

**ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ  
РЕГЕНЕРАТИВНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА  
ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В СИСТЕМЕ  
АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ  
ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ДЫХАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

**С.В. Гудков<sup>1</sup>, Е.Ю. Филатова<sup>2</sup>, Е.Н. Туголуков<sup>2</sup>,  
С.Ю. Алексеев<sup>2</sup>, А.В. Романенко<sup>2</sup>**

*ОАО «Корпорация «Росхимзащита» (1);*

*Тамбовский государственный технический университет (2)*

*Рецензент С.В. Фролов по представлению В.Ф. Калинина*

**Ключевые слова и фразы:** индивидуальный дыхательный аппарат; математическое моделирование; нестационарные поля температур; регенеративный теплообменник.

**Аннотация:** Рассмотрена методика проведения испытаний регенеративных теплообменников индивидуального дыхательного аппарата. Приводится математическая модель взаимосвязанных нестационарных температурных полей конструктивных элементов регенеративного теплообменника индивидуального дыхательного аппарата и проходящего через него газовоздушного потока. Даются рекомендации по выбору рациональной конструкции теплообменника.

**Обозначения**

$c$ – теплоемкость материала ленты, Дж/(кг·°C);	$t_c(z, \tau)$ – температура газовоздушной смеси, °C;
$G$ – расход газовоздушной смеси, м <sup>3</sup> /с;	$z$ – пространственная координата по длине ленты, м;
$L$ – длина зоны теплообмена, м;	$\alpha$ – коэффициент конвективной теплоотдачи от поверхности ленты к газовоздушной смеси, Вт/(м <sup>2</sup> ·°C);
$R$ – толщина ленты, м;	$\lambda$ – теплопроводность материала ленты, Вт/(м·°C);
$t(z, \tau)$ – текущая температура ленты, °C;	$\Pi$ – омываемый периметр канала, м;
$t_0$ – начальная температура ленты, °C;	$\rho$ – плотность материала ленты, кг/м <sup>3</sup> ;
$t_{c1}$ – начальная температура воздуха, °C;	$\tau$ – время, с.
$t_{c2}$ – начальная температура выдоха, °C;	

Гудков С.В. – начальник отдела индивидуальных средств защиты органов дыхания, главный конструктор ОАО «Росхимзащита»; Филатова Е.Ю. – программист, аспирантка кафедры «Автоматизированное проектирование технологического оборудования» ТГТУ; Туголуков Е.Н. – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизированное проектирование технологического оборудования» ТГТУ; Алексеев С.Ю. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования» ТГТУ, Романенко А.В. – кандидат технических наук, доцент кафедры «Системы автоматизированного проектирования» ТГТУ.

В связи с расширением трудовой и познавательной деятельности человека, он все чаще сталкивается с неблагоприятным воздействием окружающей среды, что обуславливает необходимость применения тех или иных средств жизнеобеспечения. На производствах, опасных по внезапным выбросам газа, при которых образуется бескислородная или непригодная для дыхания атмосфера, необходимо применять средства индивидуальной защиты органов дыхания с регенерацией воздуха.

В регенеративных дыхательных аппаратах эта атмосфера создается за счет регенерации выдыхаемого воздуха путем поглощения из него углекислого газа и добавления кислорода из имеющегося в аппарате запаса, после чего регенерированный воздух поступает на вдох.

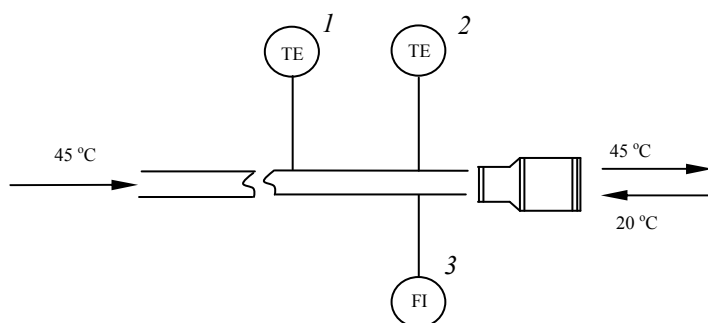
Особенностью регенеративных дыхательных аппаратов с химически связанным кислородом является значительное нагревание и осушение регенерированного воздуха, в результате чего, если не принять специальных мер для его кондиционирования, на вдох поступит горячий и сухой воздух. Выходящий из регенеративного патрона воздух имеет высокую температуру (около 400 °С). Возможности охлаждения горячего воздуха в изолирующих аппаратах ограничены в связи с их небольшими размерами (и ограниченной массой) и необходимостью надежной защиты регенеративного патрона от механических повреждений. Кроме того, при рециркуляции воздуха он нагревается вновь при втором проходе через регенеративный патрон.

Эффективность использования алюминиевых регенеративных теплообменников и теплообменников из пористых материалов для охлаждения вдыхаемой газовой смеси в индивидуальных дыхательных аппаратах исследовалась экспериментально на базе ОАО «Росхимзащита». Методика испытаний и схема установки приведена ниже.

Теплообменник подключался к установке «Искусственные легкие». Установка настраивалась на температуру выдыхаемого воздуха 45 °С и легочную вентиляцию 35 л/мин. Горячий воздух на выдохе проходил через теплообменник и нагревал его. Воздух комнатной температуры на вдохе проходил через теплообменник, охлаждал его, а сам нагревался. Такая схема работы теплообменника является обратной по сравнению со схемой работы теплообменника в аппарате, где выдыхается холодный воздух, а вдыхается горячий, который необходимо охлаждать.

Использование обратной схемы обусловлено следующим. Имитация прямой схемы работы теплообменника предполагает наряду с подачей на вход (вдох) теплообменника горячего воздуха помещение его в среду, температура которой равна температуре горячего воздуха. В этом случае отсутствует сток тепла через стенки обечайки, что не соответствует специфике работы теплообменника в реальных условиях. При обратной схеме работы нет необходимости помещать теплообменник в прогретую камеру, он располагается на открытом воздухе, что в большей степени соответствует его условиям работы в аппарате.

Эффективность теплообменника оценивалась по степени нагрева вдыхаемого воздуха. Схема установки показана на рис. 1.



**Рис. 1** Схема установки для испытания теплообменников:

1 – термометр ртутный; 2 – преобразователь термоэлектрический; 3 – тягонапоромер

В процессе испытаний измерялись следующие параметры:

- температура выдыхаемого воздуха ртутным термометром 1;
- температура вдыхаемого воздуха преобразователем термоэлектрическим 2;
- сопротивление дыханию тягонапоромером 3.

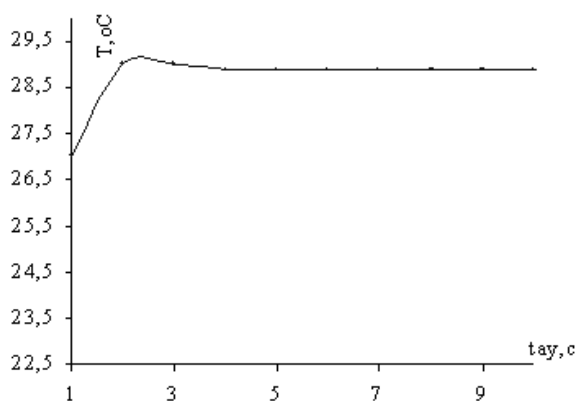
Для снижения влияния тепловой инерции преобразователя термоэлектрического истинная температура воздуха на входе вычислялась по формуле

$$T_{\text{ист}} = K_1 T_{\text{вд}} + T_{\text{выд}} - T_{\text{т}}, \quad (1)$$

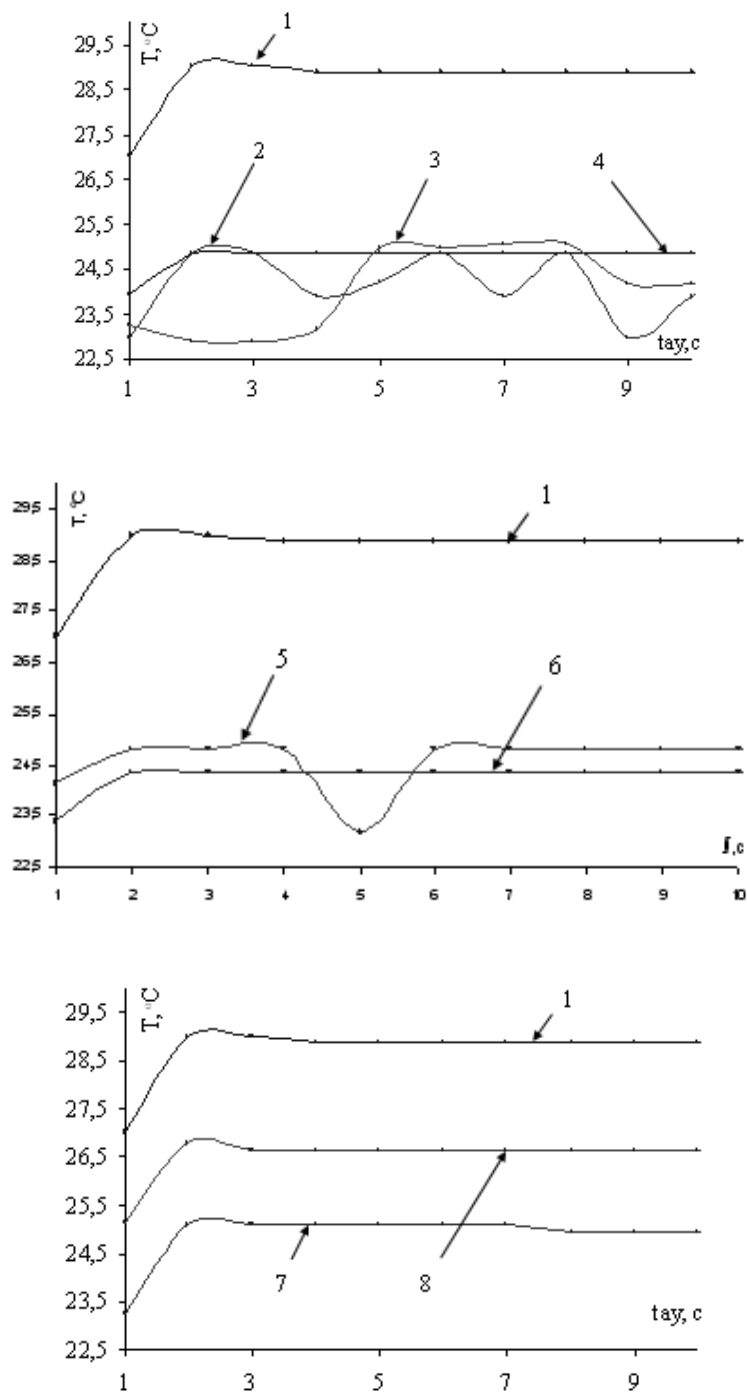
где  $T_{\text{вд}}$  – температура вдыхаемого воздуха, показываемая преобразователем термоэлектрическим 2, °C;  $T_{\text{выд}}$  – температура выдыхаемого воздуха, показываемая преобразователем термоэлектрическим 2, °C;  $T_{\text{т}}$  – температура выдыхаемого воздуха, показываемая термометром 1, °C;  $K_1 = 0,85 \dots 0,87$  – эмпирический коэффициент.

Зависимость температуры воздуха на входе от времени за 10 минут приведена на рис. 2.

Для сравнения на этой же установке были проведены эксперименты по оценке эффективности теплообменников из пористых материалов. На испытания были отобраны образцы с различной порозностью и массой. Результаты испытаний пористых теплообменников представлены на рис. 3 и в табл. 1. Эффективность теплообмена оценивалась так же, как и для алюминиевого теплообменника – по температуре на входе.



**Рис. 2** График зависимости температуры воздуха на входе после теплообменника от времени



**Рис. 3 Сравнительные результаты испытаний пористых теплообменников:**

- 1 – алюминиевый 9,6 г/6 мм вод. ст.;
- 2 – пеноникель 4,5 г/3,5 мм вод. ст.;
- 3 – пеноникель 5,5 г/10 мм вод. ст.;
- 4 – меноникель 5,5 г/9 мм вод. ст.;
- 5 – пеноникель 4 г/14 мм вод. ст.;
- 6 – пеноникель (2) 4 г/14 мм вод. ст.;
- 7 – пеномедь 6 г/12 мм вод. ст.;
- 8 – пеноникель 10 г/10 мм вод. ст.

Таблица 1

**Результаты испытаний пористых теплообменников**

№ п/п	Материал теплообменника	Масса т/о, г	Аэродинамическое сопротивление теплообменника на постоянном потоке 60 л/мин, мм вод. ст	Температура на входе ( $T_{вх}$ ), °С	Гидродинамическое сопротивление теплообменника на пульсирующем потоке во время испытания (вдох/выдох), мм вод. ст
1	Пеноникель	4,5	3,5	24,2	10/10
2	Пеноникель	10	10	26,5	20/20
3	Пеноникель	5,5	9	24,7	20/22
4	Пеноникель	5,5	10	24,1	28/30
5	Пеноникель	4	14	24,6	20/22,32/32 <sub>100</sub>
6	Пеноникель	4	14	24,3	30/30
7	Пеномедь	6,5	12	24,9	25/30
8	Алюминий	9,6	10	28,7	10/10

Примечание: для теплообменника 5 в табл. данные по сопротивлению приведены за 10 мин и за 100 мин. На 100-й мин сопротивление возросло, так как мелкие поры теплообменника забились влагой из установки.

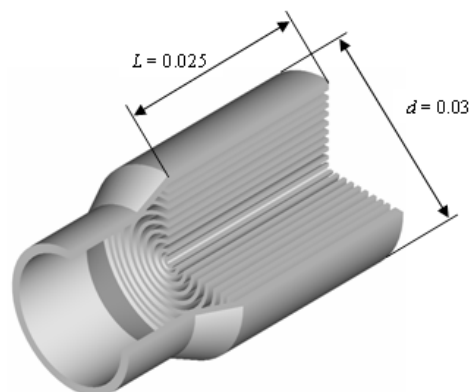
Результаты испытаний пористых теплообменников показывают, что при одинаковой эффективности теплообмена они обеспечивают более высокое гидравлическое сопротивление, что в индивидуальных дыхательных аппаратах нежелательно. Следовательно, для охлаждения вдыхаемой газовой смеси рационально применение регенеративных теплообменников с алюминиевыми конструкционными элементами.

Одна из конструкций регенеративных теплообменников представляет собой тонкую алюминиевую гофрированную ленту, компактно уложенную в виде спирали в пластмассовом цилиндрическом кожухе диаметром 0,03 м (рис. 4).

Для выбора рациональной конструкции теплообменника дыхательного аппарата и режима его работы, разработана математическая модель взаимосвязанных нестационарных температурных полей конструкционных элементов регенеративного теплообменника и проходящего через него потока газовой смеси.

При выводе уравнений математической модели был принят ряд допущений:

- температура по сечению теплообменника не меняется;
- теплофизические характеристики среды внутри малой пространственной и временной области не зависят от температуры.



**Рис. 4** Регенеративный теплообменник индивидуального дыхательного аппарата

Математическая модель нестационарного температурного поля ленты имеет следующий вид [2]:

$$\frac{\partial t(z, \tau)}{\partial \tau} = a^2 \frac{\partial^2 t(z, \tau)}{\partial z^2} - Kt(z, \tau) + Kt_c(z, \tau), \quad (2)$$

где  $K = \frac{2\alpha}{R\rho c}$ ,  $\tau > 0$ .

$$t(z, 0) = f(z). \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial t(0, \tau)}{\partial z} - \alpha(t(0, \tau) - t_c(0, \tau)) = 0, \quad (4)$$

$$\lambda \frac{\partial t(L, \tau)}{\partial z} + \alpha(t(L, \tau) - t_c(L, \tau)) = 0. \quad (5)$$

Математическая модель стационарного температурного поля газоздушного потока выбрана для короткого участка канала, рассматриваемого в течение короткого интервала времени. При этом температура потока является функцией одной продольной координаты, а температура ленты на участке постоянна и равна  $t_F$ :

$$\frac{dt_c(z)}{dz} + Ht_c(z) = S, \quad (6)$$

где  $H = \frac{\alpha\Pi}{Gc}$ ;  $S = \frac{\alpha\Pi t_F}{Gc}$ .

$$t_c(0) = t_0. \quad (7)$$

Аналитические решения задач (2) – (5) и (6) – (7) приведены в [1]. На основе этих решений разработан алгоритм расчета взаимосвязанных нестационарных температурных полей потока газоздушной смеси и конструкционного элемента регенеративного теплообменного аппарата, а также создан программный код. Предложенная программа позволяет исследовать влияние массы алюминиевой ленты на режим работы регенеративного теплообменника дыхательного аппарата.

В качестве исходных данных для расчета применялись следующие значения геометрических размеров теплообменного аппарата и характеристики вдыхаемой газоздушной смеси:

- длина зоны теплообмена  $L = 0,025$  м;
- толщина алюминиевой ленты  $R = 0,00005$  м;
- начальная температура ленты  $t_0 = 20,0$  °С;
- начальная температура воздуха  $t_{c_1} = 100,0$  °С;
- начальная температура выдоха  $t_{c_2} = 37,0$  °С.

Расчеты проводились при одинаковом гидравлическом сопротивлении для различных значений массы конструкционного элемента регенеративного теплообменника индивидуального дыхательного аппарата. Тестирование программы осуществлялось для трех режимов работы.

Результаты работы программы при различных значениях массы алюминиевой фольги представим в виде сводной табл. 2.

Таблица 2

## Результаты сравнительных расчетов

Режим работы	Легкий $V = 20; n = 12;$ $\tau = 2,5$	Средний $V = 40; n = 20;$ $\tau = 1,5$	Тяжелый $V = 70; n = 30;$ $\tau = 1$
Сравнительные характеристики	$m = 0,00960; d = 0,03$		
$k$	13	19	23
$t_{\text{выд}}$	71,8	71,1	71,3
	$m = 0,01152 (+ 20\% m); d = 0,031$		
$k$	16	22	31
$t_{\text{выд}}$	67,9	67,3	67,5
	$m = 0,0144 (+ 50\% m); d = 0,031$		
$k$	20	27	33
$t_{\text{выд}}$	63,2	62,7	62,9
	$m = 0,0192 (+ 100\% m); d = 0,033$		
$k$	29	36	42
$t_{\text{выд}}$	57,8	57,4	57,6

Обозначения:  $V$  – объемный расход вдыхаемой газовой смеси, л/мин;  $n$  – количество циклов дыхания (цикл дыхания включает в себя вдох и выдох), 1/мин;  $\tau$  – время цикла дыхания, с;  $m$  – масса алюминиевой фольги, г;  $d$  – диаметр регенеративного теплообменника, м;  $t_{\text{выд}}$  – температура газовой смеси на выдохе, °С;  $k$  – число циклов до установления стабилизированного циклического режима, ед.

Сравнительный анализ приведенных в табл. 2 результатов показывает, что установившаяся температура газовой смеси на вдохе снижается с ростом массы алюминиевой фольги. Кроме того, с увеличением массы алюминиевой ленты регенеративного теплообменника требуется большее число циклов для выхода на стабилизированный циклический режим, т.е. значительно увеличивается время установления стабилизированного циклического режима.

На основе полученных результатов можно сформулировать следующие выводы. Предпочтительно использование алюминиевого ленточного теплообменника. Применение теплообменников из пористых материалов нецелесообразно. Небольшое увеличение массы при незначительном увеличении габаритных размеров с целью сохранения гидравлического сопротивления теплообменника повышает комфортность работы в индивидуальных средствах защиты.

## Список литературы

- 1 Туголуков, Е.Н. Математическое моделирование технологического оборудования многоассортиментных химических производств / Е.Н. Туголуков // Монография. – М.: Машиностроение, 2004. – 100 с.
- 2 Филатова, Е.Ю. Математическая модель температурных полей теплообменника дыхательного аппарата / Е.Ю. Филатова // XI науч. конф. ТГТУ: Пленарные доклады и краткие тезисы. – Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2006.

## The Choice of Optimal Design of Regenerative Heat Exchanger for Using in the System of Automated Designing of Individual Breathing Apparatuses

S.V. Gydkov<sup>1</sup>, E.Y. Filatova<sup>2</sup>, E.N. Tygolykov<sup>2</sup>,  
S.Y. Alexeev<sup>2</sup>, A.V. Romanenko<sup>2</sup>

*Corporation «Roshimzashita» (1);  
Tambov State Technical University (2)*

**Key words and phrases:** individual breathing apparatus; mathematical modeling; non-stationary temperature fields; regenerative heat exchanger.

**Abstract:** The methodology of doing tests with regenerative heat exchangers of individual breathing apparatus is studied. Mathematical model of interrelated non-stationary temperature fields of construction elements in regenerative heat exchanger of individual breathing apparatus and gas-air flow going through it is given. Recommendations on the choice of optimal design of the heat exchanger are made.

---

© С.В. Гудков, Е.Ю. Филатова, Е.Н. Туголуков,  
С.Ю. Алексеев, А.В. Романенко, 2006