

УДК 631.365.036.3

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА  
ПРОДУКТ В ПРОЦЕССЕ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА**

**Лимонов Александр Владимирович**

магистрант

**Щербаков Сергей Юрьевич**

кандидат технических наук, доцент

[Scherbakov78@yandex.ru](mailto:Scherbakov78@yandex.ru)

**Криволапов Иван Павлович**

кандидат технических наук, доцент

[ivan0068@bk.ru](mailto:ivan0068@bk.ru)

Мичуринский государственный аграрный университет

г. Мичуринск, Россия

**Аннотация:** В статье анализируются влияние вибрационного воздействия на продукт в процессе тепломассопереноса. Предлагается математическое определение коэффициента теплоотдачи в виброкипящем слое.

**Ключевые слова:** вибрационное воздействие, коэффициента теплоотдачи.

Вибросушка с успехом применяется для обезвоживания склонных к адгезии (слипающихся) дисперсных материалов, что обеспечивает снижение энергетических затрат по сравнению с затратами при рециркуляции материала или загрузке влажного материала на слой сухого [1, 2].

Процессы теплопереноса характеризуются большой сложностью и разнообразием, поскольку являются результатом многих физических процессов, имеющих различную природу, неизменно привлекает внимание исследователей.

В настоящее время известно довольно большое число работ, посвященных исследованиям внешнего теплообмена виброкипящего слоя [2, 3].

Интенсивность теплообмена между виброкипящим слоем и закрепленным в нем телом обусловлена многими факторами, среди которых основными являются: плотность, теплопроводность, высота слоя, форма, размеры, ориентация, место и способ размещения материала в слое поверхности теплообмена [4].

Анализ известных литературных источников показал отсутствие единого подхода в оценке степени или величины этого воздействия. Интенсивность вибрационного воздействия на дисперсный материал определялась как по комплексным факторам - скорости или относительному ускорению вибрации ( $A_L f_L$  или  $K_B$  соответственно), так и непосредственно по частоте  $f_L$  и амплитуде  $A_L$  [3-5].

Коэффициент теплоотдачи в виброкипящем слое  $\alpha$  зависит от произведения частоты на их амплитуду и превышает величину  $a$  для неподвижного слоя в 17... 19 раз, достигая значений 230...290 Вт/м<sup>2</sup>\*град. При этом величина  $a$  определялась из выражения:

$$\alpha = 2,63 \cdot 10^{-2} (120 \cdot A_L \cdot f_L)^{0,96}. \quad (1)$$

Экспериментально установлено, что при переходе неподвижного слоя в псевдооживленное состояние наблюдается резкое увеличение значения коэффициента теплоотдачи (в два раза). Однако при дальнейшем росте

скорости ( $A_{лфл}$ ) величина  $a$  изменяется незначительно: медленно растет до  $a_{max}$ , после достижения которого наблюдается снижение интенсивности теплоотдачи. При этом величина  $a_{max}$  определялась из выражения:

$$\alpha_{max} = 0,614 \frac{\lambda_2 D_m^{-0,354}}{\varepsilon_{сл}^{1,5} d^{0,646}} \left( \frac{\rho_4}{\rho_2} \right)^{0,47} \quad (2)$$

Максимальные значения полученных коэффициентов теплоотдачи превышали "предельное" значение  $\alpha_{max}$ , которое рассчитывалось по формуле С.С. Забродского:

$$\alpha_{max} = 35,8 * \rho_m^{0,2} \lambda_m^{0,6} * d_m^{0,36}, \quad (3)$$

и равнялось примерно  $1000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{град}$ .

Исследуя теплообмен вертикально установленного цилиндрического датчика ( $d_0 = 8,6 \text{ мм}$  и  $L_D = 20 \text{ мм}$ ) с виброслоем при дополнительной продувке газа через слой и без нее, отмечается монотонный рост и сближение всех кривых  $\alpha = f(A_{лфл})^{1,35}$  с увеличением  $A_{лфл}$ . Величина  $\alpha$  определялась из выражения:

$$\alpha = 71,5 (A_{лфл})^{1,35}. \quad (4)$$

Условием перехода неподвижного слоя в состояние виброкипения является превышение ускорения вибрации над ускорением свободного падения, исследовали характер изменения  $\alpha = f(K_B)$  в виброкипящем слое.

Авторами [2, 3] выявлена зависимость:

$$\alpha = 245 * K_B^{0,202}, \quad (5)$$

и выделена область ( $a_B = 1 \dots 4$ ), в которой наблюдалось резкое увеличение коэффициентов теплоотдачи.

В дальнейшем, указано на наличие трех областей, в которых ускорение вибрации по-разному влияло на  $a$ : в первой области при  $K_B = 1 \dots 2,8$  наблюдалось резкое возрастание величины  $a$ , во второй (при  $K_B = 2,8 \dots 5,3$ ) - рост  $\alpha$  замедлялся и в третьей (при  $K_B > 5,3$ ) - происходило даже некоторое снижение интенсивности теплоотдачи.

Для указанных областей предложены соответствующие формулы для

определения величины  $\alpha$ :

- для первой:  $\alpha = 100 * K_B^{1,04}$ , (6)

- для второй:  $\alpha = 232 * K_B^{0,22}$ , (7)

- для третьей:  $\alpha = 437 * K_B^{0,16}$ . (8)

Экстремальный характер зависимости  $\alpha = f(a_B)$  объясняется особенностями механизма теплопереноса в движущемся дисперсном слое: нелинейным изменением конвективной и кондуктивной составляющих теплоотдачи по мере возрастания величины  $K_B$ .

Влияние параметров вибрации на теплообмен исследовано [2, 6] при изучении теплоотдачи от плоских датчиков-нагревателей, жестко связанных с аппаратом и имитировавших горизонтальную и вертикальную поверхности.

Для горизонтального датчика наблюдался максимум кривой  $\alpha = f(A_{дл})$ , причем, чем выше частота вибрации, тем меньше амплитуда, при которой наблюдалась величина  $\alpha_{max}$  (и тем ниже было ее абсолютное значение). Наличие экстремума, связано со значительным локальным увеличением порозности и даже образованием "прозрачной" зоны у горизонтальной поверхности, что снижало отвод тепла от нагревателя. Экстремальный характер зависимости  $\alpha = f(A_{дл})$  с последующим снижением интенсивности теплообмена связывают не только с появлением в системе резонансных явлений, но и с увеличением потерь энергии от соударений при возрастании частоты или амплитуды [6-9].

Изменение  $\alpha$  от  $f_L$  в слое полифракционного состава (концентрация кусков крупностью 25...40 мм не превышала 20 %) аналогично изменению зависимости  $\alpha = f(f_L)$  для монофракционного материала и отличается от последней, лишь сдвигом в сторону более высоких частот. Это связано с более высокими затратами энергии, необходимыми для преодоления тормозящего воздействия крупных кусков. Наличие максимума кривой  $\alpha = f(f_L)$  свидетельствует о существовании оптимального режима вибрации,

определенного в диапазоне частот от 22 до 32 Гц.

Обнаружен сложный характер зависимости величины  $\alpha$  от физических свойств газовой среды и среднего размера частиц  $d_T$  в работе [1]. Если для виброслоя с  $d_{TЭ} = 0,002...0,06$  мм зависимость  $\alpha = f(d_T)$  логарифмическая, то при  $d_T = 0,06...0,40$  мм она более сложная, так как здесь параметр  $d_T$  присутствует и в показателях степени.

С уменьшением размера частиц и при переходе к полифракционным слоям снижается газопроницаемость засыпки дисперсного материала, что приводит к росту разряжения газа под виброслоем и к уменьшению толщины "прозрачной" зоны (т.е. к интенсификации теплопереноса).

Влияние на интенсивность теплообмена геометрических размеров слоя по-разному освещается в литературе. Так, для виброкипящего слоя высотой  $h_{ТО} < 100$  мм ее влияние на теплоотдачу не обнаружено или отмечалась незначительная интенсификация процесса с увеличением высоты засыпки.

По результатам исследований [1, 10] установлено, что с увеличением амплитуды колебаний от 0,5 мм до 1,5 мм коэффициент теплоотдачи монотонно возрастает в 1,6 раза.

В нашем случае рассматривается не отдельный перенос теплоты от виброслоя к термообрабатываемой поверхности, а совмещенный с процессом сушки. Наложение на слой материала вибрационных воздействий приводит к повышению коэффициентов тепло- и массоотдачи и повышению общей интенсивности процесса тепломассопереноса [11].

Следовательно эффективность перемешивания материала непосредственно определяет и неравномерность пребывания продукта в сушильной камере аппарата, которая в свою очередь, связана с качеством сушки (или равномерностью прогрева продукта).

Для выравнивания времени пребывания материала в сушильной камере нужно применять аппараты непрерывного действия с направленным перемещением виброкипящего слоя.

## Список литературы

1. Щербаков С.Ю. Совершенствование технологии сушки плодов рябины с разработкой вибрационного сушильного аппарата. Диссертация канд. техн. наук. - Мичуринск, 2006.-146с.
2. Блинов А.В. Внешний теплообмен и гидродинамика виброкипящего слоя со свободно плавающими телами: Диссертация канд. техн. наук. - Свердловск, 1987.-186с.
3. Исследование процесса сушки плодов боярышника в сушильном шкафу / П.С. Лазин, С.Ю. Щербаков // В сборнике: СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНИКИ, ЭКОНОМИКИ И ОБЩЕСТВА. Материалы II Международной научно-практической очно-заочной конференции. Научный редактор А.В. Гумеров. – 2017. – С. 81-84.
4. Методика и результаты оценки концентрации диоксида углерода при разложении соломонавозной смеси / И.П. Криволапов, В.И. Горшенин, А.О. Хромов, М.С. Колдин // Вестник Мичуринского государственного аграрного университета. - 2014. - № 3. - С. 55-58.
5. Substantiation for structural and technological parameters of the unit for separating branching cloned rootstocks / V.G. Brosalin, A.A. Zavrazhnov, A.I. Zavrazhnov, V.Y. Lantsev, K.A. Manaenkov // Biosciences Biotechnology Research Asia. - 2014. - Т. 11. - № 3. - С. 1413-1419.
6. Колдин М.С. Обоснование параметров устройства выгрузки бункерных компостирующих установок / М.С. Колдин, И.П. Криволапов // В сборнике: Актуальные проблемы науки в агропромышленном комплексе. сборник статей 67-й международной научно-практической конференции : в 3 томах. – 2016. – С. 76-81.
7. Проблемы утилизации отходов сельскохозяйственных производств и пути их решения / М.С. Колдин, И.П. Криволапов, С.И. Киселев, Т.Ю. Холопова // В сборнике: Тенденции развития агропромышленного комплекса глазами молодых ученых. Материалы научно-практической конференции с международным участием.

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации; Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Рязанский государственный агротехнологический университет имени П.А. Костычева». – 2018. – С. 45-49

8. [Determination of the air purification efficiency when using a biofilter](#) / I.P. Krivolapov, A.Yu. Astapov, D.V. Akishin, A.A. Korotkov, S.Yu. Shcherbakov // [Journal of Ecological Engineering](#). - 2019. - Т. 20. - № 11. - С. 232-239.

9. Shcherbakov S.Yu. [Drying hawthorn berries in drum dryer using blade agitator](#) / S.Yu. Shcherbakov, P.S. Lazin, I.P. Krivolapov // [Amazonia Investiga](#). - 2019. - Т. 8. - № 21. - С. 588-595.

10. Щербаков С.Ю. Повышение качества процесса сушки плодово-ягодной продукции / С.Ю. Щербаков, П.С. Лазин // В сборнике: Инновационная деятельность в модернизации АПК. Материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых: в 3 частях. – 2017. – С. 68-71.

11. Лазин П.С. Разработка барабанной сушильной установки / П.С. Лазин, С.Ю. Щербаков // В сборнике: СОВРЕМЕННЫЕ АСПЕКТЫ ПРОИЗВОДСТВА И ПЕРЕРАБОТКИ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ПРОДУКЦИИ. Сборник статей по материалам III научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 95-летию Кубанского государственного аграрного университета. – 2017. – С. 724-730.

UDC 631.365.036.3

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF VIBRATION ON THE PRODUCT  
DURING HEAT AND MASS TRANSFER**

**Alexander Vladimirovich Limonov**

undergraduate

**Sergey Yurievich Shcherbakov**

candidate of technical Sciences, associate Professor

[Shcherbakov78@yandex.ru](mailto:Shcherbakov78@yandex.ru)

**Ivan Pavlovich Krivolapov**

candidate of technical Sciences, associate Professor

ivan0068@bk.ru

Michurinsk state agrarian University,

Michurinsk, Russia

**Abstract.** The article analyzes the effect of vibration on the product during heat and mass transfer. We propose a mathematical definition of the coefficient of heat transfer  $h_e$  in the vibro-boiling  $h_e$  layer.

**Key words:** vibration effect, heat transfer coefficient on.