



УДК 532.542

А.А. Багаев, С.О. Бобровский  
A.A. Bagaev, S.O. Bobrovskiy

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ОРГАНИЗАЦИИ ТУРБУЛЕНТНОГО РЕЖИМА ТЕЧЕНИЯ  
НАГРЕВАЕМОЙ СРЕДЫ В КАНАЛАХ СИСТЕМЫ  
«ТРУБА С ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ ТЕПЛОТЫ – ТРУБА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ»**

**ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF ORGANIZING A TURBULENT FLOW REGIME  
OF THE HEATED MEDIUM IN THE CHANNELS OF THE SYSTEM  
«PIPE WITH INTERNAL HEAT SOURCES – DIELECTRIC PIPE»**

**Ключевые слова:** нагрев среды, режимы движения жидкости, критерий Рейнольдса, скорость нагреваемой среды, массовый расход.

Электроконтактный нагрев сопротивления широко используется в сельском хозяйстве для нагрева воды и воздуха. При этом нагревательный элемент является сопротивлением электрической цепи, тепловая энергия в котором выделяется в соответствии с законом Джоуля-Ленца. Нагрев текучей среды осуществляется за счет теплопередачи или конвекции. Подобный нагреватель относится к нагревательным элементам с внутренним источником тепловой энергии. Рассмотрен случай, когда нагревательный элемент сопротивления в виде трубы помещен во внешнюю трубу из диэлектрического материала большего диаметра и омывается потоком нагреваемой средой с внутренней и внешней поверхности. Показано, что в случае использования единственного обеспечивающего напор источника турбулентный режим течения нагреваемой среды в центральном внутреннем и кольцевом внешнем каналах одновременно организован быть не может. При этом турбулентный режим наблюдается во внутреннем цилиндрическом канале, а во внешнем кольцевом – ламинарный. Для реализации требуемого турбулентного режима течения в кольцевом канале следует увеличить скорость нагреваемой среды. Для этого следует применить

раздельные для кольцевого и центрального каналов движущие силы массопереноса.

**Keywords:** heating the medium, modes of the liquid motion, the Reynolds criterion, speed of the heated medium, mass flow rate.

Electric contact resistance heating is widely used in agriculture to heat water and air. In this case, the heating element is the resistance of an electrical circuit, the thermal energy in which is released in accordance with the Joule-Lenz law. The fluid is heated by heat transfer or convection. Such a heater refers to heating elements with an internal source of thermal energy. The case is considered when a resistance heating element in the form of a pipe is placed in an external pipe made of a dielectric material of a larger diameter and is washed by the flow of the heated medium from the inner and outer surfaces. It is shown that in the case of using a single source providing a head, the turbulent flow regime of the heated medium in the central internal and annular external channels cannot be organized simultaneously. In this case, the turbulent regime is observed in the inner cylindrical channel, and the laminar one can be found in the outer annular channel. To implement the required turbulent flow regime in the annular channel, it is necessary to increase the speed of the heated medium. To do this, the driving forces of mass transfer should be applied separately for the ring and central channels.

**Багаев Андрей Алексеевич**, д.т.н., профессор, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: [Bagaev710@mail.ru](mailto:Bagaev710@mail.ru).

**Бобровский Сергей Олегович**, ассистент, аспирант, ФГБОУ ВО Алтайский ГАУ, г. Барнаул, Российская Федерация, e-mail: [sergej.bobrovskij.95@mail.ru](mailto:sergej.bobrovskij.95@mail.ru).

**Bagayev Andrey Alekseyevich**, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: [bagaev710@mail.ru](mailto:bagaev710@mail.ru).

**Bobrovsky Sergey Olegovich**, post-graduate student, Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation, e-mail: [sergej.bobrovskij.95@mail.ru](mailto:sergej.bobrovskij.95@mail.ru).

### Введение

Для нагрева газообразных и жидких сред в сельском хозяйстве широко применяется косвенный электрический нагрев сопротивлением [1, 2]. При данном способе нагрев среды осуществляется за счет теплопроводности, конвекции или излучения от специальных нагревательных элементов при протекании по ним электрического тока. Количество теплоты, выделяемое в нагревательном элементе, описывается законом Джоуля-Ленца.

Описанную систему можно отнести к нагревателям с наличием внутренних источников теплоты [3].

Одной из возможных форм исполнения нагревателей подобного рода является труба, подключенная к источнику напряжения и помещенная в нагреваемую газообразную или жидкую среду. Нагреваемая среда может находиться как в неподвижном объеме (в этом случае нагреватель называется непроточным), так и в состоянии движущегося потока (проточный нагреватель). В данной работе исследованию подлежит второй вариант с конвективной теплоотдачей. Рассмотренный способ нагрева относится к косвенным [1].

На рисунке представлено устройство нагревательного элемента типа «полая труба в диэлектрической трубе» и схема его подключения.

При расчете подобных устройств исходными данными являются массовый расход нагреваемой среды (производительность)  $G$ , кг/с, температура среды на входе  $T_{вх}$ , °С и на выходе  $T_{вых}$ , °С.

Вместе с тем нагревательный элемент диаметром  $d$  и диэлектрическая труба диаметром  $D$  образуют два канала для протекающей нагреваемой среды: цилиндрический внутрен-

ним диаметром  $d$  и кольцевой с эквивалентным диаметром  $d_э = D - d$ .

Различные значения диаметров центрального цилиндрического и кольцевого каналов определяют различие в массовом расходе нагреваемой среды, проходящей через цилиндрический канал  $G_1$ , кг/с, и кольцевой  $G_2$ , кг/с [4]:

$$G_1 = \frac{\pi}{4} d^2 \omega_1 \rho; \quad (1)$$

$$G_2 = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \omega_2 \rho, \quad (2)$$

где  $\omega_1$  – скорость нагреваемой среды в цилиндрическом канале, м/с;

$\omega_2$  – скорость нагреваемой среды в кольцевом канале, м/с;

$\rho$  – плотность нагреваемой среды, кг/м<sup>3</sup>.

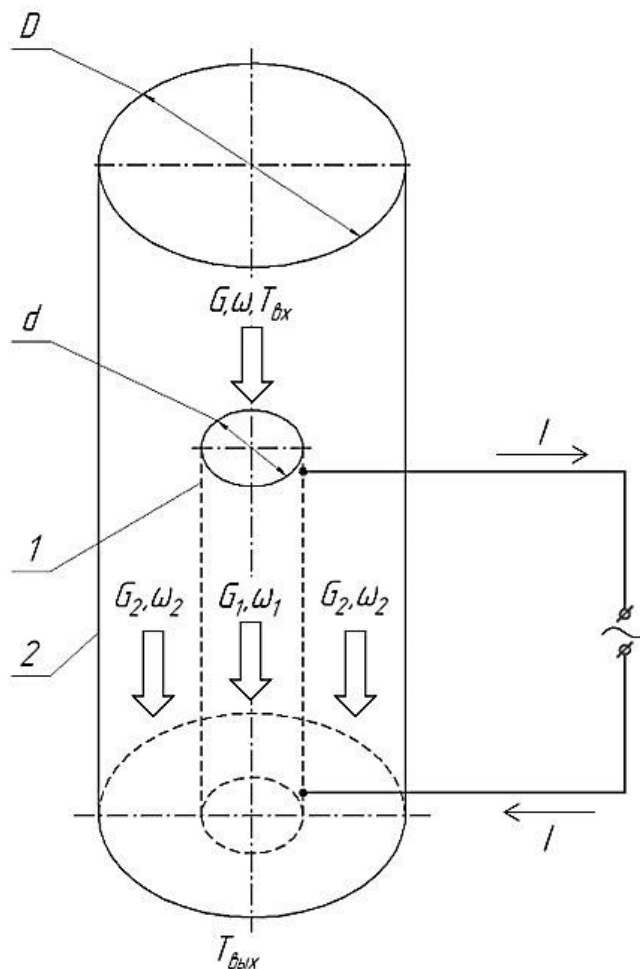
Для рассматриваемой системы (рис.) справедлив принцип «сплошности потока» [1], являющийся аналогом 1 закона Кирхгофа для электрических цепей [5], в соответствии с которым алгебраическая сумма расходов жидкости в узле равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n G_i - G = 0, \quad (3)$$

где  $n$  – число каналов.

Для интенсификации процесса нагрева и обеспечения его термической однородности на выходе целесообразно придать потоку нагреваемой среды турбулентный характер.

Известно [4], что основные взаимосвязанные термо- и гидродинамические характеристики, включая распределение температурных полей вдоль нагревательного элемента и режимы течения жидкости, определяются геометрическими и конструктивными параметрами нагревателя.



**Рис. Устройство нагревательного элемента типа «полая труба в диэлектрической трубе» и схема его подключения:**

**1 – трубчатый нагревательный элемент сопротивления диаметром  $d$ , м;  
2 – диэлектрическая труба диаметром  $D$ , м;  $\omega$  – скорость потока нагреваемой среды, м/с**

В научной и учебной литературе [4] приводятся основные закономерности и методики расчета гидродинамических и теплообменных характеристик систем «труба в трубе» для случая, когда каждый из каналов, образованных трубами разного диаметра, имеет собственную движущую силу переноса нагревательной и нагреваемой сред.

Система, представленная на рисунке, обладает лишь одним источником текучей нагреваемой среды и анализа гидравлических процессов в научно-технической литературе не нашла.

**Целью** работы является обоснование условия, при котором в каналах системы «труба в трубе» режим течения нагреваемой среды обладает свойством турбулентности.

### Методы исследования

Используются основные положения гидравлики.

### Результаты исследования

Выражения (1) и (2) позволяют определить скорость нагреваемой среды в цилиндрическом  $\omega_1$  и кольцевом каналах  $\omega_2$ , выраженные через соответствующие массовые расходы нагреваемой среды  $G_1$  и  $G_2$ :

$$\omega_1 = \frac{4G_1}{\rho\pi d^2}; \quad (4)$$

$$\omega_2 = \frac{4G_2}{\rho\pi(D^2 - d^2)}. \quad (5)$$

Учитывая параллельность осей центрального и кольцевого каналов системы на рисунке, введем следующие допущения:

- удельные потенциальные энергии давле-

$$\text{ния } z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g},$$

где  $z_{1,2}$  – удельная потенциальная энергия положения;

$p_{1,2}$  – гидростатические давления в каналах равны;

- равны коэффициенты кинетической энергии (коэффициенты Кориолиса)  $\alpha_1 = \alpha_2 \approx 1$ ;

- одинаковы длины каналов  $l_1 = l_2$  и коэффициенты гидравлического трения  $\lambda_1 = \lambda_2 \approx 1$ .

С учетом сделанных допущений формула Дарси для напора принимает следующий вид [6, 7]:

$$\frac{\omega_1^2}{d} = \frac{\omega_2^2}{D-d}. \quad (6)$$

Решением (6) относительно скорости нагреваемой среды в центральном канале  $\omega_1$  является

$$\omega_1 = \omega_2 \sqrt{\frac{d}{D-d}}. \quad (7)$$

Подставляя (7) в выражение (1), получим расход нагреваемой среды  $G_1$  в центральном канале диаметром  $d$ :

$$G_1 = \frac{\pi}{4} d^2 \omega_2 \rho \sqrt{\frac{d}{D-d}}. \quad (8)$$

Последующая подстановка (8) в (3) позволила получить выражение для  $\omega_2$

$$\omega_2 = \frac{G}{\frac{\pi}{4} \rho \left( d^2 \sqrt{\frac{d}{D-d}} + D^2 - d^2 \right) \cdot 3600} = A \quad (9)$$

и как следствие из выражения (7) для скорости  $\omega_1$

$$\omega_1 = A \sqrt{\frac{d}{D-d}}. \quad (10)$$

По известным скоростям нагреваемой среды  $\omega_1$  и  $\omega_2$  по формулам (1) и (2) определяются соответствующие массовые расходы в каналах:

$$G_1 = \frac{\pi}{4} d^2 \rho A \sqrt{\frac{d}{D-d}}; \quad (11)$$

$$G_2 = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \rho A. \quad (12)$$

В качестве примера рассмотрим систему, характеризующуюся следующими параметрами: диаметр внешней трубы  $D = 0,048$  м, диаметр внутренней трубы  $d = 0,035$  м, исходный расход нагреваемой среды, подаваемой в трубу  $D$ ,  $G = 1000$  кг/ч =  $0,27$  кг/с.

Результатом расчета с использованием формул (9)-(12) является  $\omega_1 = 0,18$  м/с;  $\omega_2 = 0,109$  м/с;  $G_1 = 0,17$  кг/с;  $G_2 = 0,095$  кг/с.

В качестве проверки воспользуемся уравнением «неразрывности потоков» [7]:

$$G_1 = \omega_1 \frac{d^2}{4} = 0,000173 \text{ м}^3/\text{с} = 0,17 \text{ кг/ч};$$

$$G_2 = \omega_2 \frac{(D^2 - d^2)}{4} = 0,000094 \text{ м}^3/\text{с} = 0,094 \text{ кг/ч};$$

$$G = G_1 + G_2 = 0,000267 \text{ м}^3/\text{с} = 0,27 \text{ кг/ч}.$$

Проверка показала справедливость выдвинутых предположений и произведенных на их основе расчетов.

Оценим значения критерия Рейнольдса при течении нагреваемой среды в каналах устройства, образованных токопроводящей трубой с внутренним диаметром  $d$ , и кольцевом канале, образованном разностью диаметров диэлектрической трубы  $D$  и трубы с диаметром  $d$  (рис.), а также с использованием параметров найденных выше.

Критерий Рейнольдса для потока нагреваемой среды в центральном цилиндрическом канале диаметром  $d$ :

$$\text{Re}_1 = \frac{\omega_1 d_1}{\nu}, \quad (13)$$

где  $\nu$  – кинематическая вязкость нагреваемой среды, м<sup>2</sup>/с.

Критерий Рейнольдса для потока нагреваемой среды в кольцевом канале эквивалентным диаметром  $(D-d)$

$$\text{Re}_2 = \frac{\omega_2 (D-d)}{\nu}. \quad (14)$$

Используя исходные данные для расчета (диаметры  $D$ ,  $d$ , коэффициент вязкости нагре-

ваемой среды  $\nu = 1,145 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ ), получены следующие результаты:

$$\text{Re}_1 = 5500 > 2320, \quad (15)$$

$$\text{Re}_2 = 1230 < 2320. \quad (16)$$

Анализ полученных значений критерия Рейнольдса позволяет утверждать, что в канале диаметром  $d$  наблюдается турбулентный режим течения, а в кольцевом канале диаметром  $(D - d)$  – ламинарный [7].

Ламинарный ( $\text{Re} < 2320$ ) и турбулентный ( $\text{Re} > 2320$ ) режимы в рамках рассматриваемой проблемы отличаются тем, что при ламинарном режиме движения скорость частиц жидкости не велика, и она движется слоями, без поперечного перемещения частиц и перемешивания жидкости. При турбулентном режиме движения частицы жидкости перемешиваются между собой и движутся беспорядочно, что интенсифицирует процесс теплопередачи между греющей поверхностью и нагреваемой средой, обеспечивая тем самым более равномерный нагрев слоев среды.

Проверим условие обеспечения турбулентного режима течения в каналах нагревательного элемента, решив следующую систему уравнений, составленную с использованием критерияльных выражений Рейнольдса для внутреннего цилиндрического и внешнего кольцевого каналов системы, представленной на рисунке, а также с использованием уравнения Дарси (6):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Re}_1 = \frac{\omega_1 d_1}{\nu} > 2320 \\ \text{Re}_2 = \frac{\omega_2 d_2}{\nu} > 2320. \\ \omega_1 = \omega_2 \sqrt{\frac{d}{D-d}} \end{array} \right. \quad (17)$$

Решением системы уравнений (17) относительно диаметра  $D$  при известных  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $d$  и  $\nu$  является равенство  $D = d$ , что в предположении двухсторонней теплопередачи от внутренней и внешней стенок трубы-нагревателя  $d$  является неприемлемым. Аналогичное решение получено при использовании в системе (17) уравнения неразрывности потока.

## Выводы

В нагревательном элементе типа «труба с внутренними источниками теплоты в трубе», к классу которых может быть отнесен элемент, являющийся элементом электрической цепи, и образующим центральный цилиндрический канал диаметром равным диаметру токопроводящей трубы и кольцевой канал диаметром равном разности диаметров внешней диэлектрической трубы и внутренней токопроводящей трубы обеспечить турбулентный режим течения нагреваемой среды не представляется возможным. Расчетом установлено, что во внутреннем цилиндрическом канале скорость и диаметр канала обеспечивают турбулентность, а в кольцевом – ламинарный. Проверка показала, что турбулентный режим в кольцевом канале исходной гидравлической схемы за счет изменения диаметра внешней диэлектрической трубы обеспечен быть не может. Для реализации требуемого турбулентного режима течения в кольцевом канале следует увеличить скорость нагреваемой среды. Для этого следует применить отдельные для кольцевого и центрального каналов движущие силы массопереноса.

## Библиографический список

1. Багаев, А. А. Электротехнология: учебное пособие / А. А. Багаев, А. И. Багаев, Л. В. Куликова. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2006. – 320 с. – Текст: непосредственный.
2. Багаев, А. А. Сравнительный анализ установок для термической обработки молока / А. А. Багаев, С. О. Бобровский. – Текст: непосредственный // Аграрная наука – сельскому хозяйству: сборник материалов: в 2 книгах: XV Международная научно-практическая конференция. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2020. – Кн. 2. – С. 8-11.
3. Теория тепломассообмена: учебник для вузов / С.И. Исаев [и др.]; под редакцией А. И. Леонтьева. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. – 462, [2] с.: ил. – Текст: непосредственный.
4. Краснощеков, Е. А. Задачник по теплопередаче: учебное пособие для вузов /

Е. А. Краснощеков, А. С. Сукомел. – 4-е изд., перераб. – Москва: Энергия, 1980. – 288 с.: ил. – Текст: непосредственный.

5. Теоретические основы электротехники: учебное пособие для технических вузов / А. А. Багаев, Л. В. Куликова, Э. В. Кузьмин [и др.]; под общей редакцией О. К. Никольского. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2000. – 772 с.: ил. – Текст: непосредственный.

6. Кудинов, В. А. Гидравлика: учебное пособие / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, 2007. – 199 с. – Текст: непосредственный.

7. Вихарев, А. Н. Гидравлика. Режимы движения, уравнение Бернулли, потери напора, каналы: учебное пособие / А. Н. Вихарев, И. И. Долгова. – Архангельск: Изд-во АГТУ, 2001. – 92 с. – Текст: непосредственный.

#### References

1. Bagaev A.A. Elektrotekhnologiya: uchebnoe posobie / A.A. Bagaev, A.I. Bagaev, L.V. Kulikova. – Barnaul: Izd-vo AGAU, 2006. – 320 s.

2. Bagaev A.A., Bobrovskiy S.O. Sravnitel'nyy analiz ustanovok dlya termicheskoy obrabotki molo-  
loka // Agrarnaya nauka – sel'skomu hozyaystvu:

sb. materialov: v 2 kn. / XV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. – Barnaul: RIO Altayskogo GAU, 2020. – Kn. 2. – S. 8-11.

3. Teoriya teplomassoobmena: uchebnik dlya vuzov / [S.I. Isaev i dr.]; pod red. A.I. Leont'eva. – 3-e izd., ispr. i dop. – Moskva: Izdatel'stvo MGTU im. N.E. Baumana, 2018. – 462, [2] s.: il.

4. Krasnoshchekov E.A. Zadachnik po teploperedache: Uchebnoe posobie dlya vuzov / E.A. Krasnoshchekov, A.S. Sukomel. – 4-e izd., pererab. – M.: Energiya, 1980. – 288 s., il.

5. Teoreticheskie osnovy elektrotekhniki: Uchebnoe posobie dlya tekhnicheskikh vuzov / A.A. Bagaev, L.V. Kulikova, E.V. Kuz'min i dr.; Pod obshch. red. O.K. Nikol'skogo. – Barnaul: Izd-vo AGTU, 2000. – 772 s.: il.

6. Kudinov V.A. Gidravlika: Uchebnoe posobie / V.A. Kudinov, E.M. Kartashov. – 2-e izd., pererab. i dop. – M.: Vyssh. shk., 2007. – 199 s.

7. Viharev A.N. Gidravlika. Rezhimy dvizheniya, uravnenie Bernulli, poteri napora, kanaly: Uchebnoe posobie / A.N. Viharev, I.I. Dolgova. – Arhangel'sk: Izd-vo AGTU, 2001. – 92 s.

