



УДК 536.24

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

ПЛЕНОЧНЫЙ РЕЖИМ ИСТЕЧЕНИЯ ЖИДКОСТИ В СИСТЕМЕ «ТРУБА С ВНУТРЕННИМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛОТЫ – ЖИДКОСТЬ» КАК СРЕДСТВО ИНТЕНСИФИКАЦИИ ТЕПЛООБМЕНА

FILM MODE OF LIQUID OUTFLOW IN THE «PIPE WITH INTERNAL HEAT SOURCE – LIQUID» SYSTEM AS A MEANS OF HEAT EXCHANGE INTENSIFICATION

Ключевые слова: теплообмен, критерий Рейнольдса, турбулентный режим, число Прандтля, нагреваемая среда, число Нуссельта.

Косвенный электрический нагрев сопротивлением в сельском хозяйстве широко применяется для нагрева газообразных и жидких сред, например, воды и молока. Указанную систему можно отнести к нагревателям с наличием внутренних источников теплоты, когда тепловая энергия в нагревательном элементе выделяется при протекании электрического тока в соответствии с законом Джоуля-Ленца. Одной из проблем подобных систем является недостаточная интенсивность теплообменных процессов (невысокие значения критерия Рейнольдса, числа Нуссельта, коэффициента теплообмена, коэффициента теплопередачи), что связано с увеличением площади поверхности теплопередачи и значительными геометрическими размерами. В известной системе типа «труба с внутренним источником теплоты в диэлектрической трубе» трубы образуют 2 канала: центральный цилиндрический и кольцевой. В этой системе в центральном канале обеспечивается турбулентный режим течения нагреваемой среды, в кольцевом – ламинарный. Указанное обстоятельство не способствует интенсификации теплообмена и уменьшению геометрических размеров устройства. В связи с этим требуется поиск решений, обеспечивающих интенсификацию теплообмена. Установлено, что при одинаковом турбулентном режиме течения нагреваемой жидкости система «труба с внутренними источниками теплоты – пленка нагреваемой жидкости» обладает более высокими теплообменными характеристиками (увеличиваются численные значения критерия

Рейнольдса, числа Нуссельта, коэффициента теплообмена, коэффициента теплопередачи), меньшей площадью поверхности нагрева и числом труб теплообменника. Данная система может являться одним из средств интенсификации теплообмена в нагревательных устройствах. Применение пленочного истечения целесообразно при нагреве органических жидкостей, в процессе которого возможно разложение органических веществ. Аналогичные термические процессы следует осуществлять при малых значениях тепловых потоков и малого температурного напора.

Keywords: heat exchange, the Reynolds criterion, turbulent mode, Prandtle number, heated medium, Nusselt number.

Indirect electrical resistance heating is widely used to heat gaseous and liquid media, such as water and milk. This system can be attributed to heaters with the presence of internal heat sources, when the thermal energy in the heating element is released when an electric current flows in accordance with the Joule-Lenz law. One of the problems of such systems is the insufficient intensity of heat exchange processes (low values of the Reynolds criterion, the Nusselt number, the heat exchange coefficient, the heat transfer coefficient), which is associated with an increase in the heat transfer surface area and significant geometric dimensions. In the well-known system of the «pipe with an internal heat source in a dielectric pipe» type, the pipes form two channels: a central cylindrical channel and an annular channel. In this system, a turbulent flow of the heated medium is provided in the central channel, and a laminar flow is provided in the annular channel. This cir-

cumstance does not contribute to the intensification of heat exchange and the reduction of the geometric dimensions of the device. In this regard, it is necessary to search for solutions that ensure the intensification of heat exchange. It was determined that for the same turbulent flow regime of the heated liquid, the system «pipe with internal heat sources – the film of the heated liquid» has higher heat exchange characteristics (the numerical values of the Reynolds criterion, the Nusselt number, the heat transfer

coefficient, the heat transfer coefficient), a smaller heating surface area and the number of heat exchanger pipes. This system can be one of the means of intensifying heat transfer in heating devices. The use of film flow is advisable when heating organic liquids, during which the decomposition of organic substances is possible. Similar thermal processes should be carried out at low values of heat fluxes and low temperature pressure.

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

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

Bagayev Andrey Alekseyevich, Dr. Tech. Sci., Prof., Altai State Agricultural University, Barnaul, Russian Federation. e-mail: bagaev710@mail.ru.

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

Введение

Для нагрева газообразных и жидких сред в сельском хозяйстве широко применяется косвенный электрический нагрев сопротивлением [1, 2]. Описанную систему можно отнести к нагревателям с наличием внутренних источников теплоты [3]. Одной из проблем подобных систем является недостаточная интенсивность теплообменных процессов, что влечет за собой большую поверхность теплопередачи и, как следствие, значительные геометрические размеры.

В работе [4] рассмотрен нагревательный элемент типа «труба с внутренним источником теплоты в диэлектрической трубе». Указанные трубы образуют 2 канала: центральный – цилиндрический, диаметром, равным диаметру токопроводящей трубы, и кольцевой – диаметром, равном разности диаметров внешней диэлектрической трубы и внутренней токопроводящей трубы. В рассматриваемой системе турбулентный режим течения нагреваемой среды обеспечивается только в центральном канале, в кольцевом – ламинарный. Указанное обстоятельство не способствует интенсификации теплообмена и уменьшению геометрических размеров устройства.

В связи с этим поиск решений, обеспечивающих интенсификацию теплообмена, является актуальной задачей.

Цель – сравнительный анализ показателей интенсивности теплообмена в системах «труба – жидкость» и «труба – пленка жидкости».

В качестве методов исследования используются основные положения гидравлики и теплообмена.

Результаты исследования

Исходные данные: производительность $G = 1000 \text{ кг/ч} = 0,27 \text{ кг/с}$, температура стенки нагревательной трубы $t_c = 100^\circ\text{C}$, температура жидкости на входе $t' = 20^\circ\text{C}$, температура жидкости на выходе $t'' = 75^\circ\text{C}$, среднеарифметическая температура жидкости $t_{ж} = 47,5^\circ\text{C}$, при которой плотность жидкости $\rho_{ж} = 1010,5 \text{ кг/м}^3$, кинематический коэффициент вязкости жидкости $\nu = 1,145 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,58 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град.)}$, удельная теплоемкость $c = 3,97 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{град.)}$, число Прандтля $Pr = 6$, внутренний диаметр трубы $d = 0,017 \text{ м}$, длина трубы $l = 1 \text{ м}$.

Количество передаваемой теплоты:

$$Q = Gc(t'' - t') = 58,95 \text{ кВт}. \quad (1)$$

Система «труба с внутренними источниками теплоты – нагреваемая жидкость» представлена на рисунке 1.

Методологической основой дальнейших рассуждений является [5].

Скорость жидкости в трубе:

$$\omega = \frac{4G}{\rho \pi d^2 3600} = 1,21 \text{ м/с}. \quad (2)$$

Число Рейнольдса для потока нагреваемой среды:

$$Re = \frac{\omega d}{\nu} = 17900, \quad (3)$$

следовательно, режим течения турбулентный.

Число Нуссельта при турбулентном режиме течения:

$$Nu = 0,021 Re^{0,8} Pr^{0,43} \left(\frac{Pr}{Pr_c} \right)^{0,25} = 114,58. \quad (4)$$

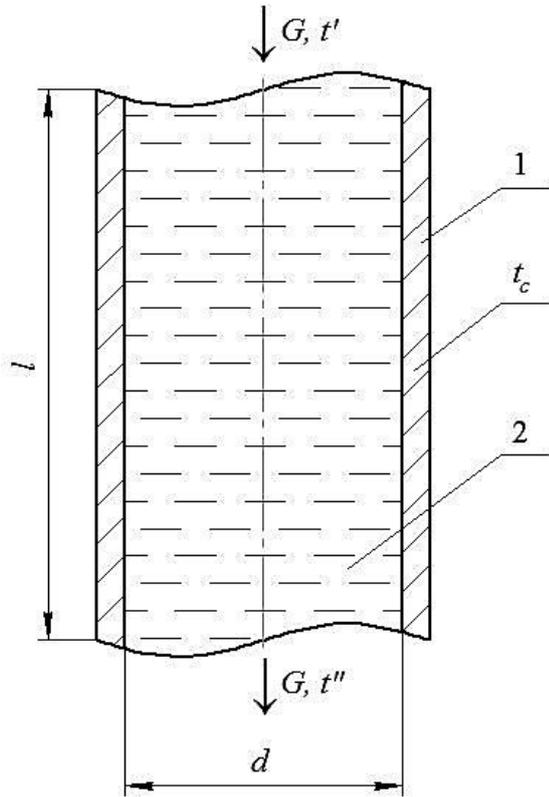


Рис. 1. Система «труба с внутренними источниками теплоты – жидкость»:
1 – труба; 2 – нагреваемая жидкость

В выражении (4) множитель $\left(\frac{Pr}{Pr_c}\right)^{0,25}$ принят равным 1, поскольку среда нагревается [6].

В системе «труба с внутренними источниками теплоты – нагреваемая среда» в условиях отсутствия теплопередачи через стенку коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к нагреваемой среде α равен коэффициенту теплопередачи k :

$$\alpha = k = Nu \frac{\lambda}{d} = 3909,48. \quad (5)$$

Среднелогарифмический температурный напор (рис. 2):

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_n - \Delta t_k}{2,3 \lg \frac{\Delta t_n}{\Delta t_k}} = 47,29. \quad (6)$$

где $\Delta t_n = t_c - t'$ – разность температуры стенки и температуры жидкости на входе;

$\Delta t_k = t_c - t''$ – разность температуры стенки и температуры жидкости на выходе.

Плотность теплового потока:

$$q = k \Delta t_{cp} = 18,48 \cdot 10^4 \text{ Вт} / \text{м}^2. \quad (7)$$

Площадь поверхности нагрева:

$$F = \frac{Q}{q} = 0,3 \text{ м}^2. \quad (8)$$

Число труб длиной $l = 1$ м:

$$n = \frac{F}{\pi d l} = 5,6. \quad (9)$$

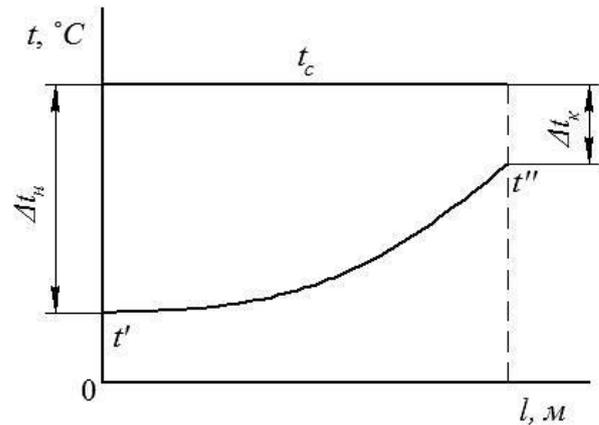


Рис. 2. Схема изменения температур стенки трубы t_c и нагреваемой среды $t' - t''$

Система «труба с внутренними источниками теплоты – пленка жидкости» представлена на рисунке 3 [7].

Объемная плотность орошения при числе труб $n = 1$ диаметром $d = 0,017$ м:

$$\Gamma = \frac{G}{\rho \pi d n} = 5 \cdot 10^{-3}. \quad (10)$$

Число Рейнольдса:

$$Re = \frac{4\Gamma}{v} = 17467,2, \quad (11)$$

следовательно, режим течения турбулентный.

Значение Прандтля:

$$Pr = \frac{c v \rho}{\lambda} = 7,92. \quad (12)$$

Тогда число Нуссельта:

$$Nu = 5,8 \cdot 10^{-4} Re^{1,18} Pr^{0,4} = 134,02. \quad (13)$$

Толщина пленки:

$$\sigma = 0,21 \left(\frac{v^2}{g}\right)^{0,33} Re^{0,533} = 0,0023 \text{ м}, \quad (14)$$

где g – ускорение свободного падения.

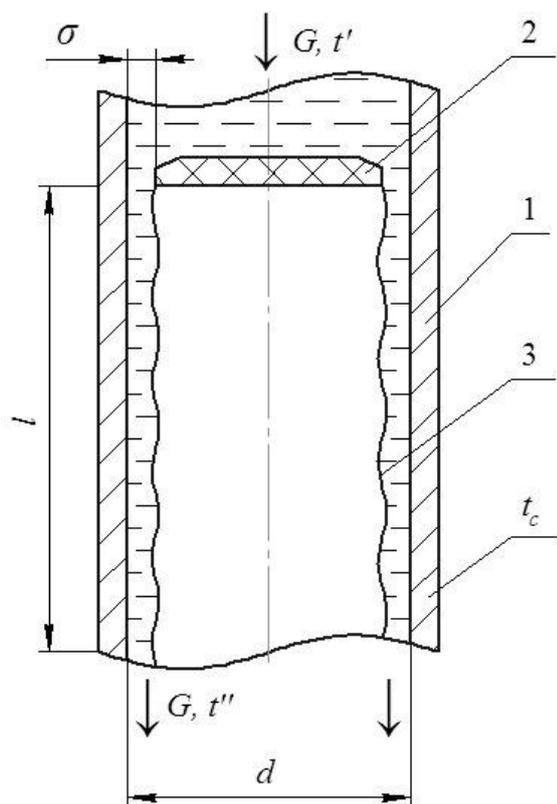


Рис. 3. Система «труба с внутренними источниками теплоты – пленка нагреваемой жидкости»:
 1 – труба; 2 – оросительный пленочный аппарат (формирователь пленки жидкости);
 3 – пленка жидкости

Коэффициент теплоотдачи α , как и в предыдущем случае, равен коэффициенту теплопередачи k :

$$\alpha = k = 0,25Nu \frac{\lambda}{\sigma} = 9123,4. \quad (15)$$

Необходимая поверхность нагрева:

$$F = \frac{Q}{k\Delta t_{cp}} = 0,136 \text{ м}^2. \quad (16)$$

Число труб при $l = 1$ м составляет

$$n = \frac{F}{\pi dl} = 2,54. \quad (17)$$

Выводы

Проведенный анализ теплообменных характеристик систем «труба с внутренними источниками теплоты – нагреваемая жидкость» и «труба с внутренними источниками теплоты – пленка нагреваемой жидкости» свидетельствует, что при одинаковом турбулентном режиме течения

нагреваемой жидкости вторая система обладает более высокими теплообменными характеристиками (число Нуссельта, коэффициенты теплообмена и теплопередачи), меньшей поверхностью нагрева и числом труб и может быть принята в расчет при разработке средств интенсификации теплообмена в электронагревательных устройствах.

Библиографический список

- Багаев, А. А. Электротехнология: учебное пособие / А. А. Багаев, А. И. Багаев, Л. В. Куликова. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2006. – 320 с. – Текст: непосредственный.
- 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.
- Теория теплообмена: 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 с.: ил. – Текст: непосредственный.
- Багаев, А. А. Оценка возможности организации турбулентного режима течения нагреваемой среды в каналах системы «труба с внутренними источниками теплоты – труба диэлектрическая / А. А. Багаев, С. О. Бобровский. – Текст: непосредственный // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. – 2021. – № 2 (196). – С. 127-132.
- 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.
- Филиппов, В. В. Теплообмен в химической технологии. Теория. Основы проектирования: учебное пособие / В. В. Филиппов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – 197 с.: ил. – Текст: непосредственный.

7. Удыма, П. Г. Пленочные испарители / П. Г. Удыма; под редакцией А. М. Бакластова. – Москва: Моск. энерг. ин-т, 1985. – 88 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. – Текст: непосредственный.

2. Bagaev, A. A. Sravnitel'nyj analiz ustanovok dlya termicheskoj obrabotki moloka / A. A. Bagaev, S. O. Bobrovskij. – Текст: непосредственный // Agrarnaya nauka – sel'skomu hozyajstvu: sbornik materialov: v 2 knigah: XV Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferenciya. – Barnaul: RIO Altajskogo GAU, 2020. – Kn. 2. – S. 8-11.

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

4. Bagaev, A. A. Ocenka vozmozhnosti organizacii turbulentnogo rezhima techeniya nagrevaemoj sredy v kanalah sistemy «truba s vnutrennimi istochnikami teploty – truba dielektricheskaya / A. A. Bagaev, S. O. Bobrovskij. – Текст: непосредственный // Vestnik Altajskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – 2021. – № 2 (196). – S. 127-132.

5. Krasnoshchekov, E. A. Zadachnik po teploperedache: uchebnoe posobie dlya vuzov / E. A. Krasnoshchekov, A. S. Sukomel. – 4-e izd., pererab. – Moskva: Energiya, 1980. – 288 s., il. – Текст: непосредственный.

6. Filippov, V. V. Teploobmen v himicheskoj tekhnologii. Teoriya. Osnovy proektirovaniya: uchebnoe posobie / V. V. Filippov. – Samara: Samar. gos. tekhn. un-t, 2014. – 197 s.: il. – Текст: непосредственный.

7. Udyma, P. G. Plenochnye ispariteli / P. G. Udyma; pod redakciej A. M. Baklastova. – Moskva: Mosk. energ. in-t, 1985. – 88 s. – Текст: непосредственный.

