

УДК 66.021.3.532.527

А. С. Карпов, М. Р. Вахитов, Н. М. Нуртдинов,
А. Н. НиколаевТЕПЛООБМЕН В КАПЛЯХ ЖИДКОСТИ
В МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ВИХРЕВЫХ ЭКОНОМАЙЗЕРАХ

Ключевые слова: капля, теплообмен, вихревые экономайзеры.

Получено численное решение для радиального профиля температуры в капле жидкости при ее нестационарном нагреве. Показано удобство выражения теплопереноса в капле через фиктивный средний коэффициент теплоотдачи для которого получена зависимость от числа Фурье.

Keywords: drop, heat exchange, vortex economizers.

Numerical solution for temperature radial profile in liquid droplet was obtained during its non-steady heating. The convenience of heat transfer description in drops by mean imaginary heat transfer coefficient is shown. The dependence of heat transfer coefficient on the Fourier number was obtained.

Одними из наиболее перспективных конструкций аппаратов, используемых для утилизации тепла дымовых газов, являются многоступенчатые экономайзеры с вихревыми контактными ступенями [1,2]. Такие аппараты представляют собой тепломассообменную колонну с контактными ступенями, выполненными в виде тарелки с закрепленными на ней прямоточно-вихревыми элементами одинакового размера, рис 1. Внутри каждого элемента осуществляется прямоточное взаимодействие фаз, тогда как в целом по колонне движение фаз происходит в режиме противотока.

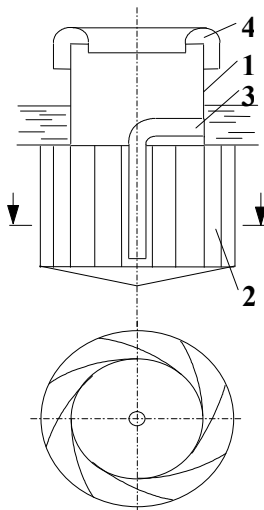


Рис. 1 – Конструкция вихревого контактного элемента: 1 – корпус, 2 – тангенциально-лопаточный завихритель газа, 3 – узел подачи жидкости, 4 – узел сепарации газа и жидкости

Поток газа, поступающий снизу в контактные устройства, приобретает за счет завихрителя 2 вращательно-поступательное (вихревое) движение. Жидкость, подаваемая в центральную зону завихрителя, дробится потоком газа на капли, вовлекаемые им в совместное движение с образованием вблизи лопаток вращающегося газокapельного слоя. При выходе из зоны завихрителя капли жидкости под действием центробежной силы перемещаются к периферии и оседают на стенке

контактного патрубка, образуя пленку, которая на выходе из контактного устройства отделяется от потока газа сепарационным устройством 4.

Капли жидкости периодически осаждаются на лопатки завихрителя, с образованием жидкой пленки, которая срывается с лопаток потоком газа с образованием новых капель. Такая структура потока делает удобным использование для описания переноса тепла внутри капель пенетрационной модели, согласно которой жидкость внутри капель испытывает полное перемешивание через определенные промежутки времени, равные интервалам времени между соседними осаждениями капель на лопатки завихрителя. Между актами мгновенного полного перемешивания перенос тепла в каплях осуществляется молекулярной теплопроводностью. В этом случае теплообмен со стороны жидкой фазы удобно описывать средним фиктивным коэффициентом теплоотдачи $\bar{\alpha}_ж = f(\tau)$ где τ – характерное время существования отдельных капель в слое, определяемое в результате решения уравнений движения одиночной капли в закрученном потоке [3].

Капли, двигающиеся в капельном слое при значениях критерия Рейнольдса менее 1000, имеют форму близкую к сферической, а циркуляция жидкости в них отсутствует. Это позволяет описывать теплообмен в каплях как нестационарную теплопроводность в сферическом теле. К настоящему времени известно большое количество аналитических и численных решений этой задачи [4-6]. Аналитические решения задачи нестационарной теплопроводности сферы получены в большинстве в виде рядов, повсеместное использование которых затруднено ввиду их громоздкости, отсутствия указаний о скорости сходимости рядов, что не позволяет ограничиться малым количеством членов ряда.

Задача нестационарной теплопроводности в каплях решалась численно методом сеток. Нестационарная теплопроводность в сфере описывалась известным уравнением

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right), \quad (1)$$

где a – коэффициент температуропроводности, t – температура, r – радиус.

В качестве граничных условий принимались условия

$$\alpha_r(t_r - t^*) = \beta_r \cdot h^*(y^* - y_r) + \lambda_{ж} \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=d_k/2}, \quad (2)$$

где α_r , β_r – коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи на поверхности капли со стороны газовой фазы, y_r и t_r – концентрация паров жидкости и температура в ядре потока газа, y^* и t^* – концентрация паров жидкости и температура у поверхности капли, $\lambda_{ж}$ – теплопроводность жидкости, d_k – диаметр капли.

Решение искалось в виде зависимости безразмерной избыточной температуры, осредненной по объему капли, $\bar{\theta}_{cp}$, от критериев Фурье Fo и Био Bi . Однако предварительные расчеты показали слабую зависимость безразмерной избыточной температуры от критерия Био в исследуемом диапазоне параметров, и дальнейшие расчеты проводились при граничных условиях

$$\tau = 0, t = t_n; r = d_k/2, t = t_{rp}; r = 0, \partial t / \partial r = 0, \quad (3)$$

где t_n – температура капли в начальный момент времени, t_{rp} – температура на границе капли, а решение искалось в виде $\bar{\theta}_{cp} = f(Fo)$, где

$$Fo = \frac{4a\tau}{d_k^2}, \quad \bar{\theta}_{cp} = \frac{t_{cp} - t_{rp}}{t_n - t_{rp}}. \quad (4)$$

Осредненная по объему капли температура определялась по формуле

$$t_{cp} = \int_0^{d_k/2} \frac{3r^2 t}{(d_k/2)^2} dr. \quad (5)$$

Расчеты проводились для воды, при этом изменением коэффициента температуропроводности при изменении температуры в пределах 20–70°C пренебрегалось. В результате получена зависимость, представленная на рис.2.

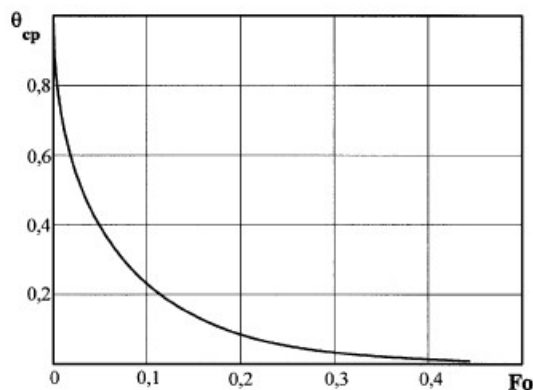


Рис. 2 – Зависимость средней безразмерной избыточной температуры жидкости в капле от числа Фурье

Результаты, представленные на рис. 2 описаны выражением

$$\bar{\theta}_{cp} = \exp(-5,83 \cdot Fo^{0,6}). \quad (6)$$

Для упрощения расчетов предложено теплообмен в каплях характеризовать фиктивным средним коэффициентом теплоотдачи $\alpha_{ж}$, т.е. считать, что

$$\lambda_{ж} \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=d_k/2} = \alpha_{ж} (t_{rp} - t_{cp}). \quad (7)$$

Тогда теплообмен внутри одиночной капли описывается соотношением

$$dQ = \frac{\pi d_k^2}{6} \rho_{ж} c_p dt = \alpha_{ж} \pi d_k^2 (t_{rp} - t_{cp}) d\tau \quad (8)$$

или

$$d\tau = \frac{6}{d_k} \alpha_{ж} \frac{(t_{rp} - t_{cp})}{\rho_{ж} c_p} d\tau, \quad (9)$$

где $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, c_p – теплоемкость при постоянном давлении.

После разделения переменных и интегрирования получим

$$-\ln(\bar{\theta}_{cp}) = \frac{6}{d_k} \bar{\alpha}_{ж} \frac{\tau}{\rho_{ж} c_p}. \quad (10)$$

где $\bar{\alpha}_{ж}$ – средний за время τ фиктивный коэффициент теплоотдачи в капле.

После подстановки выражения (6) в уравнение (10) получим зависимость для среднего фиктивного коэффициента теплоотдачи.

$$\bar{\alpha}_{ж} = 0,972 \rho_{ж} c_p d_k Fo^{0,6} / \tau$$

или

$$Nu = \frac{3,89}{Fo^{0,4}}, \quad (11)$$

где $Nu = \frac{\bar{\alpha}_{ж} d_k}{\lambda_{ж}}$ – число Нуссельта.

Входящая в выражение (11) величина τ составляет время движения капель после срыва с одной лопатки завихрителя до осаждения на другую лопатку.

Литература

1. М.Р. Вахитов, Н.М. Нуртдинов, А.Н. Николаев *Вестник Казанского технологического университета*, 10, 117-124 (2010).
2. А.Н. Николаев, О.В. Козулина, Р.Р. Фатыхов *Вестник Казанского технологического университета*, 3, 155-160 (2011).
3. А.Н.Николаев, В.А. Малюсов, *Теоретические основы химической технологии*, 25, 4, 476-485 (1991).
4. П.В. Цой, *Методы расчета отдельных задач тепло-массопереноса*. Энергия, Москва, 1971, 384 с.
5. К.О. Беннетт, Дж.Е. Майерс, *Гидродинамика, теплообмен и массообмен*. Недра, Москва, 1966, 727 с.
6. С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанский, *Справочник по теплопередаче*. Госэнергоиздат, Л.-М., 1959. 414 с.

© А. С. Карпов – магистрант каф. оборудования пищевых производств КНИТУ, opp-srv@rambler.ru, М. Р. Вахитов – ст. препод. той же кафедры; Н. М. Нуртдинов – к.т.н., доц. той же кафедры; А. Н. Николаев – д.т.н., проф., зав. каф. оборудования пищевых производств КНИТУ.

© A. S. Karpov – magistant of «Equipment for food production» department, KNRTU, opp-srv@rambler.ru, M. R. Vakhitov, lecturer of the same Department; N. M. Nurtdinov – Candidate of Technical Sciences, docent of the same Department; A. N. Nikolaev, head of department, professor, «Equipment for food production» department, KNRTU.