

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОПРИТОКОВ В КАМЕРЫ ХОЛОДИЛЬНОЙ МАШИНЫ

### MATHEMATICAL MODEL OF HEAT LEAKAGE IN CAMERA OF REFRIGERATOR

Ю.Г. ФОМИН, С.П. ПЕТРОСОВ, М.А. ЛЕМЕШКО, А.В. КОЖЕМЯЧЕНКО, И.Я. ДОНЧЕНКО  
YU.G. FOMIN, S.P. PETROSOV, M.A. LEMESHKO, A.V. KOZHEMYACHENKO, I.YA. DONCHENKO

(Ивановский государственный политехнический университет. Текстильный институт,  
Институт сферы обслуживания и предпринимательства (филиал)  
Донского государственного технического университета, г. Шахты)  
(Ivanovo State Polytechnical University. Textile Institute,  
Institute of the Service Sector and Businesses (branch)  
Don State Technical University, Shakhty)  
E-mail: ttp@ivgpu.com

*Модернизация и совершенствование холодильных машин включают задачи энергосбережения при их эксплуатации. Энергопотребление холодильных компрессионных машин, наряду с другими эксплуатационными факторами, зависит от теплообменных и массообменных процессов внутренних камер с окружающей средой. В статье изложен подход к описанию процесса движения охлажденного воздуха из камеры холодильной машины, приведены основные допущения, необходимые для построения математической модели, изложена методика получения математических зависимостей для расчета параметров движения потока охлажденного воздуха и теплопритоков.*

*Modernization and improvement of refrigerators include the problems of energy saving during operation. Power compression-governmental refrigerators, along with other operational factors, depends on heat and mass transfer processes internal chambers with ambient environment. This paper describes the approach to the description of the process of movement of cooled air from the chamber of the refrigerator, the basic assumptions needed to construct the mathematical model, the technique of obtaining mathematical dependencies for RAS couple of options flow of chilled air and heat leakage.*

**Ключевые слова:** теплопритоки, математическая модель, холодильная машина, скорость движения воздуха.

**Keywords:** heat gains mathematical model, refrigerator, speed of air movement.

В процессе эксплуатации компрессионная холодильная машина испытывает воздействие различных факторов, влияющих на ее текущее энергопотребление. К таким факторам относятся: температура окружающего воздуха, физико-химическая стабильность рабочей среды, надежность и

стабильность уплотнений между дверью и шкафом холодильной машины и др. [1].

Представляет интерес вопрос разработки математической модели свободного истечения холодного воздуха из шкафа холодильной камеры при открывании ее дверей [2].

Относительно теплый воздух, окружающий холодильный прибор, имеет меньшую плотность, чем плотность воздуха, охлажденного в морозильном или холодильном отделении, что и обуславливает истечение охлажденного воздуха из холодильного шкафа. По существу происходит замещение охлажденного воздуха более теплым [3].

Определив значение и характер изменения скоростей истечения охлажденного воздуха в текущем времени за период нахождения двери холодильного шкафа в открытом состоянии, можно определить объем замещенного воздуха и, следовательно, необходимые энергозатраты для восстановления температуры в охлаждаемом отделении. Для этого решена задача

$$\left. \begin{aligned} \rho \frac{du}{dt} &= \rho F_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \mu \frac{\partial}{\partial x} (\operatorname{div} \bar{V}) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} (\mu \cdot \operatorname{div} \bar{V}), \\ \rho \frac{dv}{dt} &= \rho F_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \mu \frac{\partial}{\partial y} (\operatorname{div} \bar{V}) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} (\mu \cdot \operatorname{div} \bar{V}), \\ \rho \frac{dw}{dt} &= \rho F_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \mu \frac{\partial}{\partial z} (\operatorname{div} \bar{V}) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} (\mu \cdot \operatorname{div} \bar{V}). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Здесь  $u, v, w$  – проекции вектора скорости  $\bar{V}$  на оси  $Ox, Oy, Oz$ ;  $\bar{F} = (F_x; F_y; F_z)$  – вектор внешних объемных сил, действующих на газ в каждой точке пространства;  $\mu$  – коэффициент динамической вязкости;

$$\operatorname{div} \bar{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}. \quad (3)$$

3). При моделировании принимаем допущение, что исследуемый воздух – газ совершенен, то есть давление  $p$ , плотность  $\rho$  и абсолютная температура  $T$  удовлетворяют уравнению состояния закона Менделеева-Клапейрона:

$$p = \frac{\rho R_0 T}{m}, \quad (4)$$

где  $R_0$  – универсальная газовая постоянная;  $m$  – молекулярная масса газа.

анализа скоростей движения потока охлажденного воздуха при открывании дверей камеры холодильной машины [4].

Рассмотрим общие закономерности, присущие рассматриваемой физической модели, описанные в работе [5]. В основу изучения движения вязкого газа положим следующие подходы.

1). Процесс характеризуется уравнением неразрывности движения [6]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0. \quad (1)$$

2). В основу анализа процесса положены уравнения Навье-Стокса динамики вязкого газа, отнесенные к единице массы [7]:

4). Коэффициент удельной теплоемкости  $c$  не зависит от абсолютной температуры газа и является его физической константой.

5). При истечении газа учитывается только вязкость первого рода (сопротивление окружающего теплого воздуха потоку холодного воздуха). Коэффициент теплопроводности газа  $\lambda$  пропорционален коэффициенту динамической вязкости  $\mu$ , то есть выполняется критерий Прандтля:

$$\frac{\mu c}{\lambda} = \sigma = \text{const}. \quad (5)$$

Полагаем, что внешние силы на воздушный поток внутри холодильной машины не влияют. Для данной модели можно рассмотреть допущение:

$$F_x = 0; F_y = 0; F_z = -mg, \quad (6)$$

где  $g$  – ускорение силы тяжести.

Поскольку воздушный поток предполагается несжимаемым, то

$$\operatorname{div} \bar{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} \equiv 0. \quad (7)$$

Допуская, что истечение холодного воздуха из шкафа происходит без изменения в горизонтальном поперечном направлении, то есть что ординаты траекторий движения воздушных струй постоянны и изменение геометрии потока происходит только в плоскости XOZ, система (7) упрощается и будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} \left( \frac{\partial u}{\partial x} u + \frac{\partial u}{\partial z} w \right) &= \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right), \\ \left( \frac{\partial w}{\partial x} u + \frac{\partial w}{\partial z} w \right) &= mg + \frac{\mu}{\rho} \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right). \end{aligned} \right\} (8)$$

$$u(x, z) = \frac{e^{-x}}{C_3 + \frac{\mu k - \rho}{2\rho C_2} \int_0^z \sqrt{mg\rho + C_1 \mu k e^{-\frac{2\mu kt}{\rho}} e^{-\frac{2\mu kt}{\rho}}} dt}, \quad (10)$$

$$w(x, z) = \sqrt{\frac{mg\rho}{\mu k} + C_1 e^{-\frac{2\mu kz}{\rho}}} + \frac{C_2 e^{-\frac{2\mu kz}{\rho}} e^{-x}}{\sqrt{mg\rho + C_1 \mu k e^{-\frac{2\mu kz}{\rho}}}}. \quad (11)$$

Полученные математические выражения позволяют вычислять проекции скорости потока охлажденного воздуха и, следовательно, теплопритоки при открывании дверей камер холодильной машины. Опытным путем выполнено измерение скорости потока охлажденного воздуха для регламентированных условий. Рассогласование значений скоростей потока в эксперименте и полученных по формулам (10), (11) не превышает 10%. Сведения о теплопритоках в камеры холодильника используются при разработке новых технологий повышения энергетической эффективности компрессионных холодильных машин.

Так как система (8) содержит два уравнения и две неизвестные функции, то она является замкнутой. Далее систему (8) можно привести к виду, удобному для дальнейшего анализа:

$$\left. \begin{aligned} \left( \frac{\partial u}{\partial x} u + \frac{\partial u}{\partial z} w \right) &= -\frac{\mu k}{\rho} u^2, \\ \left( \frac{\partial w}{\partial x} u + \frac{\partial w}{\partial z} w \right) &= mg - \frac{\mu k}{\rho} w^2. \end{aligned} \right\} (9)$$

Система (9) является базовой для нахождения скоростей потока при его свободном истечении из холодильной камеры в стационарном режиме. Решение этой системы позволяет вычислять проекции вектора потока воздуха из камер холодильника.

Из системы (9) получены выражения модельной функции  $u(x, z)$ :

## ВЫВОДЫ

1. Для описания процесса формирования теплопритоков в камеры холодильной машины при открывании ее дверей приняты обоснованные допущения.

2. Методом анализа процесса движения охлажденного воздуха из камеры холодильной машины в окружающий воздух трехмерная модель, описывающая движение воздуха, переведена в двумерную модель.

3. Полученные математические выражения позволяют вычислять проекции скорости потока охлажденного воздуха, следовательно, и теплопритоки при открывании дверей камер холодильной машины.

1. Петросов С.П., Кожемьяченко А.В. Результаты испытаний агрегата бытового холодильного прибора в условиях воздействия эксплуатационных факторов // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2006. Прил. к № 9. С.107...110.

2. Dating R.O. Refrigerants: Service Pointers. – Refrigeration Service and Contracting. –V. 39, 1971. № 10. P. 38, 40...41.

3. Lemeshko M.A., Duvanskaya E.V., Petrosov S.P., Kohanenko V.N. Mathematical Model of Refrigerated Air from the Fridge Speed Calculation // World Applied Sciences Journal. – 30(9), 2014, 1145-1151.

4. Лемешко М.А., Лалетин И.В., Мицик М.Ф. Определение скоростей движения охлажденного воздуха при открывании дверей шкафа бытового холодильного прибора [Электронный ресурс] // "Инженерный вестник Дона", 2011, № 4. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011>

5. Лемешко М.А., Мицик М.Ф. Математическая модель свободного истечения охлажденного воздуха из камеры бытового холодильного прибора // Изв. вузов. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2013, № 4 (173). С. 16...18.

6. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа. – 5-е изд. – М.: Наука, 1978.

7. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров. – М.: Наука, 1970.

1. Petrosov S.P., Kozhemjachenko A.V. Rezul'taty ispytaniy agregata bytovogo holodil'nogo pribora v uslovijah vozdejstvija jekspluatacionnyh faktorov // Izv. vuzov. Severo-Kavkazskij region. Serija: Tehnicheskie nauki. – 2006. Pril. k № 9. S.107...110.

2. Dating R.O. Refrigerants: Service Pointers. – Refrigeration Service and Contracting. –V. 39, 1971. № 10. R. 38, 40...41.

3. Lemeshko M.A., Duvanskaya E.V., Petrosov S.P., Kohanenko V.N. Mathematical Model of Refrigerated Air from the Fridge Speed Calculation // World Applied Sciences Journal. – 30(9), 2014, 1145-1151.

4. Lemeshko M.A., Laletin I.V., Micik M.F. Opredelenie skorostej dvizhenija ohlazhdennogo vozduha pri otkryvanii dverej shkafa bytovogo holodil'nogo pribora [Jelektronnyj resurs] // "Inzhenernyj vestnik Dona", 2011, № 4. – Rezhim dostupa: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2011>

5. Lemeshko M.A., Micik M.F. Matematicheskaja model' svobodnogo istechenija ohlazhdennogo vozduha iz kamery bytovogo holodil'nogo pribora // Izv. vuzov. Severo-Kavkazskij region. Serija: Tehnicheskie nauki. – 2013, № 4 (173). S. 16...18.

6. Lojtcjanskij L.G. Mehanika zhidkosti i gaza. – 5-e izd. – М.: Nauka, 1978.

7. Korn G., Korn T. Spravochnik po matematike dlja nauchnyh rabotnikov i inzhenerov. – М.: Nauka, 1970.

Рекомендована кафедрой технологических машин и оборудования ТИ ИВГПУ. Поступила 24.11.14.