

Для цитирования:

Сапожников Б.Г., Горбунова А.М., Зеленкова Ю.О., Ширяева Н.П. Влияние температуры поверхности нагрева на внешний теплообмен во влажном виброкипящем слое. *Изв. вузов. Химия и хим. технология.* 2016. Т. 59. Вып. 5. С. 77-80.

For citation:

Sapozhnikov B.G., Gorbunova A.M., Zelenkova Yu.O., Shiryaeva N.P. Influence of surface heating temperature on external heat-exchange in wet vibro-fluidized bed. *Izv. Vyssh. Uchebn. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* 2016. V. 59. N 5. P. 77-80.

УДК 66.047

Б.Г. Сапожников, А.М. Горбунова, Ю.О. Зеленкова, Н.П. Ширяева

Борис Георгиевич Сапожников (✉), Юлия Оттовна Зеленкова

Кафедра теплоэнергетики и теплотехники, Уральский федеральный университет, ул. Мира, 19, Екатеринбург, Российская Федерация, 620002

E-mail: bgs0910@mail.ru (✉), jzel63@mail.ru

Анастасия Михайловна Горбунова, Нина Павловна Ширяева

Кафедра теплогазоснабжения и вентиляции, Уральский федеральный университет, ул. Мира, 19, Екатеринбург, Российская Федерация, 620002

E-mail: anessa86@mail.ru, kafedratgiv@yandex.ru

**ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ НАГРЕВА НА ВНЕШНИЙ ТЕПЛООБМЕН
ВО ВЛАЖНОМ ВИБРОКИПАЮЩЕМ СЛОЕ**

Приводятся экспериментальные данные о влиянии температуры поверхности нагрева, размещенной во влажном виброкипящем слое непористых частиц и превышающей температуру насыщения, на внешний коэффициент теплоотдачи при кондуктивном подводе теплоты.

Ключевые слова: вибрация, дисперсный материал, объемная влажность, внешний теплообмен, температура насыщения

B.G. Sapozhnikov, A.M. Gorbunova, Yu.O. Zelenkova, N.P. Shiryaeva

Boris G. Sapozhnikov (✉), Yuliya O. Zelenkova

Department of Thermal Engineering and Heat Engineering, Ural Federal University, Mira ave., 19, Ekaterinburg, Russia, 620002

E-mail: bgs0910@mail.ru (✉), jzel63@mail.ru

Anastasiya M. Gorbunova, Nina P. Shiryaeva

Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Ural Federal University, Mira ave., 19, Ekaterinburg, Russia, 620002

E-mail: anessa86@mail.ru, kafedratgiv@yandex.ru

**INFLUENCE OF SURFACE HEATING TEMPERATURE ON EXTERNAL HEAT-EXCHANGE
IN WET VIBRO-FLUIDIZED BED**

Experimental data are given on the influence of the temperature of the heating surface, placed to a wet vibro-fluidized bed of non-porous particles, and higher that the saturation temperatures on the external heat-transfer coefficient at conductive supply of the heat.

Key words: vibration, disperse material, volumetric wetness, external heat-exchange, saturation temperature

При осуществлении процессов сушки дисперсных материалов перспективными являются аппараты виброкипящего слоя с кондуктивным подводом тепла [1-3], интерес к которым сохраняется и в настоящее время [4, 5]. В этом случае для описания внешнего теплообмена используется уравнение Ньютона-Рихмана, в котором искомой величиной служит коэффициент теплоотдачи α , необходимый для расчета поверхности нагрева.

В работах [6, 7], где приводятся данные о внешнем теплообмене во влажном виброкипящем слое, температура поверхности нагрева t_c не превышала 70 °С и была меньше температуры насыщения t_n . Вместе с тем для интенсификации процессов обезвоживания сыпучих материалов при кондуктивном подводе теплоты стремятся идти на повышение температуры поверхности теплообмена [1, 3, 8, 9].

При температуре нагревателя t_c , превышающей t_n , процессы протекают с изменением агрегатного состояния влаги, что может повлиять на гидродинамику и теплообмен во влажном виброкипящем слое. В частности, установлено [8], что в процессе сушки материала (электрокорунд, $d_T = 0,072$ мм, $H_0 = 100$ мм, $f = 25$ Гц, $K = 6,3$) с исходной влажностью $W_{об} > 10\%$ при $t_c = 100\div 150^\circ\text{C}$ возникает дополнительная стадия: слой может находиться в вибропоршневом режиме, причем границы режима зависят от t_c и исходной влажности. Его появление связано с тем, что пар, образующийся в процессе сушки у греющей поверхности, попадая в более холодное ядро слоя, конденсируется, в результате чего материал в ядре слоя переувлажняется. При этом циркуляционное движение дисперсной среды ослабевает или полностью прекращается. Поэтому при подсушивании материала слой переходил последовательно в подвижное, взвешенное и фонтанирующее состояния [8]. В работе [9] приводятся данные о влиянии температуры греющей стенки ($t_c = 100 - 140$ °С) на кривые сушки борной кислоты в виброкипящем слое, свидетельствующие о заметном сокращении времени сушки с увеличением t_c . Однако сведения об интенсивности внешнего теплообмена в рассмотренных работах при $t_c > t_n$ не приводятся.

Исследование влияния температуры поверхности нагрева на теплообмен к влажному виброкипящему слою проводилось по стационарной методике в стальном герметичном сосуде с внутренним диаметром 130 и высотой 370 мм. Нагреватель размещался внутри толстостенной медной трубы с наружным диаметром 25 мм, которая устанавливалась вертикально по оси сосуда и жестко крепилась к нему, а сам сосуд – в свою

очередь, к столу вибростенда, совершавшему вертикально направленные колебания с частотой $f = 40$ и 50 Гц и амплитудой A до 1,4 мм. Для снижения торцевых утечек тепла применялись фторопластовые и текстолитовые вставки.

В исследованиях для характеристики интенсивности внешнего теплообмена (теплоотдачи) применялось уравнение Ньютона-Рихмана:

$$Q = \alpha (\bar{t}_c - \bar{t}_{сл}) F,$$

где Q – тепловой поток; α – средний по высоте трубы коэффициент теплоотдачи от поверхности стенки к виброкипящему слою; \bar{t}_c – средняя по высоте трубы температура стенки; $\bar{t}_{сл}$ – средняя температура слоя вдали от стенки; F – боковая поверхность трубы. Температура стенки измерялась тремя медь-константановыми термопарами с погрешностью ± 2 °С, а температура в слое фиксировалась двумя термопарами, размещенными на расстоянии 30 мм от поверхности нагревателя, с погрешностью ± 3 °С. Для расчета мощности нагревателя применялись амперметр и вольтметр с классами точности 0,5. Среднеквадратичная погрешность определения средних коэффициентов теплоотдачи не превышала 11,6%.

В качестве модельных непористых материалов применялся электрокорунд узких фракций с диаметром частиц $d_T = 0,07, 0,13$ и 0,32 мм. Высота слоя составляла $H_0 = 180$ мм, температура нагревателя t_c достигала 150 – 160 °С. Перед началом каждого опыта готовилась масса слоя с исходной влажностью и помещалась в стальной сосуд с герметичной крышкой, что обеспечивало неизменность влагосодержания во время проведения эксперимента. Ввиду того, что над слоем сохранялось пространство высотой более 80 мм, наличие крышки не оказывало влияние на характер и интенсивность движения виброкипящего слоя. Для характеристики влагосодержания использовалась относительная объемная влажность $W_{об} = V_{вл}/V_{сл}$, представляющая собой отношение объема воды в слое $V_{вл}$ к объему его сухой массы $V_{сл}$, которая не зависит от плотности частиц материала и лучше характеризует заполнение порового канала. Опыты проводились при $W_{об} = 0; 0,5; 2; 5$ и 10%.

Кроме средних по высоте слоя коэффициентов теплоотдачи α изучалось распределение температуры в поперечном сечении слоя. Для этого на боковой поверхности сосуда был размещен штуцер с уплотнением на расстоянии $z = 90$ мм от дна, через который проходила подвижная медь-константановая термопара (в сололке).

Было установлено (рис. 1), что при $t_c \leq 160^\circ\text{C}$ температура в слое изменялась лишь на расстоянии x до 20 – 30 мм от поверхности трубы.

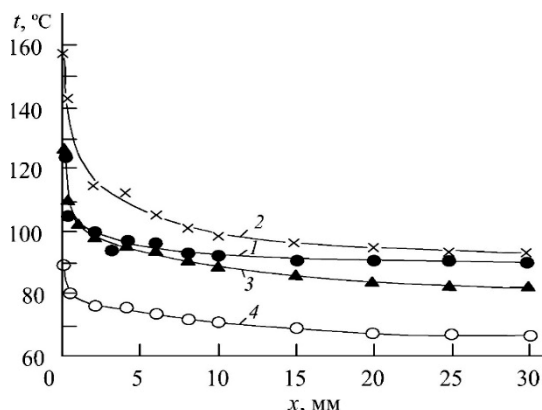


Рис. 1. Изменение температуры при удалении от поверхности вертикальной трубы в сухом и увлажненном виброкипящем слое электрокорунда в среднем сечении $z = 90$ мм, $d_T = 0,13$ мм, $H_0 = 180$ мм, $D_{СЛ} = 130$ мм, $d_{TP} = 25$ мм, $f = 40$ Гц, $A = 1,0$ мм: 1 – $W_{OB} = 0$, $t_c = 125^\circ\text{C}$; 2 – 0,5%, 157,6 °C; 3 – 5%, 126 °C; 4 – 5%, 90 °C

Fig. 1. The change in temperature at removal from the surface of vertical pipe in the dry and moist vibrofluidized bed of electrocorundum in average section $z = 90$ mm, $d_T = 0,13$ mm, $H_0 = 180$ mm, $D_{СЛ} = 130$ mm, $d_{TP} = 25$ mm, $f = 40$ Hz, $A = 1.0$ mm: 1 – $W_{OB} = 0$; $t_c = 125^\circ\text{C}$; 2 – 0.5%, 157.6 °C; 3 – 5%, 126 °C; 4 – 5%, 90 °C

Результаты исследования теплообмена представлены на рис. 2 и 3. На рис. 2 видно, что в слое сухого материала (кр. 1) изменение температуры поверхности трубы мало влияет на теплоотдачу. Наблюдаемое незначительное увеличение коэффициентов теплоотдачи связано с возрастанием теплопроводности воздуха в пограничном слое.

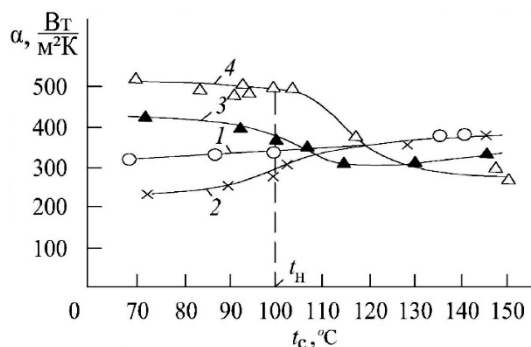


Рис. 2. Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи α для одиночной вертикальной трубы от температуры на ее поверхности в виброкипящем слое электрокорунда, $d_T = 0,13$ мм, $H_0 = 180$ мм, $D_{СЛ} = 130$ мм, $d_{TP} = 25$ мм, $f = 40$ Гц, $A = 1,0$ мм: 1 – $W_{OB} = 0$; 2 – 0,5%; 3 – 5,0%; 4 – 10,0%

Fig. 2. The dependence of the averaged heat-transfer coefficient for single vertical pipe on surface temperature in vibrofluidized bed of electro-corundum, $d_T = 0.13$ mm; $H_0 = 180$ mm; $D_{СЛ} = 130$ mm; $d_{TP} = 25$ mm; $f = 40$ Hz; $A = 1.0$ mm; 1 – $W_{OB} = 0$; 2 – 0.5%; 3 – 5.0%; 4 – 10.0%

При влагосодержании, соответствующем образованию на поверхности частиц адсорбционной пленки [10] ($W_{OB} = 0,5\%$, кр. 2), коэффициенты теплоотдачи при $t_c < t_H$ в соответствие с полученными данными в [6, 7] меньше, чем в слое сухого материала.

При $t_c > t_H = 100^\circ\text{C}$ ввиду перегрева материала в пограничном слое относительно температуры насыщения (рис. 1, кр. 1-3) и незначительного количества влаги ($W_{OB} = 0,5\%$) последняя испаряется прежде, чем частицы достигнут поверхности нагрева. По этой причине фактически происходит теплообмен поверхности с сухим материалом, о чем свидетельствует и вид кр. 2 на рис. 2, сливающейся при $t_c > 100^\circ\text{C}$ с кр. 1.

При достаточно большой влажности ($W_{OB} = 5$ и 10%) влага находится в капиллярно-стыковом состоянии [10], поэтому при $t_c < t_H$ коэффициенты теплоотдачи выше из-за периодического смачивания поверхности высоко влажным материалом, снижающим термическое сопротивление в пограничном слое [6, 7] (начальные участки кр. 3, 4 на рис. 2 располагаются над кр. 1, 2).

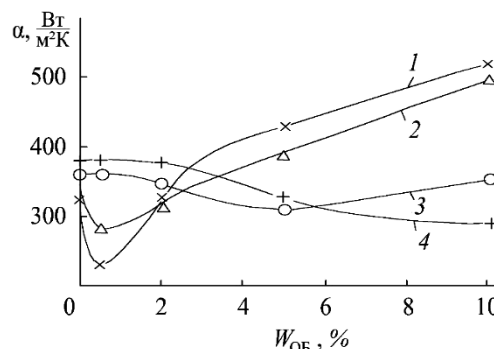


Рис. 3. Зависимость среднего коэффициента теплоотдачи α для одиночной вертикальной трубы от влажности виброкипящего слоя электрокорунда, $d_T = 0,13$ мм, $H_0 = 180$ мм, $D_{СЛ} = 130$ мм, $d_{TP} = 25$ мм, $f = 40$ Гц, $A = 1,0$ мм: 1 – $t_c = 70^\circ\text{C}$; 2 – 100°C ; 3 – 120°C ; 4 – 140°C

Fig.3. The dependence of the averaged heat-transfer coefficient for single vertical pipe on moist of vibrofluidized bed of electrocorundum, $d_T = 0.13$ mm; $H_0 = 180$ mm; $D_{СЛ} = 130$ mm; $d_{TP} = 25$ mm; $f = 40$ Hz; $A = 1.0$ mm; 1 – $t_c = 70^\circ\text{C}$; 2 – 100°C ; 3 – 120°C ; 4 – 140°C

При таком влагосодержании влажные частицы могут достигать поверхности нагрева и при $t_c > t_H$. При этом в результате интенсивного парообразования концентрация пара в пограничном слое возрастает и пар устремляется в ядро слоя, где его конденсация приводит к снижению интенсивности циркуляционного движения дисперсной среды и даже появлению вибропоршневого режима (при $W_{OB} > 10\%$) [8]. Кроме того, теплопроводность пара в рассматриваемых условиях несколько меньше теплопроводности воздуха. Все это,

несмотря на возрастание диффузии, вызывает уменьшение коэффициентов α при $t_C > t_H$ (конечные участки кр. 3, 4 на рис. 2) в сравнении со сломом сухого материала.

Следовательно, температура поверхности оказывает существенное влияние на теплообмен во влажном виброкипящем слое. Причем качественной и количественной границей, определяющей характер этого влияния, является температура насыщения t_H (рис. 2). Поэтому вид зависимостей $\alpha = f(W_{\text{Об}})$ сильно изменяется при $t_C > t_H$ (рис. 3, кр. 3, 4 по сравнению с кр. 1, 2). Во-первых, у них отсутствует участок начального понижения коэффициентов теплоотдачи, как это имеет место при $t_C < t_H$ (кр. 1, 2), поскольку при $W_{\text{Об}} < 2\%$ около поверхности образуется зона подсушенного материала, для которой восстанавливается способность к хаотическому осциллирующему движению частиц. Во-вторых, при дальнейшем повышении влагосодержания наблюдается тенденция к снижению коэффициентов тепло-

отдачи, причем они становятся меньше таковых при $t_C \leq t_H$. Последнее связано с тем, что при $W_{\text{Об}} < 2\%$ размеры зоны подсушенных частиц сокращаются, возрастает концентрация пара вблизи нагревателя, пар устремляется в ядро слоя, где его конденсация приводит к снижению интенсивности циркуляционного движения дисперсной среды [8], что в итоге приводит к снижению коэффициентов α (конечные участки кр. 3 и 4 на рис. 3) по сравнению с данными при $W_{\text{Об}} > 2\%$ для кр. 1 и 2 при $t_C \leq t_H$.

Таким образом, при подсушивании сыпучих непористых материалов в виброкипящем слое влажностью меньше 2–3% целесообразно применять температуру поверхности нагрева $t_C > t_H$, а учитывая, что при этих условиях одновременно возрастает скорость сушки [9] и более влажных материалов, можно рекомендовать полученные данные по коэффициентам теплоотдачи для расчета необходимой поверхности нагрева при $W_{\text{Об}} = 5–10\%$.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Членов В.А., Михайлов Н.В.** Сушка сыпучих материалов в виброкипящем слое. М.: Стройиздат. 1967. 224 с.;
2. **Варсонофьев В.Д., Кольман-Иванов Э.Э.** Вибрационная техника в химической промышленности. М.: Химия. 1985. 240 с.;
3. **Кармазин В.Д.** Техника и применение вибрирующего слоя. Киев: Наукова думка. 1977. 239 с.;
4. **Сажин Б.С., Кочетов О.С., Сажин В.Б.** Патент на изобретение RUS 2312285 18.07.2006;
5. **Сажин Б.С., Кочетов О.С., Сажина М.Б.** Патент на полезную модель RUS 64747 18.07.2006;
6. **Сапожников Г.В., Сыромятников Н.И., Сапожников Б.Г.** // ИФЖ. 1984. Т. 47. № 3. С. 483–484;
7. **Сапожников Б.Г., Зеленкова Ю.О.** // Тр. II Росс. Национал. конф. по теплообмену. Т. 5. Двухфазные течения. Дисперсные потоки и пористые среды. М.: Изд. МЭИ. 1998. С. 279–281;
8. **Микула В.А.** Гидродинамика и массотеплоперенос при обезвоживании мелкозернистого материала в аппаратах с виброкипящим слоем. Дис. ...к.т.н. Свердловск. 1991. 193 с.;
9. **Колпаков А.С.** Резонансные режимы виброоживления мелкодисперсных порошков и их использование в технологических процессах термической и химико-термической обработки. Дис. ...д.т.н. Екатеринбург. 2006. 416 с.;
10. **Зимон А.Д., Андрианов Е.И.** Аутогезия сыпучих материалов. М.: Metallurgiya. 1978. 288 с.

REFERENCES

1. **Chlenov V.A., Mikhaylov N.V.** The drying of the loose material in the vibrofluidized bed. M.: Stroiyzdat. 1967. 224 p. (in Russian).
2. **Varsonof'ev V.D., Kol'man-Ivanov E.E.** The vibrating techniques in the chemical industry. M.: Khimiya. 1985. 240 p. (in Russian).
3. **Karmazin V.D.** The techniques and application of the vibrofluidized bed. Kiev: Naukova dumka. 1977. 239 p. (in Russian).
4. **Sazhin B.S., Kochetov O.S., Sazhin V.B.** RF Patent 2312285. 18.07.2006. (in Russian).
5. **Sazhin B.S., Kochetov O.S., Sazhina M.B.** RF Patent 64747. 18.07.2006. (in Russian).
6. **Sapozhnikov G.V., Syromyatnikov N.I., Sapozhnikov B.G.** // Inzh. Phiz. Zhurn. 1984. V. 47. N 3. P. 483 – 484. (in Russian).
7. **Sapozhnikov B.G., Zelenkova Yu.O.** // Proceedings of II Russian National Conf. On Heat Exchange. V. 5. Two-phase flows. Disperse flows and porous environments. M.: Izdatel'skiy Dom. MEI. 1998. P. 279 – 281. (in Russian).
8. **Mikula V.A.** Hydrodynamics and mass- and heat transfer in the dewatering of fine-grained material in devices with vibrofluidized bed. Dissertation for candidate degree on engineering sciences. Sverdlovsk. 1991. 193 p. (in Russian).
9. **Kolpakov A.S.** The resonance modes of the vibrofluidize of fine disperse powders and their use in technological processes of heat and chemical engineering treatment. Dissertation for doctor degree on engineering sciences. Ekaterinburg. 2006. 416 p.
10. **Zimon A.D., Andrianov E.I.** Autohesion of the loose materials. M.: Metallurgiya. 1978. 288 p. (in Russian).

*Поступила в редакцию 25.01.2016
Принята к опубликованию 05.05.2016*

*Received 25.01.2016
Accepted 05.05.2016*