простота обслуживания и распространённость. Недостатком теплообменников является необходимость удаления избыточной влаги из приточного воздуха в тёплый период года.

Более совершенными являются энтальпийные рекуператоры. Их конструкция позволяет осуществлять перенос тепла и влаги. Они отличаются по типу конструкции [1]:

1. Роторный рекуператор с гигроскопической рабочей поверхностью (гигроскопический роторный рекуператор).
2. Сорбционные рекуператор с рабочей поверхностью из силикагеля (сорбционный роторный рекуператор).
3. Мембранные.

Отличие гигроскопического от обычного роторного рекуператора заключается в специальной обработке для удерживания влаги рабочей поверхности. Это позволяет рабочей поверхности адсорбировать и десорбировать молекулы воды во время вращения ротора.

Сорбционные роторы работают по такому же принципу, как и роторный рекуператор с гигроскопической рабочей поверхностью. В качестве материала для адсорбции влаги применяется силикагель, который имеет площадь поверхности 800 м²/г и обладает высокой способностью впитывать влагу.

Рецензия эксперта на статью получена 23.06.2021 [The expert review on the article received on June 26, 2021].

УДК 697.9:628.8. Научная специальность: 05.23.03.

Исследование тепло- и массообменных свойств рекуператоров на примере овощехранилища

С. В. Белуков, к.т.н., доцент; Я. А. Шелест, аспирант; Р. Х. Магжанов, ассистент, Московский политехнический университет (МГПУ)

Рассмотрены способы утилизации тепла и влаги из приточного воздуха в системе вентиляции на примере овощехранилища в летнее время. Проанализированы преимущества и недостатки различных схем утилизации тепла и влаги с использованием рекуперативных теплообменников. Проведён сравнительный анализ обработки воздуха с применением диаграммы Рамзина-Молье. После определения параметров выходных точек выявлено, что оптимальный вариант теплообменника — роторный рекуператор, в сравнении с пластинчатым и мембранным.

Ключевые слова: энтальпийный рекуператор, кондиционирование воздуха, энергосбережение, утилизация влаги, утилизация тепла, вентиляция.

UDC 697.9:628.8. Scientific specialty number: 05.23.03.

Reserching of heat and mass-exchange characteristic of recuperators on the example of a vegetable storage

S. V. Belukov, PhD, Associate Professor; Ya. A. Shelest; R. Kh. Magzhanov, assistant, Moscow Polytechnic University

The methods of heat and moisture utilization from the supply air in the ventilation system are considered on the example of a vegetable storage in the summer. The advantages and disadvantages of various schemes of heat and moisture utilization using regenerative heat exchangers are analyzed. A comparative analysis of air treatment using the Ramzin-Molye diagram is carried out. After determining the parameters of the output points, it was found that the optimal variant of the heat exchanger is a rotary heat exchanger in comparison with a plate and membrane heat exchanger.

Key words: enthalpy recuperator, air conditioning, energy saving, moisture recovery, heat recovery, ventilation.

Мембранные рекуператоры имеют вместо металлических пластин полимерную мембрану. Она способна пропускать молекулы водяного пара из вытяжного (увлажнённого) воздуха и передавать их приточному (сухому). Смешения вытяжных и приточных потоков при этом не происходит, так как влага пропускается через мембрану посредством диффузии.

Расчёт полной теплоты для рекуператоров трёх типов

В рамках исследования теплопередающей способности рекуператоров разных видов был проведён расчёт передачи полной теплоты для пластинчатого, мембранного и роторного рекуператора без адсорбционного покрытия. Целью данного исследования является анализ рекуперации явной и скрытой энергии удаляемого воздуха в системах вентиляции и кондиционирования и определение наиболее эффективного типа энтальпийного рекуператора с точки зрения минимальных затрат тепловой энергии.

В рамках исследования теплопередающей способности рекуператоров разных типов был проведён расчёт передачи полной теплоты для рекуператоров разных видов

Объектом исследования является хранилище лука объёмом 200 тонн, расположенное в пределах Московской области, в тёплый период года. Расчётная температура наружного воздуха соответствует июлю и составляет $t_1 = 26^\circ\text{C}$. В рамках исследования принята обеспеченность температуры воздуха 0,98, а удельная энтальпия наружного воздуха в июле составляет 54 кДж/кг [2]. Согласно нормативной документации, температура хранения лука составляет $t_{\text{п}} = 0^\circ\text{C}$ при относительной влажности $\phi_{\text{п}} = 75\%$ [3].

При построении на i - d -диаграмме процессов обработки влажного воздуха принято использовать следующие наименования характеристик точек:

- 1 — наружный воздух по параметрам «Б» в тёплый период года;
- 2п — приточный воздух на выходе из пластинчатого рекуператора;
- 2р — приточный воздух на выходе из роторного рекуператора;
- 2м — приточный воздух на выходе из мембранного рекуператора;
- п — воздух в помещении;
- 3 — приточный воздух на выходе из воздухоохладителя.



Вариант 1. Процесс охлаждения воздуха в пластинчатом рекуператоре и воздухоохладителе

В зависимости от конструктивного исполнения пластинчатые теплообменники способны передать от 40 до 70 % явной теплоты [4]. Данное соотношение характеризуется критерием эффективности теплообменника η_t и рассчитывается по формуле [5]:

$$\eta_t = \frac{t_1 - t_{2\text{п}}}{t_1 - t_{\text{п}}}, \quad (1)$$

где $t_{2\text{п}}$ — температура на выходе из рекуператора, $^\circ\text{C}$; $t_{\text{п}}$ — температура в помещении, $^\circ\text{C}$. Температурная эффективность рекуператора равна максимальному значению $\eta_t = 70\%$, тогда температура приточного воздуха после рекуператора составляет $7,8^\circ\text{C}$ при влажности $\phi_{2\text{п}} = 100\%$.

В пластинчатом рекуператоре теплообмен происходит без влагопередачи, поэтому расчётная энтальпия приточного воздуха на выходе из рекуператора составляет $i_{2\text{п}} = 24,4$ кДж/кг. Количество энергии, отведённой через пластинчатый рекуператор, находится по формуле [6]:

$$Q_p = \frac{L \rho_{\text{в}} (i_1 - i_{2\text{п}})}{3,6}, \quad (2)$$

где L — объёмный расход приточного воздуха, составляющий в рассматриваемом примере $150 \times 200 = 30\,000$ м³/ч; $\rho_{\text{п}}$ — плотность воздуха, принятая в размере 1,225 кг/м³; i_1 — энтальпия наружного воздуха, равная 54 кДж/кг; $i_{2\text{п}}$ — энтальпия приточного воздуха на выходе из пластинчатого рекуператора, равная 24,4 кДж/кг. Тогда $Q_p = 295\,758$ Вт.

Холодильная нагрузка на воздухоохладитель $Q_{\text{в}}$ при отсутствии рекуператора рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{в}} = \frac{L \rho_{\text{в}} (i_1 - i_3)}{3,6}, \quad (3)$$

где i_3 — энтальпия приточного воздуха на выходе из воздухоохладителя, равная 7,1 кДж/кг. Тогда $Q_{\text{в}} = 469\,328$ Вт.

Холодильная нагрузка с применением рекуператора рассчитана по следующей формуле [4]:

$$Q_{\text{вр}} = Q_{\text{в}} - Q_p = 469\,328 - 295\,758 = 173\,570 \text{ Вт.} \quad (4)$$

Применение пластинчатого рекуператора позволило снизить холодильную нагрузку на воздухоохладитель в 2,7 раза.

Вариант 2. Процесс обработки воздуха в приточно-вытяжной установке с роторным рекуператором

Эффективность передачи явной теплоты роторным рекуператором без адсорбционного покрытия варьируется η_t от 60 до 76 %, а эффективность передачи скрытой теплоты η_d от 55 до 71 %.

При эффективности передачи явной теплоты $\eta_t = 76\%$, воздух охладится в рекуператоре до $t_{2\text{р}} = 6,24^\circ\text{C}$ по формуле (1). Эффективность передачи скрытой теплоты рекуператора рассчитана по следующей формуле [5]:

$$\eta_d = \frac{d_1 - d_{2\text{р}}}{d_1 - d_{\text{п}}}, \quad (5)$$

где d_1 и $d_{2\text{р}}$ — влагосодержание притока, соответственно, на входе в утилизатор и на выходе из него, г/кг; $d_{\text{п}}$ — влагосодержание воздуха, уходящего из помещения, г/кг.

При эффективности передачи скрытой теплоты $\eta_d = 71\%$, влагосодержание приточного воздуха после рекуператора составляет $d_{2\text{р}} = 5,1$ г/кг, а энтальпия приточного воздуха — $i_{2\text{р}} = 19,1$ кДж/кг.

Количество энергии, отведённой через роторный рекуператор, рассчитывается по формуле (2) и составляет величину $Q_p = 347\,279$ Вт. Холодильная нагрузка на воздухоохладитель с применением роторного рекуператора рассчитана по формуле (4) $Q_{\text{вр}} = 122\,048$ Вт.

Применение роторного рекуператора позволило снизить холодильную нагрузку на воздухоохладитель в 3,85 раза.

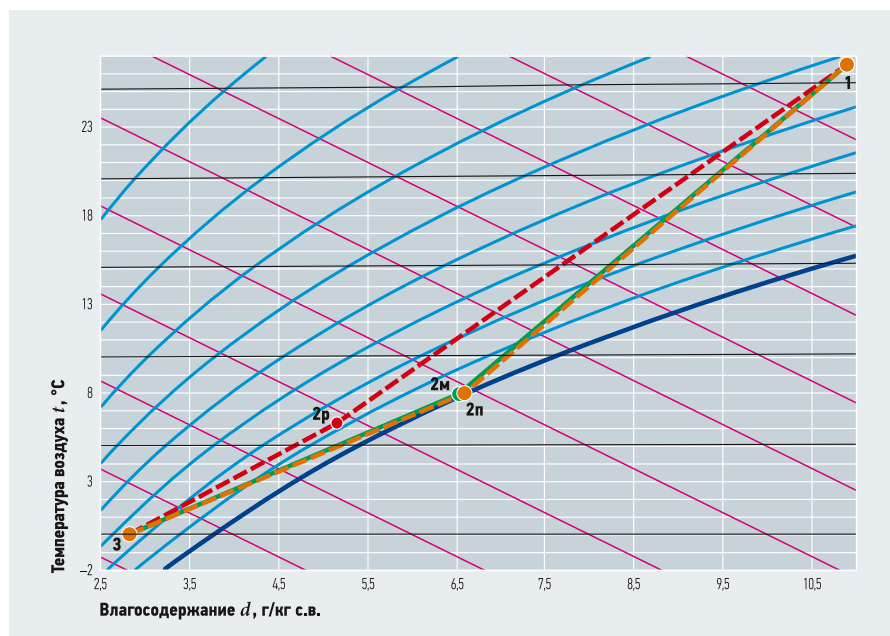


Рис. 1. График обработки приточного воздуха

Вариант 3. Процесс обработки воздуха в установке с мембранным утилизатором
Эффективность передачи явной теплоты мембранного рекуператора η_t от 62 до 70 %, а эффективность передачи скрытой теплоты η_d от 45 до 54 %.

При эффективности передачи явной теплоты $\eta_t = 70\%$, а скрытой теплоты $\eta_d = 54\%$, воздух охладится в теплоутилизаторе до $t_{2м} = 7,8^\circ\text{C}$ по формуле (1) и осушится до $d_{2м} = 6,5$ г/кг по формуле (5) за счёт холодного и сухого вытяжного воздуха, а энтальпия приточного воздуха — $i_{2м} = 24,2$ кДж/кг. Количество энергии, отведённой через мембранный рекуператор, рассчитывается по формуле (2) и составляет $Q_p = 296\,926$ Вт. Холодильная нагрузка на воздухоохладитель с применением мембранного рекуператора рассчитана по формуле (4): $Q_{вр} = 172\,401$ Вт.

Применение мембранного рекуператора позволило снизить холодильную нагрузку на воздухоохладитель в 2,72 раза.

Анализ полученных результатов

По результатам проведённых расчётов были построены графики процессов охлаждения приточного воздуха на диаграмме Рамзина-Молье (рис. 1): 1–2п — процесс охлаждения приточного воздуха в пластинчатом рекуператоре; 2п–3 — процесс охлаждения в воздухоохладителе после пластинчатого рекуператора.

Из данного графика следует, что произошло понижение температуры приточного воздуха до температуры ниже точки росы. Это привело к конденсации водяных паров непосредственно на теплопередающей поверхности.

Отсюда следует вывод, что при температуре поверхности рекуператора ниже $15,3^\circ\text{C}$ происходит образование влаги в нём. Во время охлаждения в пластинчатом рекуператоре с 26°C до $7,8^\circ\text{C}$ влаги было сконденсировано $154,9$ кг/ч.

Рассмотрим процесс охлаждения приточного воздуха в роторном рекуператоре 1–2р и процесс охлаждения в воздухоохладителе после роторного рекуператора 2р–3 на рис. 1.

Процесс понижения температуры приточного воздуха в роторном рекуператоре без адсорбционного покрытия ниже точки росы проходит аналогично процессу в рекуператоре пластинчатого типа, описание которого приведено выше. Однако ротор рекуператора движется вокруг своей оси, и ячейки, насыщенные влагой, перемещаются из приточного канала в вытяжной. В данном процессе потоком отработанного воздуха уносится часть влаги из ячеек рекуператора.

В процессе охлаждения в роторном рекуператоре температура снизилась с 26°C до $6,24^\circ\text{C}$, влаги было сконденсировано $205,9$ кг/ч.

1–2м — процесс охлаждения приточного воздуха в мембранном рекуператоре, а 2м–3 — процесс охлаждения в воздухоохладителе после мембранного рекуператора. Охлаждение приточного воздуха в мембранном рекуператоре отличается от рекуператоров, описанных выше. При движении приточного воздуха с высокой влажностью через теплообменник часть влаги не конденсируется, а адсорбируется на его поверхности. Благодаря разности парциальных давлений, адсорбированная влага перемещается из приточного канала в вытяжной и десорбируется. Во время охлаждения в мембранном рекуператоре с 26°C до $7,8^\circ\text{C}$, количество влаги, перенесённой из приточного канала в вытяжной, составляет $156,6$ кг/ч.

Процесс понижения температуры приточного воздуха в роторном рекуператоре без адсорбционного покрытия ниже точки росы проходит аналогично процессу в рекуператоре пластинчатого типа. Однако ротор рекуператора движется вокруг своей оси, и ячейки, насыщенные влагой, перемещаются из приточного канала в вытяжной

Рассмотрев сравнения видов рекуператоров энергии в системах холодоснабжения и кондиционирования воздуха, авторы пришли к выводу, что основные задачи — это уменьшение энергопотребления, что впоследствии даёт снижение нагрузки на окружающую среду. В табл. 1 представлены технические характеристики рассмотренных рекуператоров. При одинаковой воздухопроизводительности рекуператор роторного типа отводит на 11,6–13,8 % больше тепловой энергии. В этом случае холодильная нагрузка на воздухоохладитель снижается на 28,1–31,6 %.

Технические характеристики утилизаторов теплоты и влаги

табл. 1

Основные показатели / вид рекуператор	Пластинчатый	Роторный	Мембранный
Воздухопроизводительность, м ³ /ч	30 000	30 000	30 000
Утилизация тепловой энергии, кВт	308 333	357 848	316 231
Температурный КПД рекуператора, %	70	76	70
Холодильная нагрузка на воздухоохладитель, кВт	156 250	106 735	148 352
Влажностной КПД рекуператора, %	—	71	54

- Самарин О.Д., Аншакова М.С. Обоснование применения энтальпийных утилизаторов в системах вентиляции и кондиционирования // Журнал СОК, 2019. №4. С. 54–57.
- СП 131.13.330.2018. Строительная климатология. — М.: Стандартинформ, 2019.
- НТП АПК 1.10.12.001. Нормы технологического проектирования предприятий по хранению и обработке картофеля и плодовоовощной продукции. — М.: Гипронисельпром, 2002. 161 с.
- Moffitt R., Stanke D., Murphy J., Harshaw J. Air-to-Air Energy Recovery: Trane Engineers Newsletter Live. TraneCommercial. 2013. Web-source: youtube. com. Access data: June 25, 2021.
- Беккер А. Системы вентиляции. — М.: Техносфера; Евроклимат, 2005. 232 с.
- Кокорин О.Я., Варфоломеев Ю.М. Системы оборудования для создания микроклимата помещений. — М.: Инфра-М, 2012. 272 с.

References — see page 80.

Reserching of heat and mass-exchange characteristic of recuperators on the example of a vegetable storage. Pp. 47–49.

Sergey V. Belukov, PhD, Associate Professor; **Yaroslav A. Shelest**; **Rushan Kh. Magzhanov**, assistant, Moscow Polytechnic University

1. O.D. Samarin, M.S. Anshakova. *Obosnovanie primeneniya jental'pijnyh utilizatorov v sistemah ventiljacii i kondicionirovaniya* [Justification of the use of enthalpy heat exchangers in ventilation and air conditioning systems]. *Zhurnal Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie (SOK)* [Journal of Plumbing, Heating, Ventilation]. 2019. No. 4. Pp. 54–57. [In Russian]
2. *SP 131.13.330.2018* [The Code of Practice on Design and Construction (The Code of Practice) No. 131.13.330.2018]. *Stroitel'naja klimatologija* [Construction climatology]. Moscow. *Standartinform* [Russian Scientific-Technical Information Centre for Standardization, Metrology and Conformity Assessment ("Standartinform" Publishers)]. 2019. [In Russian]
3. *NTP APK 1.10.12.001* [Norms of technological design for the agro-industrial complex No. 1.10.12.001]. *Normy tehnologicheskogo proektirovaniya predpriyatij po hraneniju i obrabotke kartofelja i plodoovoshhnoj produkcii* [Standards for technological design of enterprises for the storage and processing of potatoes and fruits and vegetables]. Moscow. *Gipronisel'prom* [State Research and Design Institute for the creation of storage facilities, processing of fruits and vegetables, greenhouses and artificial climate facilities ("Giproneesel'prom")]. 2002. 161 p. [In Russian]
4. Moffitt R., Stanke D., Murphy J., Harshaw J. Air-to-Air Energy Recovery: Trane Engineers Newsletter Live. TraneCommercial. 2013. Web-source: youtube.com. Access data: June 25, 2021.
5. A. Bekker. *Sistemy ventiljacii* [Ventilation systems]. Moscow. *Tehnosfera* ["Technosfera", LLC]. *Evroklimat* ["Euroclimate", LLC]. 2005. 232 p. [In Russian]
6. O.Ja. Kokorin, Ju.M. Varfolomeev. *Sistemy oborudovanija dlja sozdaniya mikroklimata pomeshhenij* [Equipment systems for creating indoor microclimate]. Moscow. *Infra-M* ["Infra-M" Publishers]. 2012. 272 p. [In Russian]