

УДК 66.047

ВЛИЯНИЕ МАССЫ РИСА НА СКОРОСТЬ ЕГО ВЫСУШИВАНИЯ И НА КОЭФФИЦИЕНТ ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СУШИЛЬНОЙ УСТАНОВКИ НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

С. Сахрул, М. Мирманто, С. Сукмавати, Г. Путра, С. Асари

Матарамский университет, 83125 Матарам, Индонезия

E-mails: h.syahrul@unram.ac.id, m.mirmanto@unram.ac.id,

sukmawaty14@unram.ac.id, guyupmdp@unram.ac.id, asarysofian@gmail.com

Выполнено экспериментальное исследование новой сушильной вертикальной установки. Изучено влияние массы риса на скорость его высушивания. Масса риса составляла 10, 20 и 30 кг, температура горячего воздуха — 60 °С, скорость его движения — 5 м/с. Установлено, что с увеличением массы риса увеличиваются скорость высушивания и коэффициент полезного действия установки. Однако при этом увеличивается время высушивания, необходимое для достижения необходимой влажности риса, равной 14 %. Показано, что при массе риса, равной 30 кг, коэффициент полезного действия сушильной установки составляет 3,27 %.

Ключевые слова: рис, скорость высушивания, коэффициент полезного действия, вертикальная сушильная установка.

DOI: 10.15372/PMTF20210206

Введение. После сбора урожая риса важным процессом является его обработка. Перед складированием в хранилище его необходимо высушить до влажности, равной 14 %. Если влажность риса будет больше 14 %, то он будет поврежден грибом и прочими микроорганизмами [1, 2]. Высушивание — удаление влаги вследствие поступления тепла [3] — позволяет уничтожить грибок и другие вредящие микроорганизмы.

Начальная влажность риса составляет 21–26 %. Большое содержание воды ухудшает качество риса, в результате чего его зерна могут повредиться, сгнить, изменить цвет и т. п. [4]. Поэтому рис необходимо высушивать непосредственно после сбора урожая. В соответствии с Национальным стандартом Индонезии (SNI-01-0224-1987) влажность высушенного риса I, II и III сортов не должна превышать 14 %. Классификация риса по сортам приведена в таблице.

Обычно в фермерских хозяйствах урожай высушивается на солнце. Такой способ сушки зависит от времени года, района и требует значительных затрат времени. В дождливый сезон использовать данный способ практически невозможно, поскольку при этом возрастает доля поврежденного зерна, что приводит к снижению стоимости такого риса [5].

Работа выполнена при финансовой поддержке Управления исследований и общественных служб, Управления по развитию исследований Министерства исследований, технологий и высшего образования Индонезии и фонда PPUPT (грант № 068/SP2H/LT/DRPM/2019).

© Сахрул С., Мирманто М., Сукмавати С., Путра Г., Асари С., 2021

Качество риса в соответствии со стандартом SNI 6125:2008

Посторонние примеси	Максимально допустимое содержание в рисе, %		
	I сорт	II сорт	III сорт
Вода	14	14	14
Пустое зерно	1	2	3
Сломанное зерно и желтый рис	2	5	7
Меловое зерно и молодое зерно	1	5	10
Красное зерно	1	2	4
Сорная примесь	—	0,5	1
Разносортица	2	5	10

Время, затрачиваемое на высушивание зерна на солнце, обычно составляет 3 сут [4], но в дождливый период оно увеличивается до 7 сут.

Вследствие увеличения спроса на рис для улучшения качества собранного урожая требуется использовать новые технологии, в частности технологии, в которых применяются сушильные аппараты. В работе [6] исследовались характеристики сушильных аппаратов, рассматривался процесс высушивания в псевдосжиженном слое. В [7] изучались характеристики сушильного аппарата периодического действия, используемого для высушивания перца чили на солнце. В [8] исследовался процесс высушивания красного перца чили с помощью радиаторов или теплообменников. В экспериментах применялась сушильная установка, содержащая коробку, в которую помещался материал, тепловая энергия создавалась потоком горячей воды, текущей внутри радиаторов. Аналогичная установка использовалась в экспериментах [9], но температура воды менялась. Сушильные установки, описанные в работах [8, 9], являются установками периодического действия, поскольку горячий воздух циркулировал сквозь материал, помещенный внутри коробки. Авторы работы [10] провели эксперименты с использованием псевдосжиженного слоя. Под действием горячего воздуха, поступающего в сушильную камеру, высушиваемый материал поднимался, а затем вновь опускался на элеваторную ленту. Материал не циркулировал внутри сушильной камеры. Таким образом, процесс непрерывного высушивания не был исследован.

В работе [11] описана сушильная установка непрерывного действия, в сушильной камере которой материал непрерывно перемещается. Материал поднимался вверх ковшем, а затем вновь высыпался в сушильную камеру. Температура в сушильной камере менялась.

Процесс высушивания с использованием сушильных аппаратов имеет ряд преимуществ по сравнению с обычной сушкой: 1) требуется меньшее количество рабочих; 2) процесс является более эффективным; 3) отсутствует влияние погодных условий; 4) температуру можно контролировать; 5) исключено загрязнение внешними примесями, такими как навоз, гравий, пыль, песок.

Существует два типа сушильных аппаратов: аппараты периодического действия и аппараты непрерывного действия. В аппаратах непрерывного действия горячий воздух вдувается в сушильную камеру снизу, с элеваторной ленты, высушиваемый материал непрерывно перемещается между элеваторной лентой и сушильной камерой, до тех пор пока влажность материала не достигнет требуемого значения. Сушильные установки непрерывного действия имеют ряд преимуществ: для их размещения не требуется большое пространство, они имеют высокую производительность, при этом процесс сушки является непрерывным [11]. Исследование характеристик сушильных аппаратов непрерывного действия, выполненное в работе [11], необходимо продолжить.

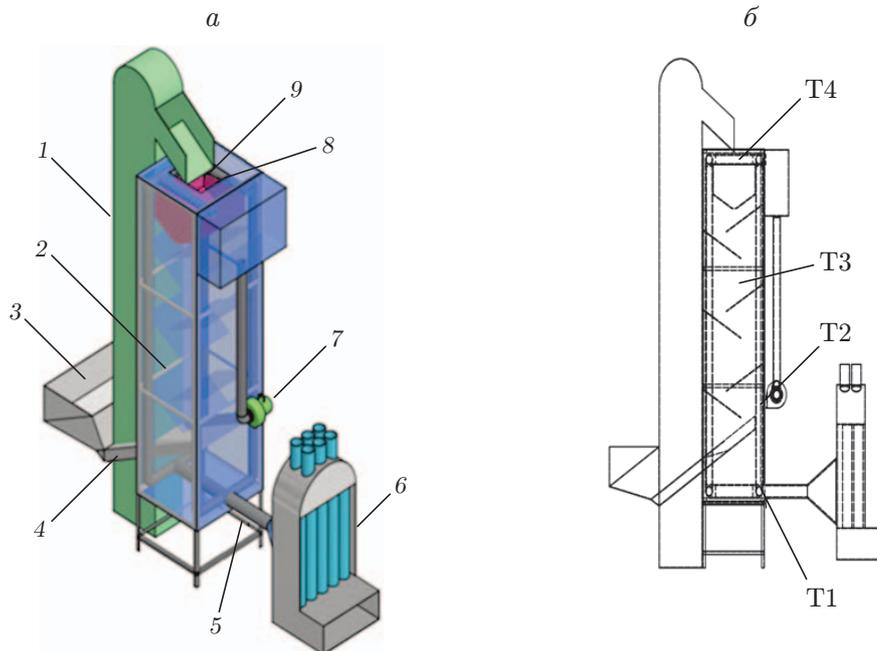


Рис. 1. Схема экспериментальной установки (а) и расположение термопар (б): 1 — элеватор, 2 — сушильная камера, 3 — отверстие для подачи материала, 4 — выход материала, 5 — воздуховод, 6 — нагреватель воздуха, 7 — вентилятор, 8 — выход воздуха, 9 — вход в сушильную камеру; Т1 — термопара, измеряющая температуру горячего воздуха на входе, Т2 — термопара, измеряющая температуру воздуха, поступающего в сушильную камеру, Т3 — термопара, измеряющая температуру в сушильной камере, Т4 — термопара, измеряющая температуру воздуха на выходе из камеры

1. Экспериментальная установка и метод экспериментального исследования. Схема экспериментальной установки показана на рис. 1. Такая же установка использовалась в экспериментах [12]. Основными элементами установки являются сушильная камера, вентилятор, элеватор, нагреватель, воздуховод горячего воздуха. Горячий воздух проходит в воздуховоде, расположенном внутри сушильной камеры. Часть тепла выходит из воздуховода в сушильную камеру вследствие теплопроводности и конвекции. В конце воздуховода находится вентилятор, который всасывает воздух внутрь воздуховода и подает его в сушильную камеру. В сушильной камере горячий воздух попадает на высушенный материал. Скорость воздуха, измеряемая на входе в воздуховод, поддерживается постоянной за счет непрерывного вращения вентилятора. Влажность горячего воздуха составляла приблизительно 35 % при температуре $T \approx 60$ °С. Через каждые 15 мин испытываемый образец массой 10 г извлекался для проверки его влажности. Количество циклов зависело от массы: при массе 10 кг для процесса сушки требовалось приблизительно 40 циклов, при массе 20 кг — 55 циклов, а при массе 30 кг — 63 цикла.

Температура измерялась термопарами К-типа с погрешностью $\pm 0,5$ °С. Масса риса в диапазоне измерения $0 \div 5$ кг определялась с помощью цифровых весов SF-400с с погрешностью $\pm 0,01$ г, а скорость воздуха в диапазоне измерения $0 \div 30$ м/с определялась с помощью анемометра HoldPeak HP-866B Mini LCD с погрешностью $\pm 0,01$ м/с. Влажность определялась с помощью прибора GMK303A с разрешением 0,1 % и с погрешностью измерения $\pm 0,5$ %.

Размеры вертикальной сушилки равны $3000 \times 600 \times 600$ мм. Вентилятор предназначен для обеспечения циркулирования горячего воздуха внутри экспериментальной установки. Скорость воздуха составляла приблизительно 5 м/с при температуре $T = 60$ °С.

До проведения эксперимента были определены характеристики риса. Рис, имеющий влажность $20,0 \pm 0,5$ %, взвешивался при каждом изменении его массы. Если влажность была меньше 20 %, то рис дополнительно замачивался, если влажность была больше 20 %, то он дополнительно высушивался. После подготовки риса начинался процесс его сушки в вертикальной сушильной установке непрерывного действия.

Влажность определялась с использованием влагомера. Однако ее также можно определить по формуле [10, 11]

$$K_a = \frac{m_t - m_k}{m_t} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где K_a — влажность, %; m_t — общая масса вещества, кг; m_k — масса сухого вещества, кг [10]:

$$m_k = m_t(1 - K_{ai}), \quad (2)$$

K_{ai} — начальная влажность вещества.

Эффективность процесса высушивания является одним из параметров, определяющих производительность экспериментального стенда. Этот параметр равен отношению полезной энергии к затраченной энергии. Для определения влажности с использованием уравнений (1), (2) требуется выполнить несколько дополнительных операций. Для определения влажности образца, извлекаемого из экспериментальной установки, его нужно высушивать до тех пор, пока его масса не перестанет изменяться. Поэтому в данной работе влажность определялась с использованием влагомера.

Выражение для полной энергии в экспериментальной установке можно представить следующим образом [13–15]:

$$E = E_1 + E_2 + E_3. \quad (3)$$

Здесь E — полная энергия, Дж; E_1 — осязаемая (sensible) энергия вещества, Дж; E_2 — энергия, расходуемая на увеличение температуры воды в веществе, Дж; E_3 — латентная энергия, расходуемая на испарение воды в веществе, Дж. Согласно [13] выражение для осязаемой энергии записывается в виде

$$E_1 = m_k c_p (T_p - T_i), \quad (4)$$

где c_p — удельная теплоемкость вещества, Дж/(кг·К); T_i — начальная температура вещества, °С; T_p — конечная температура вещества, °С.

Энергию, затрачиваемую на нагревание воды в веществе, можно определить по формуле [10, 13]

$$E_2 = m_a c_{pa} (T_p - T_i), \quad (5)$$

где m_a — масса воды в веществе, равная m_t ; c_{pa} — удельная теплоемкость воды в веществе, Дж/(кг·К). Энергия, расходуемая на испарение воды в веществе, вычисляется следующим образом [10, 13]:

$$E_3 = m_{ar} h_{fg}. \quad (6)$$

Здесь h_{fg} — латентная энергия, Дж/кг; m_{ar} — масса испарившейся воды, кг.

Объемная скорость горячего воздуха, поступающего в экспериментальную установку, определяется по формуле [10]

$$\dot{v} = VA, \quad A = S^2,$$

где \dot{v} — объемная скорость, м³/с; S — длина стороны прямоугольного поперечного сечения сушильной камеры, м; A — площадь поперечного сечения сушильной камеры, м²; V — скорость воздуха, м/с.

Объем воздуха в сушильной камере вычисляется следующим образом [10]:

$$v = \dot{v} \Delta t,$$

где Δt — время сушки, с. Энергию, передаваемую в сушильную камеру горячим воздухом, можно вычислить по формуле [10, 11]

$$E_u = \rho_u v c_{pu} (T_m - T_k). \quad (7)$$

Здесь ρ_u — плотность горячего воздуха, кг/м³; c_{pu} — удельная теплоемкость горячего воздуха, Дж/(кг·К); T_m — средняя температура воздуха, поступающего в сушильную камеру, °С; T_k — средняя температура воздуха, выходящего из сушильной камеры, °С.

В данной работе изучалась эффективность (коэффициент полезного действия (КПД)) сушильной установки

$$\eta = \frac{E}{E_u} \cdot 100 \%. \quad (8)$$

Результаты исследования параметра η приведены в работах [10, 11, 13–16].

Масса испарившейся из вещества воды определяется по формуле

$$m_{ar} = m_t K_{ai} - m_t K_{af},$$

где K_{af} — остаточная влажность вещества, приближенно равная 14 %.

2. Результаты исследования и их обсуждение. На рис. 2 приведены зависимости влажности высушиваемого материала от времени. При $t > 2000$ с эти зависимости существенно различаются.

В материале массой 10 кг влажность, равная 14 %, достигается приблизительно через 3000 с, в материале массой 20 кг — через 4250 с, в материале массой 3 кг — через 4900 с. Влажность высушиваемого материала исследовалась также в работах [2, 6–9, 16, 17].

Зависимости массы воды в высушиваемом материале от времени приведены на рис. 3. Угол наклона кривых на рис. 3 соответствует углу наклона кривых на рис. 2. Аналогичные зависимости получены в работе [18] для случая сушки риса в гибридной установке, в которой используются солнечный и тепловой насосы. Автор работы [18] использовал сушильную установку с псевдосжиженным слоем, а не вертикальную сушильную установку.

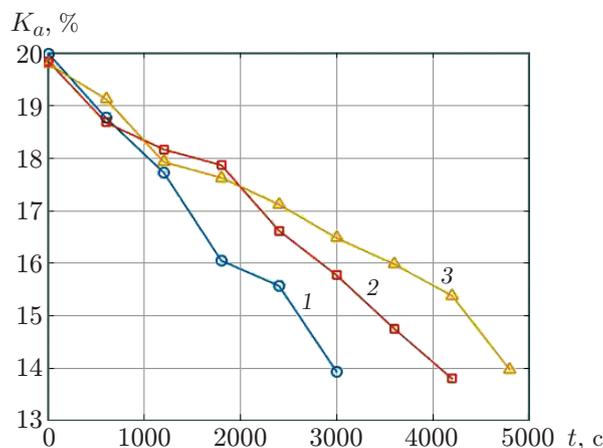


Рис. 2. Зависимости влажности высушиваемого материала массой m_t от времени:

1 — $m_t = 10$ кг, 2 — $m_t = 20$ кг, 3 — $m_t = 30$ кг

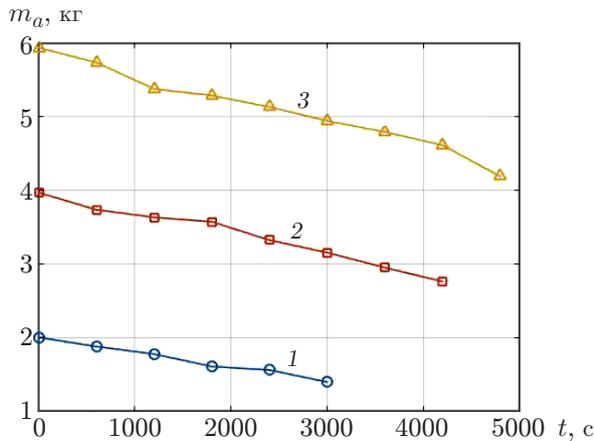


Рис. 3

Рис. 3. Зависимости массы воды, содержащейся в высушиваемом материале, от времени:

1 — $m_t = 10$ кг, 2 — $m_t = 20$ кг, 3 — $m_t = 30$ кг

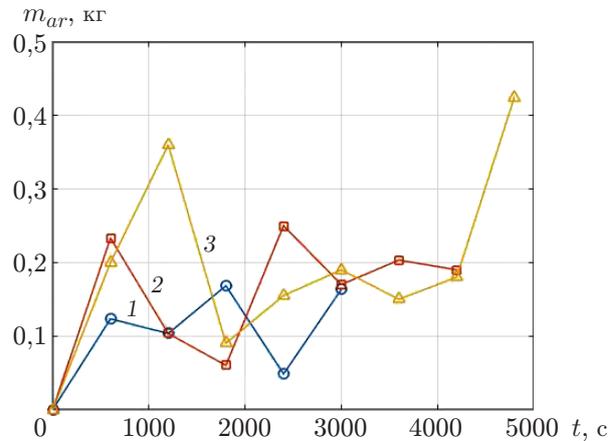


Рис. 4

Рис. 4. Зависимость массы испарившейся жидкости от времени:

1 — $m_t = 10$ кг, 2 — $m_t = 20$ кг, 3 — $m_t = 30$ кг

С помощью зависимостей, приведенных на рис. 3, можно вычислить массу испарившейся жидкости. Зависимости массы испарившейся жидкости от времени приведены на рис. 4. В случае, когда масса материала составляет 10 кг, кривая зависимости массы испарившейся воды от времени имеет зигзагообразный характер. В этом случае в середине процесса сушки масса испарившейся воды составляет 0,12 кг, а общая масса испарившейся воды — 0,61 кг. В случаях, когда масса материала составляет 20 и 30 кг, кривые зависимости массы испарившейся воды от времени также имеют зигзагообразный характер. В случае, когда масса материала равна $m_t = 20$ кг, в середине процесса сушки масса испарившейся воды составляет 0,17 кг, а общая масса испарившейся воды — 1,21 кг. В случае $m_t = 30$ кг в середине процесса сушки масса испарившейся воды составляет 0,22 кг, а общая масса испарившейся воды — 1,75 кг.

Используя зависимости, приведенные на рис. 3, можно определить скорость сушки (массу испарившейся жидкости в единицу времени). В случае, когда масса материала равна $m_t = 10$ кг, скорость сушки составляет $\dot{m}_{ar} = 0,728$ кг/ч, при $m_t = 20$ кг $\dot{m}_{ar} = 1,04$ кг/ч, при $m_t = 30$ кг $\dot{m}_{ar} = 1,3$ кг/ч. Таким образом, зависимость скорости сушки от массы высушиваемого материала является нелинейной. При увеличении массы высушиваемого материала приблизительно на 100 % скорость сушки увеличивается на 42,5 %, при увеличении массы высушиваемого материала с 20 до 30 кг скорость сушки увеличивается на 26,5 %. Если скорость сушки разделить на массу высушенного материала, то получим скорость сушки материала массой 1 кг: для материала массой 10 кг скорость сушки равна 0,091 кг/ч, для материала массой 20 кг — 0,065 кг/ч, для материала массой 30 кг — 0,055 кг/ч.

В данной работе перенос тепла зависит от энергий E , E_1 , E_2 , E_3 , E_u . На рис. 5 приведена зависимость температуры от времени. Температура горячего воздуха на входе T_1 незначительно изменяется со временем, что обусловлено сложностью управления нагревательной печью. Температура поступающего в сушильную камеру воздуха T_2 , температура в сушильной камере T_3 и температура воздуха на выходе из камеры T_4 практически постоянны. Температуры T_1 , T_2 , T_3 , T_4 практически не зависят от массы высушиваемого материала.

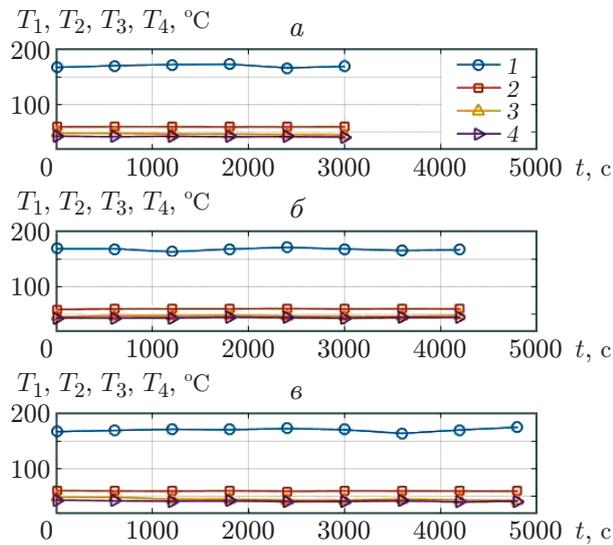


Рис. 5

Рис. 5. Зависимости температур T_1 (1), T_2 (2), T_3 (3) и T_4 (4) в сушильной установке от времени:

a — $m_t = 10$ кг, b — $m_t = 20$ кг, v — $m_t = 30$ кг

Рис. 6. Зависимости энергий E_1 (1), E_2 (2), E_3 (3) и полной энергии E (4), затрачиваемых на сушку материала, от времени:

a — $m_t = 10$ кг, b — $m_t = 20$ кг, v — $m_t = 30$ кг

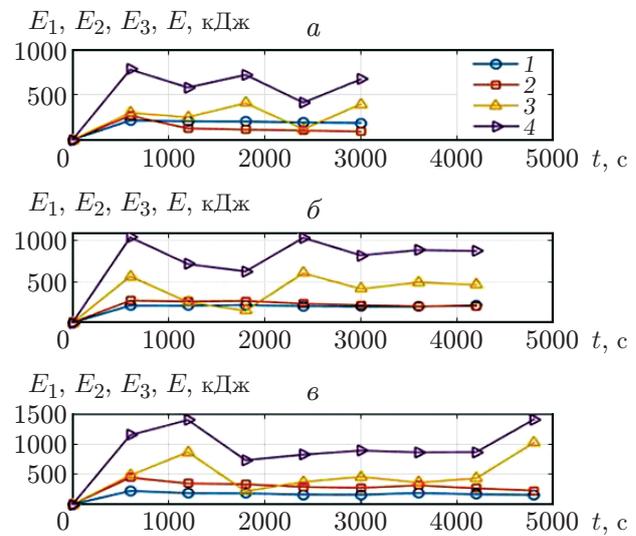


Рис. 6

Энергия E_1 вычисляется с использованием уравнения (4), зависящего от начальной T_i и конечной T_p температур материала. Температура T_i определяется до поступления материала в сушильную установку, а температура T_p измеряется непосредственно и совпадает с температурой T_3 . Энергия E_2 , расходуемая на нагревание содержащейся в материале воды, определяется с использованием уравнения (5). Наконец, энергия E_3 , расходуемая на испарение воды, зависит от массы испарившейся воды и может быть определена с помощью уравнения (6). Зависимости энергий E_1 , E_2 , E_3 и полной энергии E , затрачиваемых на сушку материала, от времени, полученные с использованием уравнений (3)–(6), приведены на рис. 6. Энергии, затрачиваемые на повышение температуры материала, практически одинаковы при различных значениях массы высушиваемого материала и практически постоянны во времени. Однако энергия, затрачиваемая на испарение воды, меняется во времени и зависит от массы высушиваемого материала. Поэтому общая энергия также зависит от времени. Эта зависимость зависит от массы испарившейся воды (см. рис. 3).

Энергия E_u , передаваемая в сушильную установку горячим воздухом, определяется с использованием уравнения (7). Результаты вычислений приведены на рис. 7. Для трех значений массы высушиваемого материала значения энергии, передаваемой горячим воздухом, практически одинаковы, что обусловлено регулировкой температуры воздуха на входе. Установить постоянную температуру воздуха на входе можно только в том случае, если нагреватель является электрическим и управляется с помощью PID-регулятора (регулятора с обратной связью). В данном исследовании в качестве нагревателя использовалась газовая горелка. Скорость теплопереноса со временем уменьшается. Зависимость скорости теплопереноса от времени, приведенная на рис. 7, может быть получена с использованием уравнения [13, 14]

$$Q_u = E_u/t.$$

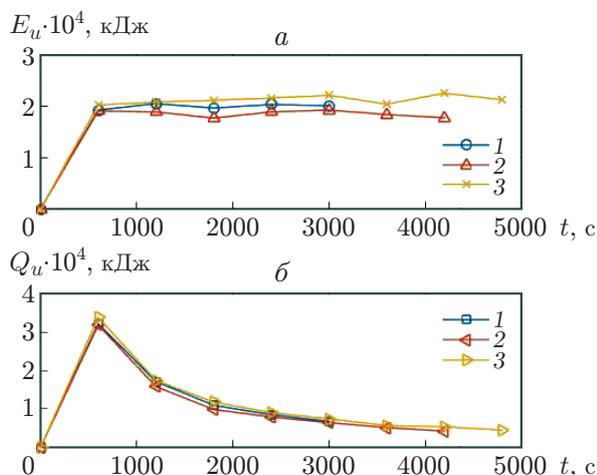


Рис. 7

Рис. 7. Зависимости от времени энергии E_u , передаваемой горячим воздухом (а), и скорости переноса тепла Q_u (б) от времени:

1 — $m_t = 10$ кг, 2 — $m_t = 20$ кг, 3 — $m_t = 30$ кг

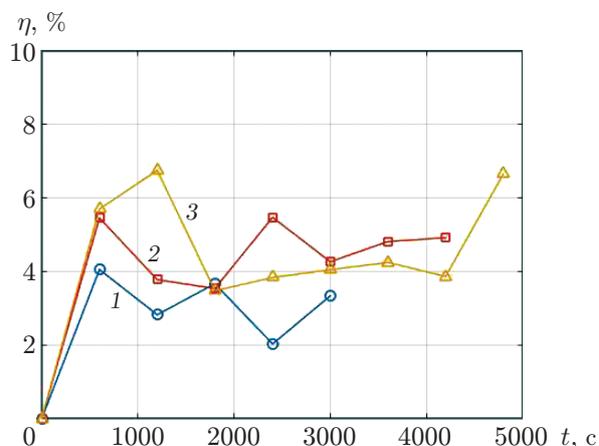


Рис. 8

Рис. 8. Зависимость КПД установки от времени:

1 — $m_t = 10$ кг, 2 — $m_t = 20$ кг, 3 — $m_t = 30$ кг

КПД вычисляется в соответствии с уравнением (8). Зависимости КПД установки от времени t приведены на рис. 8. С использованием этих зависимостей можно получить средние значения КПД. В случае массы высушиваемого материала $m_t = 10$ кг КПД составляет 3,17 %, в случае $m_t = 20$ кг — 4,6 %, в случае $m_t = 30$ кг — 4,8 %. Таким образом, эффективность сушильной установки невелика. Для того чтобы увеличить КПД сушильной установки, необходимо проведение дополнительных исследований.

Заключение. Выполнено экспериментальное исследование характеристик вертикальной сушильной установки непрерывного действия, используемой для сушки риса. Установлено, что при любой массе высушиваемого материала его влажность уменьшается со временем. При увеличении массы высушиваемого материала время сушки увеличивается, а ее скорость уменьшается. Для определения влияния массы высушиваемого материала на КПД сушильной установки необходимо проводить дополнительные исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Adebowale A. A., Fetuga G. O., Apata C. B., Sanni L. O.** Effect of variety and initial moisture content on physical properties of improved millet grains // Nigerian Food J. 2012. V. 30, N 1. P. 5–10.
2. **Syahrul S., Mirmanto M., Hartawan Y., Sukmawaty S.** Effect of air intake temperature on drying time of unhulled rice using a fluidized bed dryer // Heat Mass Transfer. 2019. V. 55, N 2. P. 293–298.
3. **Rahayoe S.** Teknik pengeringan. Yogyakarta: Univ. Gadjah Mada, 2017.
4. **Graciafernandy M. A., Ratnawati R., Buchori L.** Pengaruh suhu udara pengering dan komposisi zeolit 3a terhadap lama waktu pengeringan gabah pada fluidized bed dryer // J. Ilmiah Momentum. 2012. V. 8, N 2. P. 6–10.
5. **Rhomdani R.** Pengaruh variasi kecepatan udara dan massa bahan terhadap waktu pengeringan jagung pada alat fluidized bed. Mataram: Teknik Univ., 2016.

6. **Djaeni M., Aishah N., Nissaulfasha H., Buchori L.** Corn drying with zeolite in the fluidized bed dryer under medium temperature // J. Technol. Sci. 2013. V. 24, N 2. P. 1–6.
7. **Palled V., Desai S. R., Anantachar M.** Performance evaluation of solar tunnel dryer for chilly drying // Karnataka J. Agricultural Sci. 2012. V. 25, N 4. P. 472–474.
8. **Mirmanto M., Sulistyowati E. D., Okariawan I. D. K.** Effect of radiator type on dryer room temperature distribution and heat transfer rate // JP J.Heat Mass Transfer. 2016. V. 13, N 4. P. 512–532.
9. **Mirmanto M., Syahrul S., Sulistyowati E. D., Okariawan I. D. K.** Effect of inlet temperature and ventilation on heat transfer rate and water content removal of red chili // J. Mech. Sci. Technol. 2017. V. 31, N 3. P. 1531–1537.
10. **Syahrul S., Mirmanto M., Ramdoni S., Sukmawaty S.** Pengaruh kecepatan udara dan massa gabah terhadap kecepatan pengeringan gabah menggunakan pengering terfluidisasi // J. Dinamika Teknik Mesin. 2017. V. 7, N 1. P. 54–59.
11. **Margana C. C. E., Sukmawaty S.** Karakterisasi dan simulasi mesin pengering gabah tipe vertikal kontinyu dengan aliran udara panas berlawanan. Mataram: Univ. Mataram, 2010. [Электрон. ресурс]. Режим доступа: <https://www.academia.edu/2946895>.
12. **Syahrul S., Cahyono A. D., Mirmanto M., et al.** The effect of grain mass variations on drying time by adding a pipe heat exchanger to a fluidized bed dryer // AIP Conf. Proc. 2019. V. 2199. P. 040011-1–040011-6.
13. **Holman J. P.** Heat transfer. S. l.: McGraw-Hill, 2002.
14. **Incropera F.** Fundamentals of heat and mass transfer. 6th ed. / F. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, A. S. Lavine. Hoboken: John Wiley and Sons, 2006.
15. **Cengel Y. A.** Heat transfer a practical approach. 2nd ed. N. Y.: McGraw-Hill, 2003.
16. **Sukmawaty S., Astuti Y., Sabani R., et al.** Measurement and comparison with the existing published model of minimum air velocity and pressure drop of a fluidized bed dryer for drying corn // Intern. J. Mech. Engng Technol. 2018. V. 9, N 11. P. 1501–1510.
17. **Kumar A., Kumar V., Khan K., Kumar A.** Experimental investigation on drying of mint leaves (m. pulegium) in a solar tunnel dryer // Intern. J. Pure Appl. Biosci. 2017. V. 5, N 2. P. 682–689.
18. **Yahya M.** Performance analysis of solar-assisted fluidized bed dryer integrated biomass furnace with and without heat pump for drying of paddy // Intern. J. Photoenergy. 2016. N 2. P. 1–17.

*Поступила в редакцию 18/II 2020 г.,
после доработки — 18/VI 2020 г.
Принята к публикации 29/VI 2020 г.*
