

Е. А. ШАПАТИНА и В. В. КАЛЮЖНЫЙ

## ПЕРЕНОС ТЕПЛА И ВЕЩЕСТВА В ГАЗОВОМ ПОТОКЕ В СЛОЕ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ

(Представлено академиком М. В. Кирпичевым 23 III 1950)

Скорость многих технических процессов, протекающих в слое твердых частиц, определяется исключительно или почти исключительно переносом тепла или вещества из газа к поверхности твердых частиц, лежащих в слое (или наоборот — от поверхности к газу). К таким процессам относятся слоевое горение и газификация твердых топлив, термическая переработка и сушка мелких частиц топлива газовым теплоносителем и ряд других практически не менее важных процессов. Несмотря на важность этого процесса, его теоретическая и экспериментальная изученность до сих пор недостаточна.

Первой попыткой вывести количественное уравнение теплообмена газа в слое твердых частиц является работа И. М. Федорова <sup>(1)</sup>, в которой он, на основании сопоставления с внутренней задачей теплообмена в канале, приходит к следующему соотношению:

$$\varphi = 0,139 \operatorname{Re}^{-0,2} \frac{(1 - \xi)^{0,2}}{\xi}, \quad (1)$$

где  $\varphi = \operatorname{Nu}/\operatorname{Re}$ ,  $\xi$  — порозность.

Вывод первого теоретического уравнения теплообмена газа со слоем твердых частиц был дан в работе З. Ф. Чуханова <sup>(2)</sup>, который, пользуясь гидродинамической теорией теплообмена, получил для теплообмена слоя с газом следующее уравнение:

$$\varphi = 0,49 \operatorname{Re}_{\varphi}^{-0,2} \frac{1 - \operatorname{Re}_{\varphi}^{-0,7}}{1 + 0,88 \operatorname{Re}_{\varphi}^{-0,1} (1,44 - 0,88 \operatorname{Re}_{\varphi}^{-0,1})}. \quad (2)$$

Экспериментальное исследование процесса переноса тепла или вещества из газа к поверхности частиц в слое представляет серьезные трудности. Именно этим объясняется тот факт, что в течение длительного времени единственными экспериментальными данными, которые имелись в литературе и которыми пользовались для расчетов, были совершенно недоброкачественные данные, полученные Фарнесом <sup>(2)</sup>. Ошибочность результатов Фарнеса была показана в работах <sup>(4, 5)</sup>. И. М. Федоров при исследовании процесса сушки угля в плотном слое частиц (при постоянной скорости сушки) получил впервые методически правильные, достаточно достоверные экспериментальные данные по теплообмену между газом и слоем. На рис. 1 представлены экспериментальные данные И. М. Федорова в координатах  $\varphi = f(\operatorname{Re})$ .

В 1938—1940 гг. Е. А. Шапатиной было проведено непосредственное экспериментальное исследование прогрева газом слоя металлических шариков, а также частиц неправильной формы шамота и кокса в условиях нестационарного режима. Результаты этого исследования, представленные также на рис. 1, в достаточной удовлетворительной степени совпадают с результатами И. М. Федорова, полученными из опытов по сушке угля, но резко отличаются от результатов Фарнеса, исследовавшего также непосредственно теплообмен газа со слоем твердых частиц.

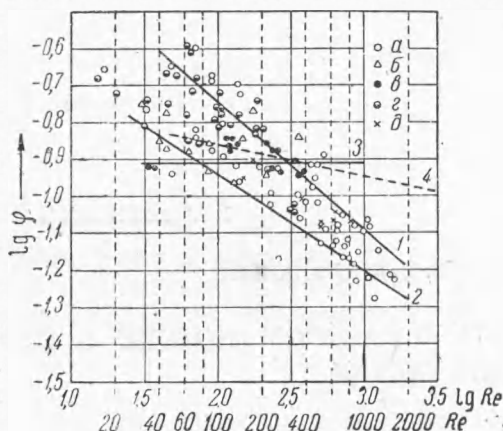


Рис. 1.  $\varphi = f(Re)$  по данным различных авторов. 1 и 2 — прямые, описывающие максимальный разброс опытных точек; 3 — нагрев слоя шариков (Сандерс и Форд); 4 — нагрев известняков и руд (Фарнес в обработке Китаева). α — сушка слоя шариков (Бернштейн); β — сушка слоя цилиндров (Бернштейн); γ — нагрев слоя шаров и цилиндров (Чуханов, Шапатина); δ — сушка подмосковного угля (Федоров); ε — сушка слоя цилиндров (Харт)

следования приведены на рис. 1. В 1940 г. Сандерс<sup>(7)</sup> провел работу, методически аналогичную работе Е. А. Шапатиной и З. Ф. Чуханова<sup>(4)</sup>. К сожалению, из опубликованной работы Сандерса нельзя получить экспериментальных точек для графика рис. 1, но можно нанести полученную им эмпирическую зависимость  $\varphi = f(Re)$ , что сделано нами для сравнения на рис. 1. Б. И. Китаевым<sup>(5)</sup> в 1945 г. были обработаны экспериментальные данные Фарнеса, причем им были исключены ошибки Фарнеса. Результаты, полученные Б. И. Китаевым, также представлены нами на рис. 1.

В 1943 г. Герт<sup>(8)</sup> провел исследование массы и теплопередачи от газа к слою цилиндрических твердых частиц. Результаты Герта, как видно из рис. 1, также довольно близко соответствуют результатам других работ.

На рис. 1 наглядно виден значительный разброс опытных точек, полученных различными авторами, однако из этих материалов можно сделать один весьма важный вывод о значении показателя степени

В последующие годы различными исследователями проводилось изучение подвода тепла или вещества из газа к поверхности твердых частиц, находящихся в слое. В 1939—1940 гг. Р. С. Бернштейн<sup>(6)</sup> изучал теплоотдачу в слое твердых частиц сферической и неправильной формы. Экспериментальные точки этого исследования

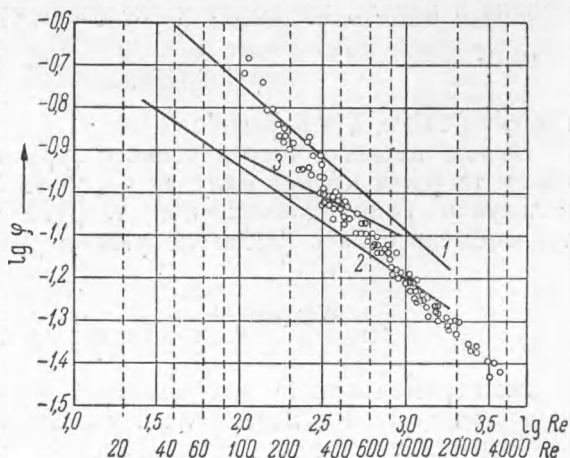


Рис. 2.  $\varphi = f_1(Re)$  по опытам Хоугена. 1 и 2 — прямые, описывающие максимальный разброс опытных точек; 3 — сушка слоя цилиндров (Харт). ○ — сушка слоя шариков и цилиндров

при  $Re$  в уравнении  $\varphi = f(Re)$ . Этот показатель степени колеблется в упомянутых работах от 0 у Сандерса до 0,19 у Герта. Наибольший разброс опытных данных имеет место в исследовании Бернштейна, но отдельные серии его опытов дают показатель степени при  $Re$  в тех же пределах.

Исключение составляет исследование Хоугена <sup>(9)</sup>, которое дало резко отличную по характеру зависимость  $\varphi = f(Re)$ . Точную причину отклонения результатов Хоугена от результатов всех других исследователей, изучавших перенос тепла и вещества из газа к поверхности частиц в слое, установить трудно. Ошибка в исследованиях Хоугена, как видно из рис. 2, на котором дано сравнение кривой Хоугена и кривых пределов разброса опытных точек других исследователей, имеет место при больших и малых значениях  $Re$ . Видимо, при высоких скоростях газа и, соответственно, высоких интенсивностях испарения в опытах Хоугена имела место неточная фиксация температуры поверхности частиц.

Учитывая важность данных по теплообмену газа со слоем и необходимость уточнения соответствующего расчетного уравнения, нами были проведены дополнительные исследования по методу, изложенному в нашей работе <sup>(10)</sup>.

Задача этих дополнительных исследований включала также некоторое расширение пределов изменения  $Re$  от  $Re = 60$  до  $Re = 1700$ .

Результаты наших исследований приведены на рис. 3, на котором нанесены также эмпирические кривые других исследователей. Как видно из графика рис. 3, наши исследования достаточно убедительно подтверждают правильность величины показателя степени при  $Re$ , полученного на базе весьма большого экспериментального материала.

Весьма важно также то обстоятельство, что полученные экспериментальные данные вполне удовлетворительно описываются теоретическими уравнениями З. Ф. Чуханова для теплообмена в слое. Это совпадение теоретического уравнения (2) с опытными данными в пределах  $Re$  от 60 до 1000 позволяет уверенно пользоваться в практических расчетах этим уравнением.

Для определения так называемого коэффициента теплообмена  $\alpha$  уравнение (2) запишется в следующем виде:

$$\alpha = \varphi W_{\varphi} \approx 0,27 Re^{-0,17} W_{\varphi}. \quad (3)$$

Таким же путем можно определить и коэффициент  $\alpha$  для переноса вещества.

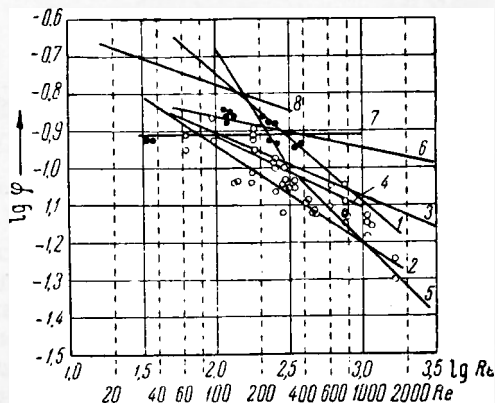


Рис. 3.  $\varphi = f_2(Re)$  по нашим данным (1940 и 1947 гг.), по теоретическому уравнению Чуханова <sup>(2)</sup> и по данным различных авторов. 1 и 2 — прямые, описывающие максимальный разброс опытных точек; 3 — по теоретическому уравнению З. Ф. Чуханова; 4 — сушка слоя цилиндров (Харт); 5 — сушка слоя шариков и цилиндров (Хоуген); 6 — нагрев известняков и руд (Фарнес в обработке Китаева); 7 — нагрев слоя шаров (Сандерс и Форд); 8 — сушка подмосковного угля (Федоров). ● — нагрев слоя шаров и цилиндров (Чуханов и Шапатина), ○ — нагрев слоя стальных шаров (Шапатина и Калюжный)

## ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- <sup>1</sup> И. М. Федоров, Современные проблемы сушильной техники, вып. 2, 1941.
- <sup>2</sup> З. Ф. Чуханов, Изв. АН СССР, ОТН, № 10 (1947). <sup>3</sup> С. С. Furnas, Ind. and Eng. Chem., 22, No. 1, No. 7 (1930).
- <sup>4</sup> З. Ф. Чуханов и Е. А. Шапатина, Изв. АН СССР, ОТН, № 7—8 (1945).
- <sup>5</sup> Б. И. Китаев, Теплообмен в шахтных печах, 1945.
- <sup>6</sup> Кнорре, Исследование прессов горения натурального топлива, 1948.
- <sup>7</sup> O. A. Saunders and H. Ford, Journ. of the Iron and Steel Inst., No. 1 (1940).
- <sup>8</sup> D. M. Hurt, Ind. and Eng. Chem., Ind. Ed., 35, No. 5 (1943).
- <sup>9</sup> B. W. Gemson, G. Todos and O. A. Hougen, Trans. of Am. Inst. of Chem. Eng., 39, No. 1 (1943).
- <sup>10</sup> Е. А. Шапатина и В. В. Калюжный, Тр. Энергет. ин-та АН СССР (1947)