УДК: 663.01.011

С.В. Шихалев, Л.А. Минухин, И.Ф. Решетников

ПРОЦЕССЫ ТЕПЛО- И МАССООТДАЧИ ПРИ КОНДЕНСАЦИИ ПАРА ИЗ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ПЛОСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ АППАРАТОВ С РУБАШКОЙ

В работе представлены результаты исследований процесса тепло- и массоотдачи при пленочной конденсации водяного пара из паровоздушной среды на плоской горизонтальной поверхности рабочей камеры рубашечного аппарата. Во введении приведены теоретические решения и расчетные формулы процесса конденсации в данных условиях, представленные в современной литературе. Выявлено отсутствие объективных данных по конденсации пара на плоских горизонтальных поверхностях теплообмена днищ варочных сосудов пищеварочных котлов, емкостных аппаратов, сковород с косвенным обогревом. Показана целесообразность проведения исследований. Рассмотрена методика проведения исследований, основанная на методе стационарного теплового потока. Представлен оригинальный экспериментальный стенд по исследованию процесса тепло- и массоотдачи при конденсации пара на плоской поверхности рабочей камеры модели пищеварочного котла. При обработке опытных данных по тепло- и массообмену в качестве единственно возможного определяющего характерного размера системы, входящего в число Нуссельта и критерий Архимеда, использовали величину $\sqrt{\sigma/\gamma}$, пропорциональную отрывному диаметру падающей капли конденсата. Проанализированы полученные результаты определения значений чисел Нуссельта при массоотдаче в данных условиях, приведена графическая интерпретация результатов опытов. Показано, что характер изменения экспериментальных данных, представленных на графике, хорошо согласуется с общеизвестными работами в данной области научных исследований. Рекомендована критериальная зависимость исследуемого процесса, позволяющая проводить объективные теплотехнические расчеты рубашечных аппаратов в условиях конденсации пара из парогазовой смеси на плоской горизонтальной поверхности.

Тепло- и массообмен, аппарат с рубашкой, число Нуссельта, коэффициент массоотдачи.

Введение

Нередко в теплообменных аппаратах пищевой промышленности и общественного питания, в частности, в аппаратах с рубашкой, процесс конденсации пара протекает на плоской горизонтальной поверхности теплообмена. Такой поверхностью, например, являются днища варочных сосудов пищеварочных котлов, емкостных аппаратов, сковород с косвенным обогревом и т.п.

Как известно [1–3], процесс конденсации пара в таких условиях происходит в присутствии неконденсирующихся газов. Поэтому интенсивность конденсации пара из парогазовой смеси и происходящего при этом переноса тепла зависит от последовательно протекающих взаимосвязанных процессов: подвода пара к поверхности конденсации, собственно процесса конденсации и переноса тепла через слой конденсированной фазы. В этом случае суммарное термическое сопротивление $\sum R$, величину, обратную результирующему коэффициенту теплоотдачи $\alpha_{см}$, расчленяют на термическое сопротивление конденсата $R_{пл}$, термическое сопротивление фазового перехода $R_ф$ и диффузионное термическое сопротивление $R_д$ [4]:

$$\Sigma R = R_{пл} + R_ф + R_д. \qquad (1)$$

Для определения коэффициента теплоотдачи при конденсации чистого пара на горизонтальной плоской поверхности можно использовать теоретические решения и расчетные формулы работы [5].

Однако определение диффузионной составляющей процесса в таких условиях наталкивается на определенные трудности. Учитывая, что конвективный перенос от парогазовой смеси к конденсату пренебрежимо мал в сравнении с выделяющейся теплотой фазового перехода, термическое сопротивление подвода пара к поверхности конденсации можно определить по формуле:

$$R_д = \frac{t_{п,о} - t_{п,пов}}{r \cdot \beta_р \cdot (p_{п,о} - p_{п,пов})}, \qquad (2)$$

где $t_{п,о}$, $p_{п,о}$ – соответственно температура и парциальное давление пара в основной массе парогазовой смеси; $t_{п,пов}$, $p_{п,пов}$ – соответственно температура и парциальное давление пара на границе раздела фаз; $r = f(_{tп,пов})$ – теплота фазового перехода; $\beta_р$ – коэффициент массоотдачи от парогазовой смеси к поверхности конденсатной пленки.

Отсутствие объективных данных по массо- и теплоотдаче при конденсации пара из парогазовой смеси на плоской горизонтальной поверхности обусловило целесообразность проведения дополнительных исследований.

Объект и методы исследования

Решение поставленной задачи проводили опытным путем. Основой экспериментального стенда, принципиальная схема которого представлена на рис. 1, являлся варочный сосуд с горизонтальным днищем 1 диаметром 380 мм, обогреваемый насыщенным водяным паром снизу.

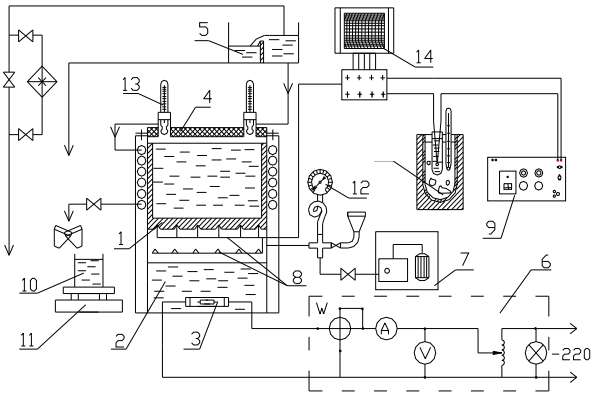

Рис. 1. Схема экспериментального стенда

Генерация пара осуществлялась в парогенераторе 2 с ТЭНами 3, прикрепленном к днищу варочного сосуда. В опытный стенд также вошли: калориметр 4 с системой водоснабжения 5, предназначенный для определения теплового потока, система термометрии, служащая для измерения температур парогазовой смеси и горизонтальной поверхности теплообмена, 8, 13, 14, электрическая схема с приборами 6, позволяющая регулировать тепловую мощность, система откачивания воздуха из паровой полости 7.

Измерение температуры парогазовой смеси и днища варочного сосуда проводилось с помощью термопар 8 с хромель-копелевым кабелем диаметром 0,2 мм, термостатированием свободных концов 15 и потенциометром типа ПП-63 поз. 9 класса точности 0,05.

Экспериментальные исследования процесса теплоотдачи из парогазовой смеси базировались на методе стационарного теплового потока как наиболее полно отвечающем требованиям поставленной задачи [6].

С момента наступления стационарного режима работы стенда, определяемого по автоматическому потенциометру КСП-4 поз. 14, производили фиксацию температур горячих спаев термопар и термометров 13, измеряли массовый расход воды через калориметр с помощью мерного сосуда 10 и весов 11, а также определяли давление в парогазовой области по манометру 12. Измерения проводили при различной подводимой тепловой мощности.

Результаты и их обсуждение

Обработку опытных данных проводили в соответствии с рекомендациями работы [7].

Тепловой поток, передаваемый через горизонтальное днище и воспринимаемый калориметром, определяли по формуле

$$Q = G_в \cdot C_{рв} \cdot (t_{в2} - t_{в1}), \qquad (3)$$

где $G_в$ – массовый расход воды через калориметр; $C_{рв}$ – удельная теплоемкость воды при постоянном давлении; $t_{в1}$, $t_{в2}$ – соответственно температура воды на входе в калориметр и выходе из него.

В этом случае результирующий коэффициент теплоотдачи при конденсации пара из парогазовой смеси на горизонтальной поверхности варочного сосуда рассчитывали с помощью закона Ньютона–Рихмана:

$$\alpha_{см} = \frac{Q}{F \cdot (t_{п,о} - t_c)}, \qquad (4)$$

где F – площадь днища варочного сосуда; $t_{п,о}$ – среднеобъемная температура основной массы парогазовой смеси; t_c – средневзвешенная температура поверхности днища со стороны паровой полости.

Как и в работе [2], при обработке опытных данных по массообмену использовали систему критериев вида

$$Nu_д = f(Ar, Пg, \varepsilon_{г,о}), \qquad (5)$$

где $Nu_д = \frac{\beta_р \cdot l}{D_р}$ – критерий Нуссельта диффузионный; $Ar = \frac{g \cdot l^3}{\upsilon_{см,о}^2} \cdot \frac{(\rho_{см,пов} - \rho_{см,о})}{\rho_{см,о}}$ – критерий Архимеда; $\varepsilon_{г,о} = \frac{p_{г,о}}{p_{см}}$ – концентрация воздуха в основной массе парогазовой смеси; $Пg = \frac{p_{п,о} - p_{п,пов}}{p_{см}}$ – безразмерная разность парциальных давлений пара.

В представленных выше критериях входят физические величины, расшифровка и методика определения которых приведены ниже.

1) Коэффициент массоотдачи $\beta_р$ определяли по формуле:

$$\beta_р = \frac{j}{p_{п,о} - p_{п,пов}}, \qquad (6)$$

где $j = \frac{Q}{F \cdot r}$ – плотность потока массы (пара).

Непосредственное измерение температуры на границе раздела фаз наталкивается на значительные трудности, поэтому значение $t_{п,пов}$, по которому в расчет вводили $p_{п,пов}$, определяли путем итерационных вычислений из соотношения

$$\frac{Q}{F \cdot (t_{п,пов} - t_c)} = \alpha_{пл}, \qquad (7)$$

где $\alpha_{пл}$ – коэффициент теплоотдачи при конденсации чистого пара.

Для определения коэффициента теплоотдачи при конденсации чистого пара на плоской горизонтальной поверхности использовали критериальное уравнение, представленное в работе [3]:

$$\frac{\alpha_{пл} \cdot \sqrt{\sigma/\gamma}}{\lambda} = 0{,}149 \cdot \left[\frac{\upsilon}{a} \cdot \frac{g \cdot \left(\sqrt{\sigma/\gamma}\right)^3}{\upsilon^2} \cdot \frac{r}{c \cdot (t_{п,пов} - t_c)} \right]^{0,25}, \qquad (8)$$

где λ, σ, υ, a, c, γ – соответственно коэффициенты теплопроводности, поверхностного натяжения, кинематической вязкости, температуропроводности, удельная теплоемкость и удельный вес конденсата. При совместном решении уравнений (7) и (8) физические константы в уравнении (8) относили к средней температуре пленки конденсата $t_{пл} = \frac{t_{п,пов} + t_c}{2}$.

Согласно работе [5], величина $\sqrt{\sigma/\gamma}$, пропорциональная отрывному диаметру падающей капли конденсата, является единственным определяющим размером системы. Поэтому при обработке опытных данных по тепло- и массообмену в качестве характерного размера l, входящего в критерии $Nu_д$ и Ar, также использовали величину $\sqrt{\sigma/\gamma}$.

2) Коэффициент диффузии D_p, отнесенный к градиенту парциального давления пара, рассчитывали по следующей зависимости:

$$D_p = \frac{D}{R_п \cdot T_{п,о}}, \qquad (9)$$

где D – концентрационная диффузия водяного пара в воздух; $R_п$ – газовая постоянная водяного пара; $T_{п,о}$ – абсолютная температура пара в основной массе парогазовой смеси, получаемая экспериментально.

В общем случае суммарный перенос вещества путем молекулярной диффузии является следствием концентрационной диффузии, термической диффузии и бародиффузии. Однако, согласно [4], два последних вида переноса пренебрежимо малы в сравнении с первым, поэтому в расчет $Nu_д$ вводили только концентрационную диффузию, определяемую зависимостью [8]:

$$D = D_0 \cdot \frac{p_0}{p_{см}} \cdot \left(\frac{T_{п,о}}{T_0}\right)^n, \qquad (10)$$

где D_0, p_0, T_0 – соответственно коэффициент диффузии, давление и температура при номальных физических условиях; $p_{см}$ – давление парогазовой смеси в условиях опыта.

Численные значения величин D_0 и n были приняты в соответствии с рекомендациями [8].

3) Плотность смеси на границе раздела фаз $\rho_{см,пов}$ и основной массы смеси $\rho_{см,о}$ определяли по формулам:

$$\rho_{см,пов} = \frac{p_{см}}{R_п \cdot T_{п,пов}} \cdot (1 + 0{,}61 \cdot \varepsilon_{г,пов}), \qquad (11)$$

$$\rho_{см,о} = \frac{p_{см}}{R_п \cdot T_{п,о}} \cdot (1 + 0{,}61 \cdot \varepsilon_{г,о}), \qquad (12)$$

где $T_{п,пов}$ – абсолютная температура пара на границе раздела фаз; $\varepsilon_{г,пов} = \frac{p_{г,пов}}{p_{см}}$ – концентрация воздуха на границе раздела фаз.

4) Парциальное давление неконденсирующегося газа (воздуха) в основной массе смеси $p_{г,о}$ и на границе раздела фаз $p_{г,пов}$ находили на основании закона Дальтона:

$$p_{см} = p_п + p_г. \qquad (13)$$

5) Кинематическую вязкость основной массы смеси $\upsilon_{см,о}$ определяли из соотношения:

$$\upsilon_{см,о} = \frac{\mu_{см,о}}{\rho_{см,о}}, \qquad (14)$$

где $\rho_{см,о}$ – плотность основной массы парогазовой смеси; $\mu_{см,о}$ – динамический коэффициент вязкости смеси.

Величину $\mu_{см,о}$ рассчитывали по следующей формуле [4]:

$$\mu_{см,о} = \frac{\mu_п \cdot (1 - \varepsilon_{г,о}) + 1{,}61 \cdot \mu_г \cdot \varepsilon_{г,о}}{1 + 0{,}61 \cdot \varepsilon_{г,о}}, \qquad (15)$$

где $\mu_п$, $\mu_г$ – соответственно динамический коэффициент вязкости пара и воздуха, выбираемые по температуре $t_{п,о}$.

Результаты обработки опытных данных, приведенные на рис. 2, представляли в виде следующей зависимости:

$$\frac{Nu_д \cdot Пg}{Ar^{0.25}} = f\left(\frac{\varepsilon_{г,о}}{Пg}\right). \qquad (16)$$

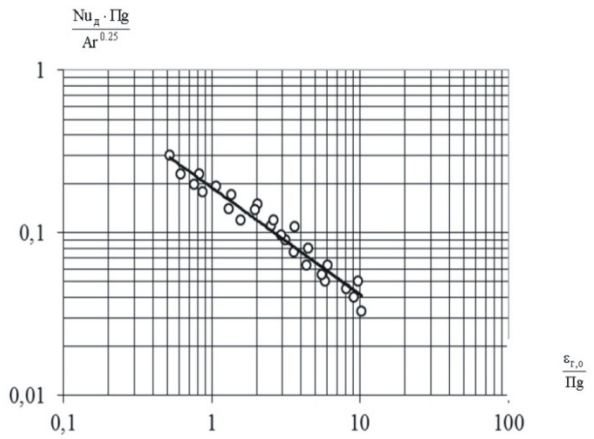

Рис. 2. Массообмен при конденсации пара из парогазовой смеси на горизонтальной плоской поверхности

Согласно работам [2,9], показатель степени у критерия Ar в зависимости (16) был принят 0,25.

Как видно из рис. 2, опытные точки в логарифмической системе координат с относительной ошибкой 4,5 % укладываются около прямой линии, что не превышает погрешность опытов. В результате математической обработки экспериментальных данных для процесса массообмена получена критериальная зависимость:

$$Nu_{д} = 0{,}19 \cdot Ar^{0{,}25} \cdot \varepsilon_{г,о}^{-0{,}7} \cdot Пg^{-1/3}. \quad (17)$$

Здесь следует отметить, что показатели степени у $\varepsilon_{г,о}$ и Пg хорошо согласуются с данными работ [5, 10].

Для оценки полученных результатов экспериментальный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{см}$ (4), сравнивали с его расчетным значением, полученным по формуле:

$$\alpha_{см}^{р} = \left(\sum R\right)^{-1}. \quad (18)$$

Результат проверки признан удовлетворительным.

Таким образом, с помощью полученной зависимости (17), можно проводить объективные теплотехнические расчеты процесса конденсации пара из парогазовой смеси на плоской горизонтальной поверхности аппаратов с рубашкой.

Список литературы

1. Минухин, Л.А. Расчеты сложных тепло- и массообмена в аппаратах пищевой промышленности / Л.А. Минухин. – М.: Агропромиздат, 1986. – 174 с.

2. Решетников, И.Ф. Процессы в греющих полостях и рабочих объемах пищеварочных котлов: автореферат дисс. … канд. техн. наук / Решетников И.Ф. – МИНХ им. Г.В. Плеханова, 1983. – 23 с.

3. Шихалев, С.В. Моделирование варочного оборудования предприятий общественного питания / С.В. Шихалев [и др.] – М-во образования и науки Российской Федерации, Уральский гос. экономический ун-т, 2011. – 141 с.

4. Исаченко, В.П. Теплопередача / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел – М.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

5. Попов, В.Д. О теплоотдаче при конденсации пара на горизонтальной поверхности / В.Д. Попов // Тр. Киевского технол. ин-та пищ. пром-сти им. А.И. Микояна. – 1951. – Вып. 11. – С. 87–97.

6. Осипова, В.А. Экспериментальное исследование процессов теплообмена: учеб. пособие для вузов / В.А. Осипова. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1979. – 320 с.

7. Алибеков, А.К. Практика применения планирования эксперимента: для инженеров и научных работников / А.К. Алибеков, М.А. Михалев. – Махачкала: ДГТУ, 2013. – 126 с.

8. Кафаров, В.В. Основы массопередачи / В.В. Кафаров. – М. : Высшая школа, 1962. – 655 с.

9. Берман, Л.Д. Обобщение опытных данных по тепло- и массообмену при конденсации пара в присутствии неконденсирующегося газа / Л.Д. Берман // ТВТ. – 1972. – № 3. – С. 587–594.

10. Берман Л.Д. Расчет поверхностных теплообменных аппаратов для конденсации пара из паровоздушной смеси / Л.Д. Берман, С.Н. Фукс // Теплоэнергетика. – 1959. – № 7. – С. 74–83.

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный аграрный университет»,
620075, Россия, Свердловская область,
г. Екатеринбург, ул. Карла Либкнехта, 42.
Тел.: (343) 371-33-63, факс: (343) 371-03-61,
e-mail: rector@urgau.ru

ФГБОУ ВПО «Уральский государственный экономический университет»,
620219, Россия, Свердловская область,
г. Екатеринбург, ул. 8 Марта, 62.
Тел.: (343) 257-91-40, факс: (343) 257-71-47,
e-mail: start@usue.ru

SUMMARY

S.V. Shikhalev, L.A. Minukhin, I.F. Reshetnikov

HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES IN CONDENSING STEAM FROM THE STEAM-GAS MIXTURE ON THE HORIZONTAL FLAT SURFACE IN JACKETED APPARATUS

The work presents the results of investigations of the heat and mass transfer process in film condensation of water vapor from the vapor environment on a flat, horizontal surface of the working chamber in the jacketed apparatus. The introduction includes a theoretical solution and calculation formulae of the condensation process under these conditions, presented in contemporary literature. The absence of objective data on steam condensation on flat horizontal surfaces of heat exchange bottoms of cooking vessels, food boilers, storage equipment, pans with indirect heating is revealed. The expediency of conducting research is shown. The techniques of conducting research based on the stationary heat flow method are considered. The original experimental stand for research of heat and mass transfer process in steam condensation on a flat surface of the working chamber of the model food boiler is presented. In processing the experimental data on heat and mass transfer, we used the $\sqrt{\sigma/\gamma}$ value proportional to the

tear off diameter of falling condensation drops, as the only possible determinant of the characteristic size of the system, included in the Nusselt number and the criterion of Archimedes. The results of determining the values of the Nusselt numbers in mass transfer under these conditions are analyzed, a graphical interpretation of the results of the experiments is provided. It is shown that the character of changes of the experimental data presented in the chart, is in good agreement with the well-known works in this field of research. The criteria dependence of the investigated process, providing an objective heat engineering of jacketed apparatus under conditions of steam condensation from vapor-gas mixture on a flat, horizontal surface is recommended.

Heat and mass transfer, jacketed apparatus, Nusselt number, mass transfer coefficient.

REFERENCES

1.Minukhin L.A., *Raschety slozhnyh teplo- i massoobmena v apparatah pishchevoi promyshlennosti* [Analysis of complex heat lo and transfer in apparatus of food industry]. Moscow, Agropromizdat, 1986. 174p.

2.Reshetnikov I.F. Processy v greuiushchih polostiah i rabochih ob'iomah pishchevarochnyh kotlov. Avtoreferat diss. kand. tekhn. nauk [Processes in the heat cavities and working volumes food boilers. Cand. tech. sci. abstract diss.]. Moscow, 1983. 23 p.

3.Shikhalev S.V. [and others] *Modelirovanie varochnogo oborudovania predpriatii obshchestvennogo pitania* [Modeling of the cooking equipment of enterprises of public catering]. Ekaterinburg, The Ural State University of Economics, 2011. 141p.

4.Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow, Energoizdat, 1981. 416p.

5.Popov V.D. O teplootdache pri kondensacii para na gorizontal'noi poverhnosti [About the heat in steam condensation on horizontal surfaces] *Trudy Kievskogo tehnol. In-ta pishch. Prom-sti im. A.I. Mikoiana,* 1951, no. 11. pp. 87-97.

6.Osipova V.A. *Eksperimental'noe issledovanie processov teploobmena* [Experimental investigation of heat transfer processes]. Moscow, Energia, 1979. 320p.

7.Alibekov A.K., Mihaliov M.A. *Praktika primenenia planirovania eksperimenta: dlia ingenerov i nauchnyh rabotnikov* [The practice of planning of experiment: for engineers and scientists]. Mahachkala, DGTU, 2013. 126p.

8.Kafarov V.V. *Osnovy massoperedachi* [Fundamentals of mass transfer]. Moscow, Higher School, 1962. 655p.

9.Berman L.D. Obobshchenie opytnyh dannyh po teplo- i massoobmenu pri kondensacii para v prisutstvii nekondenciruiushchegosia gaza [Generalization of experimental data on heat and mass transfer in vapor condensation in the presence of a noncondensable gas]. *TVT*, 1972, no. 3, pp.587-594.

10. Berman L.D. Rashchet poverhnostnyh teploobmennyh apparatov dlia kondensacii para iz parovozdushnoi smesi [The calculation of the surface heat exchanger for steam condensation of the steam-air mixture]. *Industrial heat*, 1959, no.7, pp.74-83.

The Ural State Agricultural University,
42, ul. Karl Liebknecht, Ekaterinburg,
Sverdlovsk region, 620075 Russia.
Phone: (343) 371-33-63, fax: (343) 371-03-61,
e-mail: rector@urgau.ru

The Ural State University of Economics,
62, 8 th of March Str., Ekaterinburg,
Sverdlovsk region, 620219 Russia,
Phone: (343) 257-91-40, fax: (343) 257-71-47,
e-mail: start@usue.ru

Дата поступления: 14.04.2014