

## **ДИФФУЗИЯ ГАЗОВОЗДУШНОГО ПОТОКА ЧЕРЕЗ ЧАСТИЧНО-ПРОНИЦАЕМЫЕ МЕМБРАНЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ**

**А. А. Плужников, И. В. Швецов, О. И. Швецова**

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого,  
г. Великий Новгород, Россия

Поддержание нормальной температуры в жилых помещениях или на промышленных предприятиях необходимо для нормальной жизнедеятельности человека. Новизна нового регламента отражена в полученном патенте, реализация которого не только интенсифицирует процесс, но и позволяет повысить энергоэффективность. Устройство может служить в качестве основы для разработки оптимальной системы управления. Разработанная модель может служить основой для создания методов проектирования и разработки оптимального алгоритма управления устройствами.

**Ключевые слова:** диффузия, тепломассообмен, температура, теплоносители

## **DIFFUSION GAS FLOW THROUGH A PARTIALLY-PERMEABLE MEMBRANE TO INCREASE THE TEMPERATURE**

**A. A. Pluzhnikov, I. V. Shvetsov, O. I. Shvetsov**

Novgorod State University, Veliky Novgorod, Russia

Maintaining normal temperatures in residential areas or industrial facilities necessary for the normal functioning of human. The novelty of the new rules reflected in the resulting patent, which not only intensifies the process, but also improves energy efficiency. The device can serve as a basis for the development optimal control systems. The developed model can serve as a basis for the development of methods for design and develop optimal control algorithm devices.

**Ключевые слова:** diffusion, heat-and-mass transfer, temperature, heat-carriers

На промышленных предприятиях и в жилых помещениях используют оборудование для повышения температуры воздуха. Основным недостатком этих устройств является необходимость использования нагревательных элементов, таких как спирали или инфракрасные излучатели, которые повышают расход электроэнергии. Данный недостаток определяется сложностью монтажа проводки в помещениях, так как не всегда можно точно рассчитать на какой расход электроэнергии предполагается в дальнейшем рассчитывать.

Температура в помещениях является одним из ведущих факторов, определяющих метеорологические условия производственной среды. Высокие температуры оказывают отрицательное воздействие на здоровье человека. Работа в условиях высокой температуры сопровождается интенсивным потоотделением, что приводит к обезвоживанию

организма, потере минеральных солей и водорастворимых витаминов, вызывает серьезные и стойкие изменения в деятельности сердечнососудистой системы, увеличивает частоту дыхания, а также оказывает влияние на функционирование других органов и систем – ослабляется внимание, ухудшается координация движений, замедляются реакции и т. д.

Проблема энергосбережения специалистами различного уровня была поднята с началом экономической перестройки в стране. И только в 1995 году энергосбережение было закреплено как основа энергетической стратегии и энергетической политики России на длительную перспективу [1, 6]. Данное устройство используется для повышения температуры теплоносителя с использованием температуроповышающих элементов [4, 5, 7, 8].

## ДИФфуЗИЯ ГАЗОВОЗДУШНОГО ПОТОКА ЧЕРЕЗ ЧАСТИЧНО-ПРОНИЦАЕМЫЕ МЕМБРАНЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

При исследовании использованы теоретические и экспериментальные методы. Теоретические исследования базируются на научных основах прикладной механики жидкости и газа, гидрогазодинамики и термодинамики, физической химии, газового анализа и материаловедения. Экспериментальные исследования выполнялись с использованием современных аппаратных средств и приборов для количественной и качественной оценки физико-химических процессов [1]. При проведении экспериментов и обработке их результатов применяются методы теории планирования эксперимента и статистической обработки данных [1].

На основании полученных результатов предложена гипотеза и теоретически установлена взаимосвязь диффузии и массопереноса с температурой газообразных теплоносителей в зоне исследования, проведены экспериментальные исследования, подтверждающие адекватность предлагаемых физических и математических моделей.

На основе предлагаемой модели создана методика исследования повышения температуры газообразных теплоносителей без использования дополнительных нагревательных приборов, произведенные расчеты по данной методике показывают целесообразность применения предлагаемой системы повышения температуры теплоносителей, эффективность которой подтверждается экспериментально.

Разработка моделей в естественных и технологических физических системах в зависимости от внешних воздействий является актуальной проблемой, которая исследуется в рамках ряда направлений, описание которых ведет к нелинейным или нестационарным уравнениям для систем, включающим дополнительные условия моделирования процессов. Это важно при построении алгоритмов, развитии численных методов, разработке программ и их реализацию для проведения компьютерных расчетов.

Одним из малоизученных переходных процессов в физике является процесс нагрева газообразного или, тем более, жидкого вещества при прохождении через любой материал. Интерес к этой проблеме связан с экспериментальными исследованиями данных процессов и явлений, на не стандартном толковании термодиффузии [1].

При решении задач теплофизики широко используют математическое описание температурных полей, возникающих в твердых телах под действием различных источников

теплоты, в основе которого лежит следующее положение. Температурное поле, возникающее в твердом теле под действием движущегося или неподвижного источника теплоты любой формы, действующего временно или непрерывно, можно получить как результат той или иной комбинации температурных полей, возникающих под действием системы точечных мгновенных источников теплоты.

Для описания самого процесса повышения температуры за основу приняты известные законы и положения диффузии и массопереноса. Процесс массопереноса газовой среды через температуроповышающие материалы не сопровождается ни пластическим деформированием, ни разрушением кристаллической решетки металла, поэтому разрыва атомно-молекулярных связей при наличии приложенных усилий воздушных потоков и увеличение избыточной энергии не происходит. Пористость структуры используемого материала и трение молекул газовой среды о стенки пор способствует выделению тепловой энергии.

В предлагаемой модели предполагается, что законы диффузии действуют так же, как и при других процессах. В связи с этим, не нарушая основной принцип модели массопереноса и диффузии, полагаем, что миграция газовой среды в температуроповышающих материалах протекает согласно следующим положениям:

- законы диффузии газовой среды (воздуха) выполняются по всему пути движения и соответствуют классической теории;

- на состояние газовой среды (в данном случае увеличение температуры) оказывает трение ее молекул со стенками материала и скорость прохождения молекул в «лабиринтах» пористого материала.

При рассмотрении проблемы массопереноса и диффузии при использовании температуроповышающих материалов необходимо выделить несколько основных моментов:

- описание механизма диффузии при внешнем воздействии путем трения со стенками пор применяемого материала. Данной проблеме в известных автору работах не уделено внимания и поэтому не может быть какой-то единой точки зрения на эту проблему;

- влияние внешнего воздействия на диффузию как процесс трения молекул газовой среды в виде трения внутри пор материала.

Рассмотрим диффузию в условиях внешнего воздействия, заключающегося в выделении тепловой энергии, при повышении

скорости потока газа и трении его молекул о стенки пористого температуроповышающего материала. Также происходит трение молекул газа между собой при повышении его концентрации внутри объема материала и увеличение длины пробега при увеличении скорости потока по всей длине материала и одновременном снижении площади сечения.

Решение уравнения диффузии принимает различный вид в зависимости от начальных и граничных условий. Этот случай обычно реализуется при исследовании диффузии атомов из газовой фазы или из нанесенного на поверхность образца толстого слоя, когда на границе образца в течение всего диффузионного отжига поддерживается постоянная концентрация примеси. В этом случае начальные и граничные условия отвечают выражению (2.13).

Время диффузии  $\tau$  атомов определяется периодом действия внешних сил, когда поток диффундирующих элементарных частиц наибольший. Ширина диффундирующе-

го слоя определяется размером температуроповышающего элемента.

В соответствии с представленными выше данными остановимся на математическом выражении диффузии. Рассмотрим диффузию в воздухопроводе поэлементно. При этом должны выполняться следующие условия. При прохождении воздушного потока свободно без препятствий на элементарной длине  $\Delta l_1$  пройденный путь молекул воздуха будет равен  $\Delta L_1$ . При прохождении воздушного потока через «лабиринт» пористого материала на элементарной длине  $\Delta l_2$  пройденный путь молекул воздуха будет равен  $\Delta L_2$ . После температуроповышающего элемента продолжает проходить беспрепятственный массоперенос теплоносителя с повышенной температурой внутри воздуховода. Соответственно, после выхода из температуроповышающего материала элементарная длина будет  $\Delta l_3$  при дальнейшем массопереносе в трубе для элементарного пути  $\Delta L_3$ , пройденного молекулами газа после выхода из температуроповышающего материала.

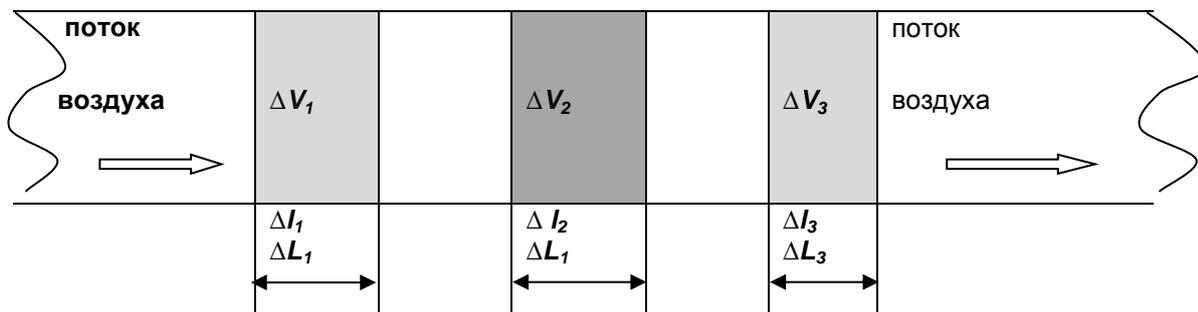


Рисунок – Схема массопереноса газовоздушного теплоносителя в воздухопроводе через температуроповышающий элемент:  $\Delta l_1$  – элементарная длина массопереноса в трубе;  $\Delta l_2$  – элементарная длина массопереноса в температуроповышающем материале;  $\Delta l_3$  – элементарная длина массопереноса в трубе после выхода из температуроповышающего материала;  $\Delta L_1$  – элементарный путь, пройденный молекулой газа в трубе;  $\Delta L_2$  – элементарный путь, пройденный молекулой газа в температуроповышающем материале;  $\Delta L_3$  – элементарный путь, пройденный молекулой газа после выхода из температуроповышающего материала

При прохождении воздушного потока через «лабиринт» пористого материала пройденный путь молекул воздуха  $\Delta L_2$  будет больше элементарной длины  $\Delta l_2$ .

$$\Delta l_1 = \Delta L_1, \quad (1)$$

где  $\Delta l_2 \neq \Delta L_2$ , т. е.  $\Delta l_2 < \Delta L_2$ .

Концентрация составляющих газов воздуха в газовоздушной смеси перед температуроповышающим элементом, в нем и после него будет одинаковой. То есть выполняется условие

$$N = N_0. \quad (2)$$

Характер массопереноса в элементарных объемах  $\Delta V_1$ ,  $\Delta V_2$  и  $\Delta V_3$  будет отличаться временем прохождения молекул газа и его трением в температуроповышающем материале о стенки материала. При этом значения коэффициента диффузии  $D_1$ ,  $D_2$  и  $D_3$  в обоих случаях, при прочих равных условиях, будут также различны исходя из температуры теплоносителя.

Тогда, в соответствии с этим будет выполняться условие

$$D_1 T_1 = D_2 T_2 \quad (3)$$

## ДИФфуЗИЯ ГАЗОВОЗДУШНОГО ПОТОКА ЧЕРЕЗ ЧАСТИЧНО-ПРОНИЦАЕМЫЕ МЕМБРАНЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ

или

$$\tau_{1 \times} \exp(-A/RT_1) = \tau_{2 \times} \exp(-A/RT_2) \quad (4)$$

Отсюда следует, что при увеличении температуры  $T$  теплоносителя значения коэффициента диффузии  $D$  снижается и наоборот. То есть, для заданных условий выполняется условие

$$\begin{cases} T_{\max}, \tau_{\min}; \\ T_{\min}, \tau_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

Создание общей модели, проходящих процессов, является сложным и громоздким. Поэтому возникает необходимость объединить часть связанных между собой явлений. Решение известного уравнения  $D = D_0 \exp(-A/RT)$  принимает различный вид в зависимости от начальных и граничных условий. Этот случай обычно реализуется при исследовании диффузии атомов из газовой фазы или из нанесенного на поверхность образца толстого слоя, когда на границе образца в течение всего постоянной диффузии поддерживается постоянная концентрация газа.

При рассмотрении уравнения второго закона Фика имеем следующее [1]:

$$N(z, \tau) = N_0 \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{z}{2\sqrt{D \cdot \tau}} \right) \right], \quad (6)$$

где  $N_0$  – начальная концентрация атомов в металле;

$N(z, \tau)$  – концентрация диффундирующих атомов;

$z$  – ширина диффундирующего слоя;

$\tau$  – время диффузии;

$D$  – коэффициент диффузии;

$\operatorname{erf}$  – функция ошибок Гаусса, которая определяется выражением

$$\operatorname{erf}U = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^U \exp(-v^2) dv. \quad (7)$$

Выражение (7) можно представить в виде дополнительной функции ошибок  $\operatorname{erfc}$ , где

$$\operatorname{erfc}U = 1 - \operatorname{erf}U. \quad (8)$$

Тогда

$$N(z, \tau) = N_0 \cdot \operatorname{erfc} \left( \frac{z}{2\sqrt{D \cdot \tau}} \right). \quad (9)$$

Время диффузии  $\tau$  атомов определяется периодом действия внешних сил, когда поток диффундирующих элементарных частиц наибольший. Ширина диффундирующего слоя определяется размером температуроповышающего элемента. То есть, исходя из данного математического описания диффузии, время диффузии или массопереноса частиц воздуха на некоторой длине  $\Delta L$  до

температуроповышающего материала и в нем будет одинаковым.

Во-первых, при прохождении воздушного потока через «лабиринт» пористого материала пройденный путь молекул воздуха будет больше элементарной длины. Во-вторых, концентрация составляющих газов воздуха в газовой смеси перед температуроповышающим элементом, в нем и после него будет одинаковой. То есть выполняется условие равенства концентраций  $N = N_0$ .

Общий вид экспериментальной установки отличается достаточной простотой [3]. Повышение температуры воздуха в помещениях основано на физико-химическом явлении, сущность которого заключается в прохождении воздуха через вещество в виде температуроповышающего элемента. Устройство работает в различном диапазоне температур, при которых осуществляется процесс нагревания жилых или нежилых помещений, отличается высоким быстродействием и низкой погрешностью измерений. В качестве материалов, используемых в ходе эксперимента, были выбраны различные волокна для определения наиболее оптимальных для применения в качестве температуроповышающих элементов.

Одной из наиболее ярких представительниц при проведении экспериментальных исследований применялась ткань костюмная шерстяная толщиной около 0,5 мм. Начальная температура воздуха в помещении, где проводились исследования, на данный момент, составила 18,2 °С. Перед оценкой влияния материала, его характеристик и толщины на изменение температуры газовой среды, в течение 3 минут осуществлялась работа компрессора на холостом ходу для стабилизации подаваемого воздуха на выход из установки.

Представленные данные показывают, что причиной повышения температуры газа (газовоздушной среды, газообразного теплоносителя, воздуха и т. д.) является прохождение его в температуроповышающем элементе (пористом или тканевом материале) вследствие увеличения скорости диффузии и внешнего воздействия, заключающегося в трении о стенки материала и друг с другом газовых молекул.

Использование разработанного и устройства, реализующего данный способ, в системах повышения температуры теплоносителей позволяет решить проблему снижения энергозатрат. Проведенные эксперименты показывают, что снижение энергозатрат

осуществляется путем применения энергоэффективной и энергосберегающей технологии путем применения температуроповышающих элементов.

#### Список литературы

1. Дараселия, Н.В. Газоаналитическое отображение физико-химических явлений в производственных процессах / Н.В. Дараселия, И.В. Швецов. - Великий Новгород.: НовГУ, 2012. – 112 с.

2. Дараселия, Н.В. Газоаналитическое отображение явлений в производственных процессах / Н.В. Дараселия, И.В. Швецов. - М.: ИНФРА-М (Научная мысль), 2013. – 92 с.

3. Дараселия Н.В., Хисамов Р.И., Швецов И.В., Швецова С.А. Патент №113339 Российской Федерации. МПК7 F24D 13/00. Устройство для повышения температуры теплоносителей.; заявитель и патентообладатель Новгород. гос. ун-тет им. Ярослава Мудрого. № 2010127382/03; заявл. 02.07.2010; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 2. 3 с.

4. Дараселия, Н.В. Контроль концентрации газов и температуры в газовой среде / Н.В. Дараселия, И.В. Швецов // Модернизация АПК – механизмы взаимодействия государства, бизнеса и науки: материалы Междунар. агропромышленного конгресса. - СПб., 2011. - С. 47.

5. Дараселия, Н.В. Определение температуры в газовой среде по концентрации газов / Н.В. Дараселия, И.В. Швецов // Фундаментальные исследования в области технологий двойного назначения: материалы Рос. науч.-техн. конф. Комсомольск-на-Амуре, 2011. - С. 143–144.

6. Дараселия, Н.В. Повышение эффективности энергопотребления в системах теплоснабжения на основе повышения температуры теплоносителей / Н.В. Дараселия, А.А. Плужников, И.В. Швецов // Научно-техническая конференция «Энергетическая эффективность теплосиловых и теплогенерирующих установок» в рамках международной специализированной выставки «Энергетика и электротехника», г. Санкт-Петербург, Ленэкспо, 22-25 мая 2012г. - С.209-212.

7. Дараселия, Н.В. Эффективность систем тепловентиляции при увеличении температуры теплоносителей / Н.В. Дараселия, А.А. Плужников, И.В. Швецов // Материалы Всероссийской молодежной конференции. «Пути совершенствования работы теплоэнергетических устройств». 28-29 мая 2012 года. Дальневосточный федеральный университет, г.Владивосток. - С.110-114.

8. N. V. Daraseliya, A. A. Pluzhnikov, and I. V. Shvetsov. Determining the Temperature and Gas Concentration in a Gas–Air Mixture. ISSN 1068\_798X, Russian Engineering Research, 2013, Vol. 33, No. 2, pp. 63–64.

**Плужников А. А.**

**Швецов И. В.**

**Швецова О. И.**

*ФГБОУ ВО «Новгородский государственный университет им. Ярослава Мудрого», г. Великий Новгород, Россия*