

УДК 621.1.016.4+697.978+662.925.6

А. Э. Пушкарев, доктор технических наук, профессор
И. А. Пушкарев, ассистент
ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

АНАЛИТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ РОТОРНОГО РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА

Рассматривается один из способов снижения потребления энергоресурсов путем утилизации тепла вытяжного воздуха с помощью роторного регенератора. При допущении бесконечно большой теплопроводности теплоносителей и вращающейся матрицы получены аналитические зависимости для их температур.

Ключевые слова: альтернативные источники энергии; роторный регенеративный теплообменник.

Рациональное использование энергетических ресурсов – одна из наиболее важных задач для экономики Российской Федерации. В этом направлении перспективным является использование нетрадиционных и возобновляемых источников энергии. Особенности преобразования ветровой энергии в условиях малых скоростей ветра, характерных для большей части России, рассматривались в работах [1–6]; функции и структура теплоснабжения зданий с помощью тепловых насосов – в публикациях [7–9]; особенности совместного использования ветрогенератора и теплового насоса – в статье [10]; альтернативные системы отопления – в работах [11–13].

Эффективным способом снижения потребления энергоресурсов является утилизация тепла такого низкопотенциального источника энергии, как вытяжной воздух [14–16]. В последнее время для этих целей все чаще используются роторные регенераторы, обладающие высоким КПД.

Роторные теплообменники относятся к классу регенеративных теплообменников. При прохождении горячего теплоносителя стенки матрицы нагреваются, аккумулируя теплоту, затем передают ее проходящему холодному теплоносителю. В теплообменнике (рис. 1) вращающаяся матрица 1 размещена в корпусе 2, разделенном пластинами 4, образующими две секции для горячего и холодного теплоносителей.

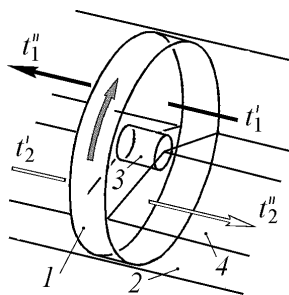


Рис. 1. Схема роторного регенеративного теплообменника: 1 – теплопередающая матрица; 2 – корпус; 3 – вал; 4 – разделительная пластина

В течение одного оборота (цикла) длительностью $\tau_{\text{ц}}$ матрица за время $\tau_{\text{г}}$ получает теплоту от горячего теплоносителя, а за время $\tau_{\text{х}}$ отдает его холодному теплоносителю; $\tau_{\text{ц}} = \tau_{\text{г}} + \tau_{\text{х}}$. Температура горячего теплоносителя при $\tau = 0$ $t_1 = t_1'$, при $\tau = \tau_{\text{г}}$ $t_1 = t_1''$;

холодного – при $\tau = 0$ $t_2 = t_2'$, при $\tau = \tau_{\text{х}}$ $t_2 = t_2''$. При этом температура матрицы в начале периода ее нагрева $t_{\text{w}1} = t_w'$, в конце периода нагрева при $\tau = \tau_{\text{г}}$ $t_{\text{w}1} = t_w''$; в начале периода охлаждения $t_{\text{w}2} = t_w''$, в конце периода охлаждения при $\tau = \tau_{\text{х}}$ снова $t_{\text{w}2} = t_w'$.

Процесс передачи теплоты описывается дифференциальным уравнением нестационарной теплопроводности $a\nabla^2 t + \frac{Q_V}{c\rho} = \frac{dt}{d\tau}$, где a – коэффициент температуропроводности; Q_V – тепловой поток единицы объема; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность; t – температура; τ – время [17].

В приближенном расчете вращающегося регенератора в качестве основного допущения принято, что матрица и теплоносители обладают бесконечно большой теплопроводностью [18]. Тогда температуры матрицы и теплоносителей по всему объему в каждый момент времени будут практически одинаковы

$\nabla^2 t = 0$ и $\frac{dt}{d\tau} = \frac{Q_V}{c\rho}$. Q_V рассматривается как фиктивный источник, обусловленный конвективным теплообменом на границах тела: $Q_V = \frac{\alpha F(t - t_w)}{V}$,

где α – коэффициент теплоотдачи; F – поверхность теплообмена (поверхность матрицы); V – объем матрицы; t – температура теплоносителя; t_w – температура матрицы. Таким образом, для нагрева

$$(t_1 - t_{\text{w}1})d\tau = \frac{c_w M_w}{\alpha_{\text{г}} F_{\text{г}}} dt_{\text{w}1}, \quad (1)$$

для охлаждения

$$(t_{\text{w}2} - t_2)d\tau = -\frac{c_w M_w}{\alpha_{\text{х}} F_{\text{х}}} dt_{\text{w}2}. \quad (2)$$

Здесь $M_w = \rho V$ – масса матрицы.

Считается также, что за период $\tau_{\text{г}}$ в регенераторе находится масса горячего теплоносителя $M_{\text{г}} = G_{\text{г}} \tau_{\text{г}}$, а за период $\tau_{\text{х}}$ – масса холодного теплоносителя $M_{\text{х}} = G_{\text{х}} \tau_{\text{х}}$. Тогда охлаждение горячего теплоносителя описывается уравнением:

$$(t_1 - t_{w1})d\tau = -\frac{c_{pr}M_\Gamma}{\alpha_\Gamma F_\Gamma} dt_1; \quad (3)$$

нагрев холодного теплоносителя:

$$(t_{w2} - t_2)d\tau = \frac{c_{px}M_x}{\alpha_x F_x} dt_2. \quad (4)$$

При получении зависимостей для температур в работе [19] приняты дополнительные допущения, что температуры теплоносителей и матрицы постоянны в периоды τ_Γ и τ_x . При этом расчет регенератора проводится в два этапа: 1) определение температур матрицы; 2) определение температур теплоносителей. Интегрирование на первом этапе ведется

при осредненных за периоды τ_Γ и τ_x значениях температур теплоносителей t_{1cp} и t_{2cp} : при охлаждении горячего теплоносителя $\alpha_\Gamma F_\Gamma (t_{1cp} - t_{w1})d\tau = c_w M_w dt_{w1}$; при нагреве холодного теплоносителя $\alpha_x F_x (t_{w2} - t_{2cp})d\tau = -c_w M_w dt_{w2}$ (рис. 2, а). Интегрирование на втором этапе проводится в предположении, что температура матрицы постоянна и равна t_{w1cp} при охлаждении теплоносителя: $\alpha_\Gamma F_\Gamma (t_1 - t_{w1cp})d\tau = -c_{pr} G_\Gamma \tau_\Gamma dt_1$ и t_{w2cp} при его нагреве: $\alpha_x F_x (t_{w2cp} - t_2)d\tau = c_{px} G_x \tau_x dt_2$ (рис. 2, б).

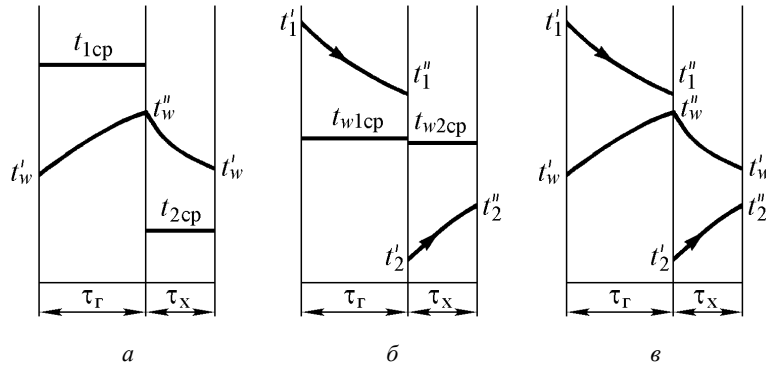


Рис. 2. Расчет температур: а – матрицы при постоянных температурах теплоносителей; б – теплоносителей при постоянной температуре матрицы; в – при переменных температурах теплоносителей и матрицы

Несмотря на дополнительные допущения, формулы для расчета конечных температур горячего и холодного теплоносителей t_1'' и t_2'' и температуры в начале и конце периодов для матрицы t_w' и t_w'' получаются достаточно громоздкими [20, 21].

Между тем при одном только допущении бесконечно больших теплопроводностей матрицы и теплоносителя можно получить точное аналитическое решение для температур теплоносителей и матрицы, не прибегая к средним значениям температур (рис. 2, в).

Для этого обратимся к формулам (1), (3) и (2), (4): левые их части одинаковы. Приравняв правые части, получаем: $K_1 dt_{w1} = -K_3 dt_1$; $-K_2 dt_{w2} = K_4 dt_2$, где $K_1 = \frac{c_w M_w}{\alpha_\Gamma F_\Gamma}$; $K_2 = \frac{c_w M_w}{\alpha_x F_x}$; $K_3 = \frac{c_{pr} M_\Gamma}{\alpha_\Gamma F_\Gamma}$; $K_4 = \frac{c_{px} M_x}{\alpha_x F_x}$.

После интегрирования, с учетом начальных условий, $K_1(t_{w1} - t_w') = -K_3(t_1 - t_1')$; $-K_2(t_{w2} - t_w'') = K_4(t_2 - t_2')$. Подставляя текущие значения температуры матрицы в период ее нагрева $t_{w1} = -(K_3 / K_1)(t_1 - t_1') + t_w'$ в уравнение (3) и в период ее охлаждения $t_{w2} = -(K_4 / K_2)(t_2 - t_2') + t_w''$ в уравнение (4), получаем:

$$[t_1 + (K_3 / K_1)(t_1 - t_1') - t_w']d\tau = -K_3 dt_1;$$

$$[-(K_4 / K_2)(t_2 - t_2') + t_w'' - t_2]d\tau = K_4 dt_2.$$

После разделения переменных и интегрирования:

$$t_1 = \frac{K_1}{K_1 + K_3} \left[(t_1' - t_w') e^{-\beta_\Gamma \tau} + \frac{K_3}{K_1} t_1' + t_w' \right]; \quad (5)$$

$$t_{w1} = -\frac{K_3}{K_1 + K_3} \left[(t_1' - t_w') e^{-\beta_\Gamma \tau} - t_1' - \frac{K_1}{K_3} t_w' \right]; \quad (6)$$

$$t_2 = \frac{K_2}{K_2 + K_4} \left[(t_2' - t_w'') e^{-\beta_x \tau} + \frac{K_4}{K_2} t_2' + t_w'' \right]; \quad (7)$$

$$t_{w2} = -\frac{K_4}{K_2 + K_4} \left[(t_2' - t_w'') e^{-\beta_x \tau} - t_2' - \frac{K_2}{K_4} t_w'' \right], \quad (8)$$

где $\beta_\Gamma = (K_1 + K_3) / (K_1 K_3)$; $\beta_x = (K_2 + K_4) / (K_2 K_4)$.

Из системы уравнений (5)–(8) окончательно получаем формулы для температур:

$$t_w'' = \frac{\frac{K_3}{K_1 + K_3} (1 - e^{-\beta_\Gamma \tau_\Gamma}) t_1' + \frac{K_4}{K_2 + K_4} \frac{K_3}{K_1 + K_3} \left(e^{-\beta_\Gamma \tau_\Gamma} + \frac{K_1}{K_3} \right) (1 - e^{-\beta_x \tau_x}) t_2'}{1 - \frac{K_4}{K_2 + K_4} \frac{K_3}{K_1 + K_3} \left(e^{-\beta_\Gamma \tau_\Gamma} + \frac{K_1}{K_3} \right) \left(e^{-\beta_x \tau_x} + \frac{K_2}{K_4} \right)}; \quad (9)$$

$$t'_w = \frac{\frac{K_4}{K_2 + K_4}(1 - e^{-\beta_x \tau_x})t'_2 + \frac{K_3}{K_1 + K_3} \frac{K_4}{K_2 + K_4} \left(e^{-\beta_x \tau_x} + \frac{K_2}{K_4} \right) (1 - e^{-\beta_r \tau_r})t'_1}{1 - \frac{K_3}{K_1 + K_3} \frac{K_4}{K_2 + K_4} \left(e^{-\beta_x \tau_x} + \frac{K_2}{K_4} \right) \left(e^{-\beta_r \tau_r} + \frac{K_1}{K_3} \right)}; \quad (10)$$

$$t''_1 = \frac{K_1}{K_1 + K_3} \left(e^{-\beta_r \tau_r} + \frac{K_3}{K_1} \right) t'_1 + \frac{K_1}{K_1 + K_3} (1 - e^{-\beta_r \tau_r}) t'_w; \quad (11)$$

$$t''_2 = \frac{K_2}{K_2 + K_4} \left(e^{-\beta_x \tau_x} + \frac{K_4}{K_2} \right) t'_2 + \frac{K_2}{K_2 + K_4} (1 - e^{-\beta_x \tau_x}) t'_w. \quad (12)$$

Сравним значения температур, рассчитанных по [22] и формулам (9)–(12). Расчет произведем для данных, приведенных в [23]. Вращающийся регенератор имеет частоту вращения $n = 20$ об/мин. Матрица, изготовленная из проволочной набивки, имеет массу $M_w = 6,45$ кг и удельную теплоемкость $c_w = 0,6$ кДж/(кг·К). Массовый расход горячего (воздух) и холодного (воздух) теплоносителей $G_r = G_x = 1$ кг/с, удельная теплоемкость $c_{pr} = 1,05$ кДж/(кг·К) и $c_{px} = 1,0$ кДж/(кг·К). Общая поверхность теплообмена $F = 15$ м², поверхность, омываемая горячим теплоносителем, $F_r = 10$ м² ($F_x = 5$ м²). Начальная температура горячего теплоносителя $t'_1 = 180$ °С, холодного $t'_2 = 20$ °С. Коэффициент теплоотдачи со стороны горячего теплоносителя $\alpha_r = 130$ Вт/(м²·К), холодного $\alpha_x = 100$ Вт/(м²·К).

Найдем время цикла $\tau_{\text{ц}} = 60/n = 3$ с и длительности периодов нагрева матрицы (охлаждения горячего теплоносителя) $\tau_r = \tau_{\text{ц}} F_r / F = 2$ с, охлаждения матрицы (нагрева холодного теплоносителя) $\tau_x = \tau_{\text{ц}} F_x / F = 1$ с.

Результаты расчетов сведены в таблице.

Расчет температур матрицы и теплоносителей

Параметр	$t'_w, \text{°C}$	$t''_w, \text{°C}$	$t''_1, \text{°C}$	$t''_2, \text{°C}$
Расчет по [24]	140	153	157	70
Расчет по формулам (9)–(12)	138	151	157	69

Таким образом, расчет по аналитическим формулам (9)–(12) практически не отличается от расчета, приведенного в [25]. При этом аналитические формулы получены при минимуме допущений и являются более компактными. Используя их, можно получить значения температур матрицы и теплоносителей в начале и конце периодов нагрева и охлаждения, а также в любой момент цикла. Аналитические зависимости позволяют анализировать влияние различных факторов на параметры теплоносителей и матрицы, предоставляя, таким образом, инструмент для проектирования роторных регенеративных теплообменников.

Библиографические ссылки

1. Морозов Д. А., Пушкарев А. Э. Функционально-структурная модель ветроэнергетических установок // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2008. – № 1. – С. 34–38.
2. Морозов Д. А., Пушкарев А. Э. Динамика малогабаритной ветроэнергетической установки с дополнительными поворотными элементами // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2009. – № 2. – С. 17–20.
3. Пушкарев А. Э., Морозов Д. А., Пушкарева Л. А. Синтез структурной схемы и параметров ветроустановки малой мощности // Вестник ИжГТУ имени М. Т. Калашникова. – 2010. – № 4. – С. 25–29.
4. Пушкарев А. Э., Пушкарева Л. А. Основные и дополнительные условия синтеза ветроэнергетической машины // Проблемы исследования и проектирования машин : сб. статей VI междунар. науч.-техн. конф. – Пенза : Приволжский Дом знаний, 2010. – С. 27–29.
5. Пушкарев А. Э., Пушкарева Л. А. Динамический синтез ветроустановки, работающей в области малых скоростных потоков // Современное машиностроение. Наука и образование. – 2011. – № 1. – С. 343–347.
6. Морозов Д. А., Пушкарев А. Э. Ротор ветродвигателя : патент на полезную модель 90850 РФ № 2009128668/22. – Оpubл. 20.01.2010. – Бюл. № 2.
7. Пушкарев И. А. Структурная и функциональная модели теплового насоса // Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты. – 2013. – № 4. – С. 186–191.
8. Pushkarev I. A. Functional and structural model of a heat supply of buildings with use of nonconventional power sources // Forth Forum of Young Researches. In the framework of International Forum "Education Quality – 2014" : Proceeding (April 21–23, 2014, Izhevsk, Russia). – Izhevsk : Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2014. – Pp. 225–227.
9. Пушкарев И. А. Функционально-структурная модель теплоснабжения зданий при использовании теплового насоса // Наука. Технологии. Инновации : матер. VIII всеросс. науч. конф. молодых ученых. – Новосибирск : НГТУ, 2014. – Ч. 5. – С. 45–47.
10. Пушкарев И. А., Пушкарев А. Э. Комплексное использование ветрогенератора и теплового насоса в системе теплоснабжения зданий // Составляющие научно-технического прогресса. – 2013. – № 4. – С. 46–48.
11. Пушкарева Л. А., Морозов Д. А., Пушкарева Т. А. Альтернативные системы отопления с использованием энергии ветра // Вестник КИГИТ. – 2013. – № 3 (33). – С. 48–52.
12. Pushkareva T. A. Matrix of ways of a heat supply of a house // Forth Forum of Young Researches. In the framework of International Forum "Education Quality – 2014" : Conference Proceedings. Editorial board : Boris Yakimovich; Yury

Turygin. – Izhevsk : Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2014. – pp. 228–230.

13. Пушкарева Т. А. Морфологический анализ способов теплоснабжения жилого дома // Наука. Технологии. Инновации : матер. VIII всеросс. науч. конф. молодых ученых. – Новосибирск : НГТУ, 2014. – Ч. 5. – С. 42–44.

14. Пушкарева Л. А., Морозов Д. А., Пушкарева Т. А. Альтернативные системы отопления с использованием энергии ветра // Вестник КИГИТ. – 2013. – № 3 (33). – С. 48–52.

15. Pushkareva T. A. Matrix of ways of a heat supply of a house // Forth Forum of Young Researches. In the framework of International Forum “Education Quality – 2014” : Conference Proceedings. Editorial board : Boris Yakimovich; Yury Turygin. – Izhevsk : Publishing House of Kalashnikov ISTU, 2014. – pp. 228–230.

16. Пушкарева Т. А. Морфологический анализ способов теплоснабжения жилого дома // Наука. Технологии. Инно-

вации : матер. VIII всеросс. науч. конф. молодых ученых. – Новосибирск : НГТУ, 2014. – Ч. 5. – С. 42–44.

17. Теплотехника / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер и др. ; под ред. В. Н. Луканина. – М. : Высш. шк., 2006. – 671 с.

18. Там же.

19. Там же.

20. Там же.

21. Тепломассообменное оборудование. Лабораторный практикум. – Ч. 2. Регенеративные и смешительные теплообменники инженерных систем зданий / сост.: А. Э. Пушкарев, И. А. Пушкарев. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2016. – 28 с.

22. Теплотехника / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер и др. ; под ред. В. Н. Луканина. – М. : Высш. шк., 2006. – 671 с.

23. Там же.

24. Там же.

25. Там же.

Pushkarev A. E., DSc in Engineering, Kalashnikov ISTU

Pushkarev I. A., Assistant, Kalashnikov ISTU

Analytical calculation of the rotor regenerative heat exchanger

One of the ways to decrease the consumption of energy resources by utilization of the exhaust air heat by means of a rotor regenerator is considered. At an assumption of infinitely big heat conductivity of heat carriers and the rotating matrix the analytical dependences for their temperatures are received.

Keywords: alternative energy sources; rotor regenerative heat exchanger.

Получено: 09.03.16