

УДК 662.63

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМООБРАБОТКИ РАСТИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ТРУБЧАТЫХ РЕАКТОРАХ

ГОЛУБКОВИЧ А.В.¹,
ДОКТ. ТЕХН. НАУК,

ПЕХАЛЬСКИЙ И.А.¹,
КАНД. ТЕХН. НАУК,

ДАДЫКО А.И.¹,
АСПИРАНТ,

ЧИЖИКОВ А.Г.²,
КАНД. ТЕХН. НАУК

¹Всероссийский научно-исследовательский институт, механизации сельского хозяйства, 1-й Институтский проезд, 5, Москва, 109428, Российская Федерация, e-mail: 5895225@bk.ru,

²Всероссийский научно-исследовательский институт электрификации сельского хозяйства, 1-й Вешняковский пер., 2, Москва, 109456, Российская Федерация

В сельском хозяйстве продукты пиролиза растительных материалов в виде отходов основного производства можно применять в качестве источника тепла и электроэнергии. Кроме того, их использование предотвращает экологическое загрязнение почвы и атмосферы. Пиролизные установки с трубчатыми реакторами пригодны для работы в любом хозяйстве. С их помощью можно сушить зерно, используя бросовое тепло дизель-генераторов, теплогенераторов, котельных и получая при этом газообразные продукты, жидкую и твердую фракции. Показали, что в основе технологии лежит циклично-непрерывное перемещение растительной массы поршнем внутри трубы от участка загрузки до места выгрузки твердой фазы последовательно через камеры сушки, пиролиза, конденсации газообразных продуктов. Отметили, что противотоком перемещению материала от энергетического оборудования подают отработанные топочные газы с температурой до 600 градусов Цельсия. Из камеры пиролиза отводят газообразные, жидкие и твердые продукты, используемые для выработки теплоты и электроэнергии. Выявили, что для эффективной и устойчивой работы трубчатого реактора необходим расчет параметров камер подсушки и пиролиза. Определили скорость перемещения сырья, а также продолжительность сушки и пиролиза в рабочих камерах. Подтвердили экспериментально результаты анализа упрощенной математической модели процесса. Предложили модели термообработки влажных растительных материалов в трубчатых реакторах на основе равенства скоростей перемещения материала в реакторе и распространения температурного фронта в материале по радиусу. Привели расчетные характеристики для вычисления производительности трубчатого реактора и величины теплоты, потребной для сушки и пиролиза.

Ключевые слова: растительные материалы, пиролиз, подсушка, отбросное тепло, трубчатый реактор, теплообмен.

Вопросы сушки соломы и зерна имеют важные народнохозяйственное значение. Наряду с инновационными технологиями и техническими средствами для повышения эффективности сушки зерна следует использовать альтернативные источники тепла [1-5].

В сельском хозяйстве, продукты пиролиза растительных материалов (РМ) могут служить источником тепла и электроэнергии. При этом предотвращается экологическое загрязнение почвы и ат-

мосферы. Пиролизные установки с трубчатыми реакторами способны нагревать сырье бросовым теплом дизель-генераторов, теплогенераторов, котельных с получением газообразных продуктов, жидкой и твердой углеподобной фракции [6].

Известны технология и устройство для термообработки РМ с получением тепловой энергии и электричества, которые могут быть использованы в сельскохозяйственных предприятиях на собственные нужды [7, 8].

Суть технологии заключается в циклично-непрерывном перемещении поршнем массы РМ внутри трубы от участка загрузки до места выгрузки твердой фазы последовательно через камеры сушки, пиролиза, конденсации газообразных продуктов.

Из камеры пиролиза отводят газообразные и жидкие продукты, используемые для выработки электроэнергии и теплоты, а твердая фаза представляет собой высококалорийный продукт.

Цель исследования – расчет длительности просушки, пиролиза, производительности и теплоты, потребной для пиролиза в трубчатом реакторе.

Материалы и методы. В трубе диаметром D длиной L подвергают пиролизу РМ. В кожух трубы прямооток или противоток движению материала подают топочные газы. С одной стороны трубы материал загружают, с другой – выводят твердую фракцию. Перемещение материала осуществляют поршнем, который периодически отводят назад, и загружают новую порцию РМ. По ходу трубы РМ прогревается, сушится, подвергается пиролизу, газообразные продукты выводятся и конденсируются с получением жидкой фракции, а твердую фракцию после охлаждения разгружают (рисунком).

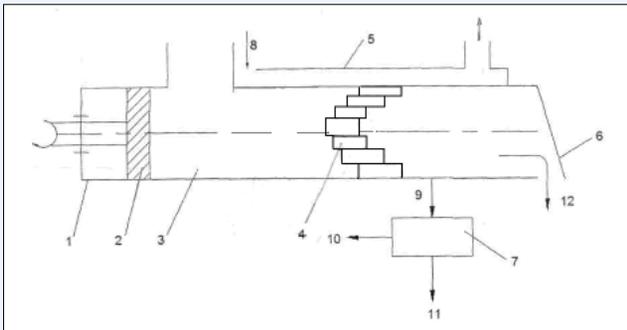


Рис. Технологическая схема трубчатого реактора пиролизной установки:

1 – труба-пиролизер; 2 – поршень; 3 – загрузочная камера; 4 – РМ (элементарные слои); 5 – кожух; 6 – разгрузочное устройство; 7 – конденсатор; 8 – топочные газы; 9 – газообразные продукты пиролиза; 10 – несконденсированные газы; 11 – жидкая фракция; 12 – твердая фракция

Вначале происходит термообработка элементарного слоя РМ, прилегающего к внутренней поверхности трубы, затем следующего слоя и т.д., при этом фронт термообработки перемещается как по радиусу, так и по длине трубы. На выходе разгружают охлажденный твердый остаток, масса которого равна массе сырья за вычетом масс газообразных продуктов пиролиза. Тепло РМ передается кондуктивно от греющей поверхности, но при этом учитывают конвективную составляющую от выделения газообразных продуктов.

Затраты тепла на испарение влаги из РМ приемлемы равными затратам тепла на испарение со свободной поверхности воды. Потерями тепла в окружающую среду пренебрегаем, так как кожух реактора пиролиза теплоизолирован.

Поставленная задача не имеет однозначного решения, что обусловлено рядом усложняющих обстоятельств. Во-первых, взаимодействие потока энергии описывается системой нескольких нелинейных дифференциальных уравнений. Эти уравнения содержат ряд коэффициентов, определение которых затруднено вследствие недостаточной изученности протекающих явлений. Во-вторых, сам процесс термодеструкции включает закономерности сушки, сублимации и эндотермических реакций пиролиза. Поэтому приемлемый метод решения – создание и анализ упрощенной математической модели процесса, подтвержденный результатами экспериментов [9, 10].

Для эффективной и устойчивой работы трубчатого реактора необходимо определить оптимальные параметры камер сушки и пиролиза. Этот расчет, в частности, можно выполнить, учитывая оптимальную скорость перемещения сырья и продолжительность процессов сушки и пиролиза в камерах.

Результаты и обсуждение. Установили, что скорость V_n перемещения РМ в трубчатом реакторе должна соответствовать скорости распространения температурного фронта в материале по радиусу. Это обусловлено тем, что на выходе по сечению трубы будет обеспечена одинаковая величина термического превращения РМ, что необходимо, в частности, для непрерывной подачи газообразных продуктов пиролиза потребителю.

Зная величину V_n и рассчитав время сушки τ_c и пиролиза τ_n , можно определить производительность Π и потребную теплоту Q .

Рассматривая элементарный слой материала высотой h_3 , подвергаемого пиролизу, запишем величину V_n :

$$V_n = \frac{a}{h_3},$$

где a – коэффициент температуропроводности, $\text{м}^2/\text{ч}$;
 h_3 – высота элементарного слоя сырья, м ;

$$h_3 = \frac{d_3}{\sqrt[3]{\eta_0}},$$

где d_3 – эквивалентный диаметр частицы, м ;

η_0 – коэффициент термического превращения РМ (отношение массы исходного сухого материала к твердой фазе).

Эффективный пиролиз возможен в сухом материале. Кроме того, продукты пиролиза должны со-

держат минимальное количество паров, поэтому при использовании влажных РМ необходима предварительная подсушка.

При кондуктивной сушке тепло РМ передается как свободной конвекцией, так и теплопроводностью. Так как РМ имеет повышенную порозность ($\varepsilon \geq 0,5$), передача тепла теплопроводностью менее эффективна, чем конвекцией, которую и примем за основу. Длительность сушки РМ в трубчатом реакторе τ_c можно записать в виде [9]:

$$\tau_c = \frac{\Delta U r R}{\sqrt{2} \alpha_c f_1 (T_1 - \theta_{cp1}) d_3 \eta},$$

где ΔU – влагосъем, кг вл./кг сух. мат.;

r – удельная теплота испарения влаги, кДж/кг;

R – диаметр трубы, м;

α_c – коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции, Вт/м²·°С;

f_1 – удельная поверхность частицы РМ, м²/кг;

T_1, θ_{cp1} – температура греющей поверхности и средняя температура материала, °С;

d_3 – эквивалентный размер частицы РМ, м;

η – доля теплоты, пошедшая на испарение влаги.

При движении поршня частицы РМ сжимаются и заполняют поры нижерасположенных слоев, тем самым повышая теплопроводность и поверхность теплообмена. Перемещение поршня уплотняет и прижимает непиролизированный материал к греющей поверхности, пока фронт пиролиза достигнет центра трубы.

Тепломассоперенос в кольцевом слое при пиролизе в трубе диаметром R можно записать:

$$q = \frac{\sqrt{2} (T_1 - \theta_{cp}) \lambda}{R}, \quad (1)$$

где q – поток теплоты, Вт/м²;

T_1, θ_{cp} – температура греющей поверхности и средняя температура слоя, подвергаемого пиролизу,

$$\theta_{cp} = \frac{(T_1 - \theta_0)}{2}$$

(здесь θ_0 – начальная температура РМ, °С);

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·°С.

Величину q можно представить в виде:

$$q = \frac{\Delta U^* q_0 G_0 \eta_1}{F_0 \tau_{п}}, \quad (2)$$

где $\Delta U^* = 1 - \eta_0$ – содержание термонеустойчивой части РМ, разлагаемой при пиролизе, кг терм.неуст./кг сух.мат.;

q_0 – удельная теплота пиролиза (принимается равной теплотворной способности) РМ, кДж/кг;

$G_0 = G (1 - \eta_0)$ – масса материала, подвергающаяся пиролизу (G – начальная масса, кг);

$F_0 = F (1 - \varepsilon_0)$ – теплообменная поверхность (F – полная поверхность; ε – порозность слоя, м²);

$\tau_{п}$ – время пиролиза, ч.

Отношение F/G есть удельная поверхность частиц РМ в пограничном слое f , м²/кг.

Приравнивая правые части (1) и (2), запишем время пиролиза, ч:

$$\tau_{п} = \frac{\Delta U^* R q_0 (1 - \eta_0)}{\sqrt{2} f \lambda (T_2 - \theta_{cp2}) (1 - \varepsilon_0) \eta_1}, \quad (3)$$

где T_2, θ_{cp2} – температура греющей поверхности и средняя температура материала при пиролизе °С.

Определим длину сушильной камеры, м:

$$L_c = \frac{V_{п} \Delta U r R}{\sqrt{2} \alpha_c (T_1 - \theta_{cp1}) f_1 d_3 \eta}. \quad (4)$$

Этот же показатель для пиролизной камеры равен, м:

$$L_{п} = \frac{\Delta U^* R q_0 (1 - \eta_0)}{\sqrt{2} \lambda (T_2 - \theta_{cp2}) (1 - \varepsilon_0) f \eta_1}. \quad (5)$$

Производительность реактора Π можно определить, предварительно рассчитав вместимость сушильной камеры G_c в предположении, что устройство работает в непрерывном режиме (на самом деле поршень периодически отводится для загрузки новой партии РМ):

$$\Pi = A \frac{G_c}{\tau_c}, \quad (6)$$

где $G_c = 2\Pi R L_c \gamma$ (здесь γ – объемная масса РМ, кг/м³).

Потребные затраты теплоты на термообработку РМ можно найти из выражения:

$$Q = \kappa F_{\Sigma} (T_{п} - T_{к}), \quad (7)$$

где κ – коэффициент теплопередачи, Вт/м²·°С;

$F_{\Sigma} = 2\pi R (L_c + L_{п})$, м²;

$T_{п}, T_{к}$ – начальная и конечная температура топочных газов, подаваемых в кожух трубчатого реактора, °С.

Величину κ при скорости топочных газов 5-10 м/с можно принять примерно равной 15 Вт/м²·°С, значение $T_{к}$, по аналогии с высокотемпературными зерносушилками, приблизительно соответствует 70°С.

Выводы

При термообработке влажных растительных материалов в трубчатых реакторах можно получить теплоту и электроэнергию, используя тепловые отходы энергетических установок. Предложили расчетные характеристики для определения производительности трубчатого реактора и величины теплоты, потребной для сушки и пиролиза, на основе определения оптимальной скорости перемещения растительных материалов в трубе и длительности периодов сушки и пиролиза.

Литература

1. Голубкович А.В. Топки на растительных отходах: процессы, конструкции, режимы, расчеты. – М.: ВИМ, 2011. – 172 с.
2. Голубкович А.В., Чижиков А.Г. Обоснование методов расчета параметров пиролиза растительных материалов // Промышленная энергетика. – 2011. – № 12. – С. 52-53.
3. Лачуга Ю.Ф., Измайлов А.Ю., Зюлин А.Н. Разработка и внедрение высокоэффективных, ресурсо- и энергосберегающих технологий и технических средств послеуборочной обработки зерна и подготовки семян // Сельскохозяйственные машины и технологии». – 2009. – № 1. – С. 2-9.
4. Измайлов А.Ю., Лобачевский Я.П. Система технологий и машин для инновационного развития АПК России // Система технологий и машин для инновационного развития АПК России: Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. Ч.1. – М.: ВИМ, 2013. – С. 9-12.
5. Голубкович А.В., Чижиков А.Г. Расчет процесса пиролиза в трубчатых реакторах. – М.: РАСХН, 2013. – № 6. – С. 5-8.
6. Патент РФ № 2530057. Способ термической переработки органосодержащего сырья и устройство для его осуществления. Голубкович А.В., Чижиков А.Г., Павлов С.А., Измайлов А.Ю. 2014.
7. Павлов С.А., Левина Н.С., Елизаров О.В. Экспериментальные исследования реверсивной сушки семян гороха // Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации Государственной программы развития сельского хозяйства: Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – М.: ВИМ, 2015. – С. 357-360.
8. Павлов С.А. Обоснование безопасных скоростных режимов сушки семян // Интеллектуальные машинные технологии и техника для реализации Государственной программы развития сельского хозяйства: Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – М.: ВИМ, 2015. – С. 360-363.
9. Павлов С.А. Моделирование реверсивного режима сушки в колонковой сушилке // Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий: Сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. – М.: ВИМ, 2014. – С. 261-263.

INCREASE OF EFFICIENCY OF PLANT MATERIALS HEAT TREATMENT IN TUBULAR REACTORS

A.V. Golubkovich¹, I.A. Pekhal'skiy¹, A.I. Dadyko¹, A.G. Chizhikov²

¹All-Russia Research Institute of Mechanization for Agriculture, 1st Institut'skiy proezd, Moscow, 109428, Russian Federation, e-mail: 5895225@bk.ru

²All-Russian Scientific-Research Institute for Electrification of Agriculture, 1st Veshnyakovskiy proezd, 2, Moscow, 109456, Russian Federation

In agriculture products of pyrolysis of plant materials in the form of waste of the main production can be applied as a source of heat and electric power. Besides, their use prevents ecological pollution of the soil and the atmosphere. Pyrolysis plants can be used for work with tubular reactors anywhere. Due to them farmers can dry grain, using waste heat of diesel generators, heatgenerators, boiler plants and receiving thus gaseous products, liquid and firm fractions. A technology based on cyclic and continuous plant mass movement by a piston in a pipe from a loading site to a place of unloading of a firm phase consistently through cameras of drying, pyrolysis, condensation of gaseous products. Exhaust furnace gases with a temperature up to 600 degrees Celsius are given countercurrent material movement from a power equipment. The gaseous, liquid and firm products from the pyrolysis camera are used for heat and electric power generation. Calculation of parameters of subdrying and pyrolysis cameras is necessary for effective and steady operation of the tubular reactor. The authors determined the speed of raw materials movement, and also duration of drying and pyrolysis in working chambers. An analysis of a simplified mathematical model of process was confirmed with results of experiments. Models of heat treatment of wet plant materials in tubular reactors are worked out on a basis of equality of speeds of material movement in the reactor and distribution of a temperature front in material on radius. The authors defined estimated characteristic for determination of tubular reactor productivity and size of heat, required for drying and pyrolysis.

Keywords: Plant materials; Pyrolysis; Subdrying; Waste heat; Tubular reactor; Heat exchange.

References

1. Golubkovich A.V. Topki na rastitel'nykh otkhodakh: protsessy, konstruksii, rezhimy, raschety [Heat chambers on plant waste: processes, designs, modes, calculations]. Moscow: VIM, 2011. 172 pp. (Russian).
2. Golubkovich A.V., Chizhikov A.G. Obosnovanie metodov rascheta parametrov piroliza rastitel'nykh materialov [Justification of methods of calculation of

parameters of plant materials pyrolysis]. Promyshlennaya energetika. 2011. No. 12. pp. 52-53 (Russian).

3. Lachuga Yu.F., Izmaylov A.Yu., Zyulin A.N. *Razrabotka i vnedrenie vysokoeffektivnykh, resurso- i energosberegayushchikh tekhnologiy i tekhnicheskikh sredstv posleuborochnoy obrabotki zerna i podgotovki semyan [Development and adoption of highly effective, resource- and energy saving technologies and technical means for postharvest processing of grain and treatment of seeds]. Sel'skokhozyaystvennyye mashiny i tekhnologii. 2009. No. 1. pp. 2-9 (Russian).*

4. Izmaylov A.Yu., Lobachevskiy Ya.P. *Sistema tekhnologiy i mashin dlya innovatsionnogo razvitiya APK Rossii [System of technologies and machinery for innovative development of agrarian and industrial complex of Russia]. Sistema tekhnologiy i mashin dlya innovatsionnogo razvitiya APK Rossii: Sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Moscow: VIM, 2013. pp. 9-12 (Russian).*

5. Golubkovich A.V., Chizhikov A.G. *Raschet protsessa piroliza v trubchatykh reaktorakh [Calculation of pyrolysis process in tubular reactors]. Moscow: RASKhN, 2013. No. 6. pp. 5-8 (Russian).*

6. Patent RF № 2530057. *Sposob termicheskoy pererabotki organosoderzhashchego syr'ya i ustroystvo*

dlya ego osushchestvleniya [Way of thermal processing of organic raw materials and device for its implementation]. Golubkovich A.V., Chizhikov A.G., Pavlov S.A., Izmaylov A.Yu. 2014 (Russian).

7. Pavlov S.A., Levina N.S., Elizarov O.V. *Eksperimental'nye issledovaniya reversivnoy sushki semyan gorokha [Pilot studies of reverse drying of peas seeds]. Intellektual'nye mashinnye tekhnologii i tekhnika dlya realizatsii Gosudarstvennoy programmy razvitiya sel'skogo khozyaystva: Sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Moscow: VIM, 2015. pp. 357-360 (Russian).*

8. Pavlov S.A. *Obosnovanie bezopasnykh skorosnykh rezhimov sushki semyan [Justification of the safe speed modes of seeds drying]. Intellektual'nye mashinnye tekhnologii i tekhnika dlya realizatsii Gosudarstvennoy programmy razvitiya sel'skogo khozyaystva: Sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Moscow: VIM, 2015. pp. 360-363 (Russian).*

9. Pavlov S.A. *Modelirovanie reversivnogo rezhima sushki v kolonkovoy sushilke [Modeling of reverse mode of drying in the tower drier]. Innovatsionnoe razvitiye APK Rossii na baze intellektual'nykh mashinnykh tekhnologiy: Sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Moscow: VIM, 2014. pp. 261-263 (Russian).*

ПНЕВМОСОРТИРОВАЛЬНЫЕ МАШИНЫ

ВИМ 12/25



ВИМ 1 СЕЛЕКЦИЯ



производительность:
до 25 тонн в час

до 1 тонны в час