



УДК 662.997.715.1

[https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.2\(23\).2026.26](https://doi.org/10.70769/2181-2284.ME.2(23).2026.26)

ПРИМЕНЕНИЕ ТОРРЕФИКАЦИИ В ПЕРЕГРЕТОМ ПАРЕ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ БИОУГЛЯ ИЗ ПИЩЕВЫХ ОТХОДОВ НА ПРИМЕРЕ КОЖУРЫ КАРТОФЕЛЯ

Д. В. Климов, Р. Л. Исьёмин*, А. В. Михалёв, О. Ю. Милованов, К. И. Милованов, С. Н. Кузьмин

Тамбовский государственный технический университет, Российская федерация, Тамбовская область,
г. Тамбов, ул. Советская, д.106/5,
*e-mail: risemin@gmail.com

Аннотация. Данная работа продолжает цикл исследований процесса влажной торрефикации в кипящем слое в среде перегретого водяного пара. Данный процесс позволяет получить из биомассы уголь, по своим характеристикам не уступающий биоуглю, полученному методом классической гидротермальной карбонизации, но не требует высокого давления, что значительно снижает стоимость и сложность реакторов. Кроме того кипящий слой интенсифицирует тепло- и массообменные процессы, тем самым снижая необходимое время обработки.

Исследован процесс термохимической переработки кожуры картофеля в биотопливо при изменении температуры от 200 до 300°C и продолжительности от 10 до 30 мин. В результате торрефикации кожуры картофеля теплота сгорания биомассы (на беззольное сухое состояние) возрастает в 1.35 раза.

Ключевые слова: торрефикация, кипящий слой, биоуголь, гидротермальная карбонизация

UDC662.997.715.1

THE USE OF TORREFACTION IN SUPERHEATED STEAM TO PRODUCE BIOCHAR FROM FOOD WASTE USING THE EXAMPLE OF POTATO PEEL

D.V. Klimov, R.L. Isemin*, A.V. Mikhalev, O.Yu. Milovanov, K.I. Milovanov, S.N. Kuzmin

Tambov State Technical University, house 106/5, Sovetskaya str., 392000, Tambov, Russia
*e-mail: risemin@gmail.com

Abstract. This study continues a series of studies on wet torrefaction in a fluidized bed in a superheated water vapor environment. The goal of this approach is to produce biochar from biomass with characteristics comparable to biochar produced by classical hydrothermal carbonization, but with a significant reduction in the required process time and the elimination of the use of high-pressure reactors. The project, carried out jointly with universities from BRICS countries, investigated the thermochemical conversion of potato peels into biofuel, varying the process temperature from 200 to 300°C and duration from 10 to 30 minutes. As a result of potato peel torrefaction, the heat of combustion of the biomass (on an ash-free basis) increases by 1.35 times.

Key words: torrefaction, fluidized bed, biochar, hydrothermal carbonization.

Введение

Для обеспечения экологической безопасности окружающей среды и повышения энергетической безопасности все более важным становится использование новых возобновляемых источников энергии [1]. Пищевые отходы являются одним из важнейших видов биологических отходов, образующихся в современном мире. При этом в плодоовощной промышленности генерируется гораздо больше отходов (25–30%) по сравнению с другими секторами переработки сельскохозяйственного сырья [2].



В отличие от других методов термохимической переработки биоотходов при гидротермальной карбонизации не требуется предварительной сушки сырья: процесс протекает в водной среде при температуре 180–250°C и давлении 2–10 МПа [3]. Серьезными недостатками процесса классической гидротермальной карбонизации являются периодичность процесса, большая продолжительность (до 12 ч), необходимость использовать оборудование, работающее под высоким давлением.

Нами предложена технология ускоренной гидротермальной карбонизации или влажной торрефикации, которая осуществляется в кипящем слое частиц биомассы в среде перегретого водяного пара при температуре 200–300°C и избыточном давлении не более 0.07 Мпа. По такой технологии нами перерабатывались смесь куриного помета и опилок, осадок сточных вод, лузга подсолнечника, скорлупа фундука, листья оливок, выжимки оливкового масла и другие виды биоотходов. Качество биоугля, полученного с помощью такой технологии, не уступает качеству такового, полученного методом классической гидротермальной карбонизации.

Методы и материалы

В настоящей работе отражены результаты исследования, проводимого авторами совместно с Федеральным университетом Алагоаса (Бразилия) и Чунцинским университетом “Трех ущелий” (Китай). Проектом предусматривается исследование технологий переработки и утилизации пищевых отходов кожуры картофеля, которая образуется при производстве жареного картофеля из однотипного сырья.

Образцы кожуры картофеля были получены на предприятии “Ви Фрай”.

Суспензия, полученная на предприятии “Ви Фрай”, подвергалась механическому обезвоживанию в декантере, что позволяло снизить влажность до 70.0%, после чего высушивалась в течение 48 ч при температуре 50°C до влажности 5.23%. Во Стандартным методом ASTM E 870-82 и с помощью анализатора TruSpec, был исследован химический состав кожуры картофеля: влага - 5.23 %, летучие вещества - 71.24 %, зола - 7.15 %, фиксированный углерод - 16.38 %, углерод - 45.2 %, водород - 5.9 %, азот - 2.68%, кислород - 33.17 %. Теплота сгорания кожуры картофеля на сухое беззольное топливо составила 20.7 МДж/кг.

На рис. 1 изображена схема установки для исследования процесса торрефикации биомассы в кипящем слое в среде перегретого водяного пар. Кроме элементов, изображенных на рисунке, установка включает в себя паровой электрокотел, электрический пароперегреватель, водяной конденсатор для отработанного пара. Процесс торрефикации выполняли при температурах t , равных 200, 250, 300°C в течение времени τ , составляющем 10, 20, 30 мин.

С помощью синхронного термоанализатора NETSCH STA 409 PC/PG, позволяющего контролировать процессы дегидратации и удаления летучих соединений и определять тепловые эффекты реакций, выполняли калориметрический и термогравиметрический совмещенные анализы ДСК/ТГ.

Результаты и обсуждение

Результаты совмещенного ДСК/ТГ-анализа образцов кожуры картофеля

Для совмещенного ДСК/ТГ-анализа использовали навески измельченной в порошок кожуры картофеля и навески порошка смеси кожуры картофеля с оливиновым песком, который использовался как наполнитель кипящего слоя. Массовая доля кожуры картофеля в реакторе составляла 2%.

На рисунке 1 показаны кривые потери массы образцов в зависимости от температуры обработки:

$$-dM / dt = \frac{d(m / (m_0 - m_t))}{dt}, \quad (1)$$

где m , m_0 , m_t – масса навески текущая, исходная и после торрефикации. Левый максимум зависимости связан с потерей массы образца в связи с выходом летучих веществ,



правый максимум вызван разложением коксового остатка. Наличие оливинового песка тормозит выход летучих веществ, но ускоряет термодеструкцию коксового остатка. В присутствии оливинового песка правый максимум смещается в область более высоких температур (450°C против 380°C для образца из кожуры картофеля).

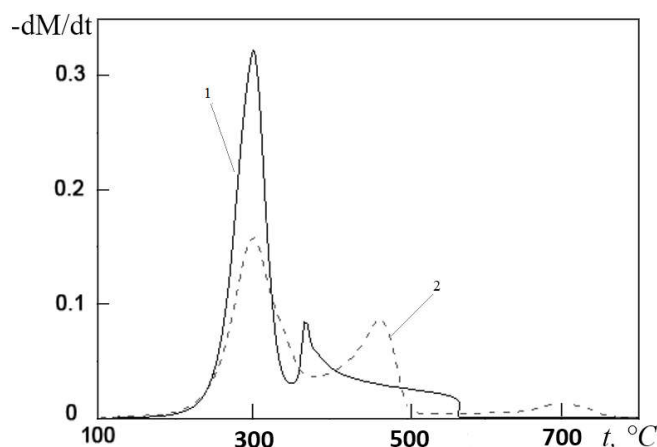


Рис.1. Потери массы исходной КК (1) и исходной КК в смеси с оливиновым песком (2) в зависимости от температуры обработки.

На рисунке 2 показаны кривые тепловыделения в зависимости от температуры:

$$q = \frac{Q_{ox}}{m_0 - m_t}, \quad (1)$$

где Q_{ox} – тепловой эффект реакции окисления. На рисунке виден один максимум для кожуры картофеля в диапазоне температур 350–600°C. Для смеси кожуры картофеля с оливиновым песком имеется два максимума, вызванные выделением тепла: левый – в летучих веществах, правый – в коксовом остатке.

Тепловой эффект при горении смеси кожуры картофеля с оливиновым песком достигает 30 Вт/г, при горении кожуры картофеля не превышает 10 Вт/г.

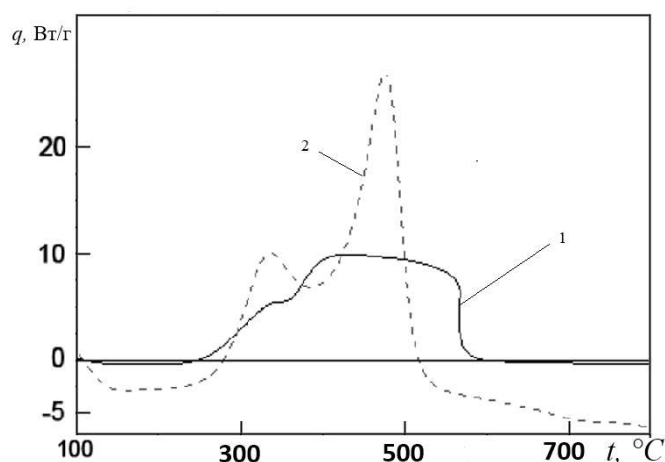


Рис.2. Кривые тепловыделения при нагреве образцов КК (1) ее смеси с оливиновым песком (2).

Потеря массы кожуры картофеля при торрефикации

Оказалось, что с ростом температуры и длительности процесса торрефикации потери массы кожуры картофеля увеличиваются. При $t = 300^\circ\text{C}$ и $\tau = 30$ мин потери массы достигают 63%, что более чем в 3 раза больше потерь при температуре 200°C и той же продолжительности обработки. Повышение температуры обработки от 200 до 250°C не дает



столь значительного увеличения потерь массы, что полностью соответствует данным, представленным на рис. 1.

Характеристики торрефицированной кожуры картофеля

При торрефикации кожуры картофеля с увеличением температуры процесса и его продолжительности теплота сгорания биомассы (на беззольное сухое состояние) возрастает в 1.35 раза (от 20.68 до 28.0 МДж/кг). В биомассе снижается содержание летучих веществ в 2.17 раза, тогда как концентрация фиксированного углерода практически не уменьшается.

Заключение

1. Производство сухого биотоплива из кожуры картофеля – это энергозатратный процесс. Однако при использовании отработанного пара после торрефикации для сушки исходной кожуры картофеля экономическая привлекательность процесса повышается.

2. Предложенная технология переработки кожуры картофеля в кипящем слое оливинового песка в среде перегретого водяного пара может быть альтернативой технологии анаэробного сбраживания.

3. В результате торрефикации кожуры картофеля в кипящем слое оливинового песка полученный биоуголь можно сжигать в кипящем слое оливинового песка и в этом случае решаются проблемы агломерации в слое и дефлюидизации, характерные для сжигания многих видов биомассы в кипящем слое кварцевого песка.

Литература

1. Investigation of the effects of torrefaction temperature and residence time on the fuel quality of corncobs in a fixed-bed reactor / J.I. Orisaleye, S.O. Jekayinfa, R. Pecenka, A.A. Ogundare, M.O. Akinseloyin, O.L. Fadipe // *Energies*. 2022. V. 15. Is. 14. P. 5284. <https://doi.org/10.3390/en15145284>
2. A comprehensive review of food waste valorization for the sustainable management of global food waste / A. Sarker, R. Ahmmed, S.M. Ahsan, J. Rana, M.K. Ghosh, R. Nandi at al. // *Sustain Food Technol*. 2023. V. 2. P. 1554. <https://doi.org/10.1039/d3fb00156c>
3. Kumar M., Oyedun A.O., Kumar A. A review on the current status of various hydrothermal technologies on biomass feedstock // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. V. 81. P. 1742–1770. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.270>.