

О РЕЗУЛЬТАТАХ ИСПЫТАНИЯ И МЕТОДИКЕ РАСЧЕТА ВНОВЬ РАЗРАБОТАННОГО РЕАКТОРА ДЛЯ ПРЕДПИРОЛИЗА СОЛОМЕННЫХ ГРАНУЛ

С.Н. Кузьмин, О.Ю. Милованов

*ФГБОУ ВПО «Тамбовский государственный технический
университет», г. Тамбов*

Рецензент канд. техн. наук, профессор В.И. Ляшков

Ключевые слова и фразы: биотопливо; реактор предпи-
ролиза; термическая обработка.

Аннотация: Представлены результаты испытания вновь
разработанного реактора для предпиролиза соломенных гранул.
Показано, что температура процесса отжига не должна превы-
шать 240...250 °С для максимальной энергоэффективности
процесса, поскольку при более высоких температурах потери
массы превышают рост теплосодержания гранул. Продолжи-
тельность процесса отжига должна составлять 2500...3000 с.
Разработанный макет обеспечивает отжиг гранул из соломы
с энергоэффективностью не ниже 95 % при потерях массы
не более 6 %. При этом производительность реактора состав-
ляет 60 кг/ч. После отжига низшая теплота сгорания гранул
повышается на 14,2 %.

Обозначения: $A_{\text{эфф}}$ – эффективная площадь тарелки;
 ER – энергоэффективность процесса, %; $LHV_{\text{исх}}$, $LHV_{\text{тор}}$ – низ-
шая теплота сгорания гранул до и после отжига соответственно,
МДж/кг; H – высота лопастей мешалки, м; ω – скорость враще-
ния лопастей мешалки, мин^{-1} ; H_c – высота слоя, м; M – масса
порции, поступающая сверху на лопасть, кг; m – масса порции,
перемещаемая лопастью, кг; $m_{\text{исх}}$, $m_{\text{тор}}$ – масса гранул до и по-
сле отжига соответственно, кг; $N_{\text{ст}}$ – число тарелок; $N_{\text{лоп}}$ – число
лопастей мешалки; R – радиус реактора, м; R_c – радиус слоя, м;
 T – температура, °С; t – время, с; $t_{\text{нагр}}$ – время нагрева, необхо-
димое для достижения температуры отжига, с; t_o – температура
охлаждающей среды, °С; $t_{\text{обр}}^{\text{max}}$ – максимальное время пребыва-
ния в реакторе, с; $\varnothing$ – диаметр гранул, мм;

Кузьмин Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Гид-
равлика и теплотехника», директор Института дистанционного образования, e-mail:
admin@ido.tstu.ru; Милованов Олег Юрьевич – аспирант кафедры «Гидравлика и теплотех-
ника», ТамбГТУ, г. Тамбов.

Введение

Сегодня интенсифицируются исследования, направленные на повышение калорийности возобновляемых топлив, в том числе биомассы. Это вызвано необходимостью повышения экономической привлекательности проектов, связанных с переводом систем производства энергии с угля и жидкого топлива на альтернативные источники энергии. Процесс предпиролиза (отжиг или низкотемпературный пиролиз) осуществляется в среде с низкой концентрацией кислорода при температуре 200...300 °С. Содержание углерода после предпиролиза повышается, а содержание кислорода и водорода снижается, что обуславливает рост калорийности полученной твердой биомассы. При этом увеличение температуры и продолжительности процесса приводит к увеличению концентрации углерода и калорийности биомассы [1–3].

В мире имеется несколько действующих демонстрационных производств по предпиролизу биомассы, хотя интерес к этому процессу высок. При финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ нами реализуется проект по строительству демонстрационной установки для производства гранулированной соломы с последующим ее отжигом. Проект реализуется в г. Ростове-на-Дону совместно с ОАО «Продмаш». В результате должно быть создано производство соломенных гранул мощностью 2,5 т/ч (без отжига) и не менее 1,0 т/ч по отожженным гранулам.

Одной из стадий проекта является разработка и испытание макета реактора для предпиролиза биомассы. Результаты разработки и испытания этого макета изложены в данной публикации.

Принцип работы реактора для предпиролиза биомассы

Реактор для отжига биомассы (рис. 1) представляет собой вертикальный цилиндрический корпус, разделенный по высоте на тарелки, обогреваемые через стенки высокотемпературным органическим теплоносителем. Процесс предпиролиза разделен на две стадии: а) предпиролиз гранул; б) охлаждение гранул. Высокотемпературный теплоноситель нагревается в специальном котле и подается в рубашку реактора с температурой 255...265 °С, которая на 15 °С выше температуры в реакторе. Как показывают некоторые исследования, при такой температуре предпиролиза можно не создавать в реакторе бескислородную среду, так как при изменении концентрации кислорода в реакторе в пределах 6...21 % химический состав подвергнутой предпиролизу биомассы практически не меняется [4]. На второй стадии гранулы охлаждаются до температуры ниже 200 °С. Охлаждающей средой служит вода с температурой 15 °С на входе и $t_0 = 28$ °С на выходе из реактора.

Биогранулы поступают в верхнюю часть реактора и с помощью мешалки перемещаются по горизонтальной тарелке к выгрузному отверстию, через которое гранулы поступают в нижнюю, охлаждаемую часть реактора. Мешалка имеет две лопасти. Скорость вращения мешалки может регулироваться.

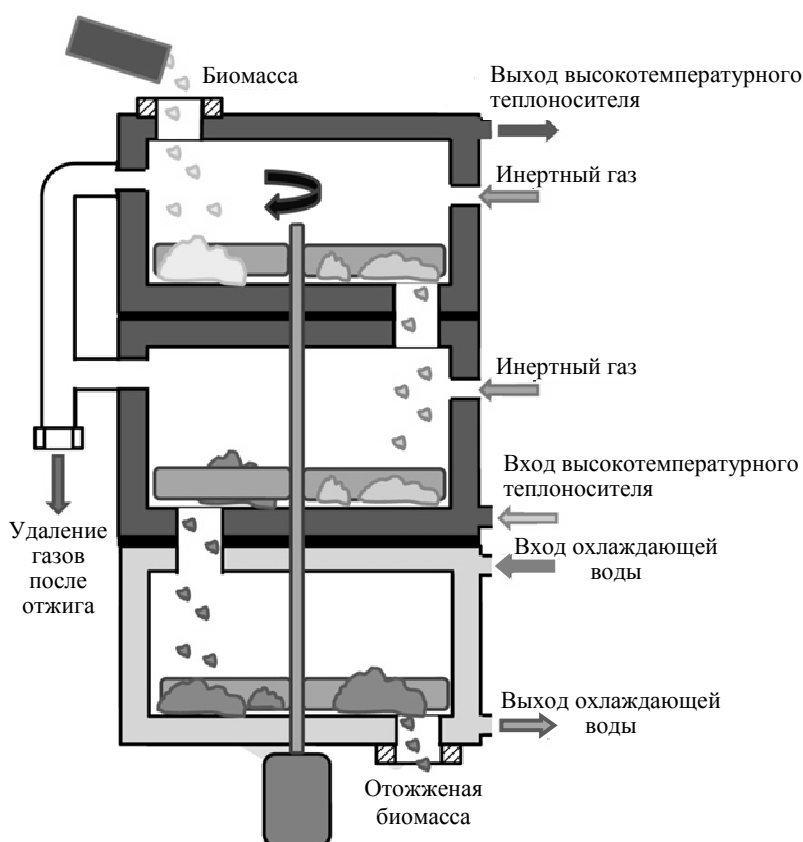


Рис. 1. Схема макета реактора для отжига биомассы

Принцип расчета макета реактора

Основными расчетными параметрами реактора данного типа являются: радиус реактора R ; число тарелок $N_{\text{ст}}$; число лопастей мешалки $N_{\text{лоп}}$; высота лопасти мешалки H ; скорость ее вращения ω и эффективная площадь тарелки $A_{\text{эфф}}$.

Приняты следующие исходные данные для расчета макета реактора: угол наклона лопасти мешалки к горизонту $\varphi - 36^\circ$; насыпная плотность гранул – 600 кг/м^3 ; максимальное время пребывания в реактора $t_{\text{обр}}^{\text{max}} - 7200 \text{ с}$.

Необходимые допущения для расчета макета пилотного реактора.

Примем долю эффективной площади тарелки $A_{\text{эфф}} = 83,4 \%$, отверстия есть на каждой тарелке, вся площадь тарелки покрывается лопастью мешалки, потерями массы гранул при отжиге пренебрегаем (рис. 2).

Объем гранул, перемещаемых по тарелке мешалкой (рис. 3), находим из уравнения

$$V(m^3) = \frac{R^2}{2} \int_0^H \text{tg}^{-1}(\gamma) dz, \quad (1)$$

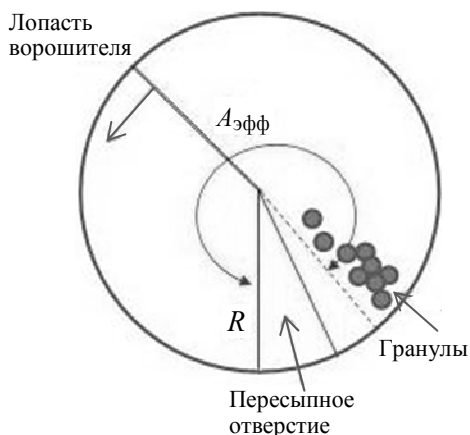


Рис. 2. Схема движения гранул на тарелке

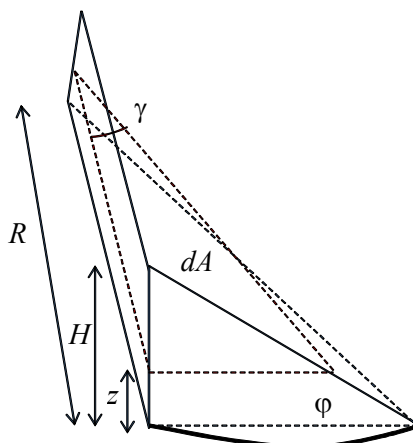


Рис. 3. Объем гранул, перемещаемых лопастью мешалки

где угол γ может быть рассчитан как

$$\gamma = \frac{\frac{(H-z)}{\operatorname{tg} \varphi} \sqrt{1 - \frac{(H-z)^2}{4R^2 \operatorname{tg}^2 \varphi}}}{R - \frac{(H-z)^2}{2R \operatorname{tg}^2 \varphi}}. \quad (2)$$

Считаем гранулы типичным гранулированным материалом. Конус из таких гранул характеризуется высотой H_c и радиусом R_c . Считаем, что в течение всего процесса $H_c < H$.

Параметрические исследования. Исследовалось влияние числа лопастей мешалки $N_{\text{лоп}}$, числа стадий процесса $N_{\text{ст}}$, радиуса реактора $R_{\text{лоп}} = R$ и высоты лопасти $H_{\text{лоп}} = H_c$ на время пребывания гранул в реакторе с помощью зависимости (3), полученной из (1) и (2)

$$\frac{t_{\text{обр}}}{N_{\text{ст}}} = \frac{2\pi(A_{\text{эфф}})}{\omega} \left(1 + \frac{1}{2N_{\text{лоп}}} \right). \quad (3)$$

На рисунке 4 представлен порядок расчета макета пилотного реактора для отжига биомассы. Всего были исследовано 16 вариантов с разным числом лопастей мешалки, числом ее оборотов и временем пребывания гранул в реакторе.

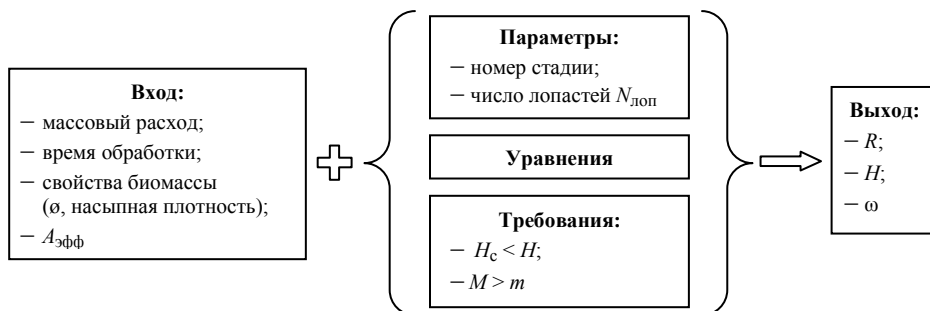


Рис. 4. Схема расчета макета реактора



Рис. 5. Внутренний вид макета реактора

В результате расчетов определены: оптимальный внутренний радиус реактора – 0,6 м; число лопастей мешалки – 2. Далее было принято: высота реактора – 0,8 м; число оборотов мешалки – $1 \dots 28 \text{ мин}^{-1}$. Внутренний вид макета реактора показан на рис. 5.

Результаты испытаний макета реактора

Эксперименты проводились с соломенными гранулами (табл. 1). На рисунке 6, а показана энергетическая эффективность ER процесса предпиролиза, оцененная по зависимости (4) на сухую беззольную массу при разной температуре процесса. В начале процесса ER возрастает, так как гранулы прогреваются, никаких изменений в их структуре и в химическом составе не происходит. Затем наблюдается падение ER после примерно часа пребывания в реакторе. Причем, чем выше температура процесса, тем быстрее падает ER .

$$ER = (m_{\text{тор}} LHV_{\text{тор}}) / (m_{\text{исх}} LHV_{\text{исх}}). \quad (4)$$

На рисунке 6, б показана зависимость потери массы порции гранул от длительности процесса отжига и температуры процесса; выделен участок времени ($0 < t < t_{\text{нагр}}$), которое необходимо для прогрева гранул до начала процесса отжига. Согласно данных [3], это время принято равным 1500 с.

Обобщая данные, представленные на рис. 6, можно сказать, что температура процесса отжига не должна превышать $240 \dots 250 \text{ }^\circ\text{C}$ для максимальной энергоэффективности процесса, поскольку при более высоких температурах потери массы превышают рост теплосодержания гранул. Продолжительность процесса отжига должна составлять $2500 \dots 3000 \text{ с}$.

Результаты отжига гранул из соломы при таких условиях представлены в табл. 2. Потери массы гранул при отжиге не превысили 5–6 %.

Таблица 1

Результаты анализа исходных соломенных гранул

Наименование показателя	Содержание (на сухую массу), %
Зола	7,48
Углерод	43,1
Водород	5,55
Азот	0,45
Хлор	0,094
Кислород	43,7
Низшая теплота сгорания, МДж/кг	16,67

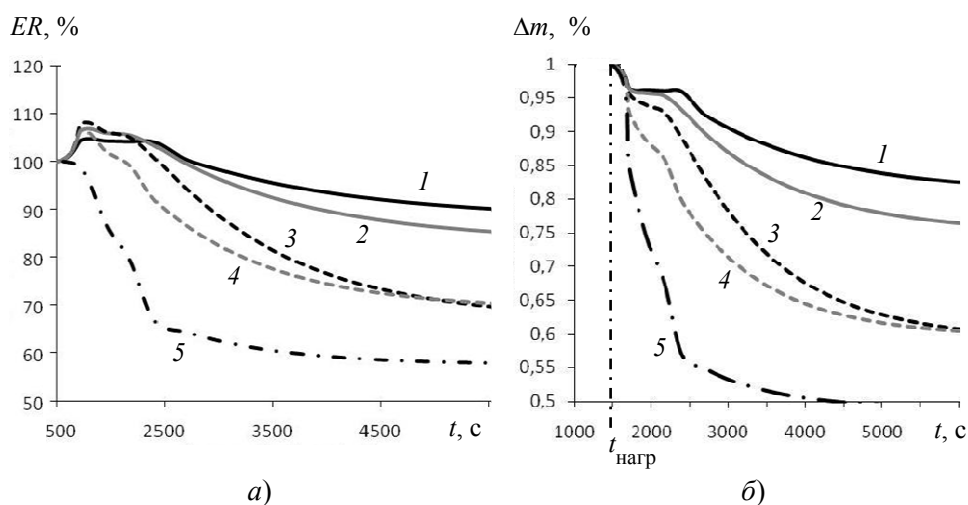


Рис. 6. Зависимости энергоэффективности процесса отжига ER (а) и потери массы образца при отжиге Δm (б) от длительности t процесса при различной температуре, °С: 1 – 240; 2 – 250; 3 – 260; 4 – 270; 5 – 280;

Таблица 2

Результаты анализа отожженных соломенных гранул

Температура отжига T , °С	Продолжительность процесса, мин	Химический состав, %			Низшая теплота сгорания, МДж/кг
		С	Н	О	
220	40	46,23	5,02	42,76	17,64
240	50	50,41	4,1	37,99	19,03

Приведенные в табл. 2 данные позволяют не только выявить оптимальный режим отжига, но и решать вопрос об экономической эффективности применения такой предварительной обработки пеллет, поскольку эта эффективность существенно зависит от величины потерь исходного топлива.

Действительно, в результате отжига в экспериментальной установке потеряно 6 % исходного топлива. Значит 1 кг обработанного топлива по массе эквивалентен 1,06 кг исходного топлива.

Тогда исходное топливо в количестве, эквивалентном обработанному, выделило бы при сгорании $16,67 \cdot 1,06 = 17,67$ МДж теплоты. Обработанное топливо выделяет 19,03 МДж теплоты. Значит общая эффективность обработки будет записана в виде

$$\delta = \frac{19,03 - 17,64}{17,64} \cdot 100 = 7,9 \text{ \%}.$$

Определим максимальный унос массы исходного топлива $U_{\max}$, при котором применение предварительной обработки его будет убыточным. Величина такого уноса из условия, что теплота сгорания одного килограмма необработанного топлива, эквивалентная 1 кг обработанного топлива, равна 19,03: $16,67 U_{\max} = 19,03$ МДж. Откуда $U_{\max} = 19,03 / 16,67 = 1,14$, то есть 14 %.

Заключение

Разработанный макет обеспечивает отжиг гранул из соломы с энергоэффективностью не ниже 95 % при потерях массы не более 6 %. При этом производительность реактора составляет 60 кг/ч. После отжига низшая теплота сгорания гранул повышается на 14,2 %.

Отметим, что при обработке с температурой 220 °С или при потерях массы более 14 % никакой эффективности не получается, только сплошные затраты на оборудование и эксплуатацию.

Разработанный макет является прототипом реактора мощностью 1 т/ч по отожженным гранулам, который строится нами в составе энерготехнологического комплекса по производству гранул, обладающих улучшенными технико-экономическими характеристиками, при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Список литературы

1. Chew, J.J. Recent Advances in Biomass Pretreatment-Torrefaction Fundamentals and Technology / J.J. Chew, V. Doshi // *Renew. Sust. Energ. Rev.* – 2011. – Vol. 15, No. 8. – P. 4212–4222.
2. Torrefaction of Agricultural and Forest Residues / D.T. Ferro [et al.] // *International Conference «Cubasolar», 2004, April 12–16, Guantánamo; Cuba.*
3. Torrefaction of Reed Canary Grass, Wheat Straw and Willow to Enhance Solid Fuel Qualities and Combustion Properties / T.G. Bridgeman [et al.] // *Fuel.* – 2008. – Vol. 87. – P. 844–856.
4. Двухстадийная модель реактора для низкотемпературного пиролиза соломы / Н. Николопоулос [и др.] // *Вопр. соврем. науки и практики. Ун-т им. В.И. Вернадского.* – 2012. – № 3 (41). – С. 345–354.

The Results of Tests and Calculation Method of Newly Developed Reactor Torrefaction of Straw Pellets

S.N. Kuzmin, O.Yu. Milovanov

Tambov State Technical University, Tambov

Key words and phrases: biofuels; heat treatment; reactor of torrefaction.

Abstract: This paper presents the results of tests of the newly developed reactor torrefaction straw pellets. It is shown that the temperature of the annealing process should not exceed 240...250 °C for maximum energy efficiency of the process, because at higher temperatures, the weight loss exceeds the increase of heat content of the granules. The duration of the annealing process should be 2500...3000 seconds. Designed layout provides a joke pellets from straw to energy efficiency at least 95 % weight loss at no more than 6 %. The productivity of the reactor is 60 kg/h. After annealing, the lower heating value of pellets increased by 14,2 %.

© С.Н. Кузьмин, О.Ю. Милованов, 2013