



МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ
И ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ

УДК 674.812

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.5.110

**ВЛИЯНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ДЛИНЫ ФИЛЬЕРЫ МАТРИЦЫ
НА ДАВЛЕНИЕ ПРЕССОВАНИЯ ТЕРМОМОДИФИЦИРОВАННОЙ
БЕРЕЗОВОЙ КОРЫ В ПРЕСС-ГРАНУЛЯТОРАХ ВАЛКОВОГО ТИПА**

О.Д. Мюллер, д-р техн. наук, проф.

В.И. Мелехов, д-р техн. наук, проф.

Н.Г. Пономарева, асп.

Т.В. Тюрикова, канд. техн. наук, доц.

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002; e-mail: ockar@mail.ru, n.ponomareva@narfu.ru

Процесс получения гранулированного биотоплива из термомодифицированной массы на пресс-грануляторах валкового типа является перспективным методом утилизации древесных отходов березовой коры. Плотность гранул из коры – важный показатель, их высокого качества. Получение качественных гранул из термомодифицированной коры березы зависит от давления прессования, которое напрямую связано с относительной длиной фильеры матрицы и физико-механическими свойствами исходного сырья, в первую очередь с коэффициентами трения и адгезии спрессованной древесной гранулы с цилиндрической поверхностью фильеры матрицы в пресс-грануляторах валкового типа. В настоящее время практически отсутствуют данные о коэффициентах адгезии и трения для термомодифицированной древесной коры, что не позволяет определить давление, развиваемое прессовочными валками в процессе прессования древесных гранул. На основании разработанной математической модели для расчета давления прессования в цилиндрической фильере матрицы коэффициенты трения и адгезии были объединены в коэффициент α , что позволило создать стенд и разработать методику его экспериментального определения. Проведенные исследования по получению гранул из термомодифицированной березовой коры показали, что обобщающий коэффициент α является функцией исходной влажности термомодифицированного сырья и давления прессования. Статистическая обработка экспериментальных результатов позволила получить уравнение регрессии для определения коэффициента α .

Для цитирования: Мюллер О.Д., Мелехов В.И., Пономарева Н.Г., Тюрикова Т.В. Влияние относительной длины фильеры матрицы на давление прессования термомодифицированной березовой коры в пресс-грануляторах валкового типа // Лесн. журн. 2017. № 5. С. 110–118. (Изв. высш. учеб. заведений). DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.5.110

Ключевые слова: гранулирование, термомодифицированная, березовая кора, мелкодисперсная масса, пресс-гранулятор, пеллеты, давление прессования.

Введение

В России и в мировой практике для производства древесного биотоплива из отходов лесозаготовительного производства и лесоперерабатывающей промышленности широкое распространение получил технологический процесс прессования древесных гранул в пресс-грануляторах валкового типа с цилиндрической или плоской матрицей. Наиболее важным показателем, обеспечивающим высокое качество древесных гранул из березовой коры, является их плотность, которая характеризует энергетические затраты на производство. При этом давление, развиваемое в процессе прессования гранул, определяется сопротивлением продвижению спрессованной массы термомодифицированной березовой коры через фильеры матрицы пресс-гранулятора.

Ряд зарубежных и отечественных исследователей [1, 4–10] установили, что давление проталкивания спрессованной древесной массы через фильеры матрицы зависит от относительной длины фильеры, а эта зависимость имеет экспоненциальный характер.

Цель настоящей статьи – предложить математическую зависимость, позволяющую расчетным путем определять давление прессования, развиваемое при гранулировании термомодифицированной березовой коры, в зависимости от относительной длины фильеры матрицы и исходной влажности сырья.

Объекты и методы исследования

Экспериментальными исследованиями установлено, что развиваемое при производстве древесных гранул давление для используемых матриц пресс-грануляторов значительно выше, чем определяемое по принятой математической модели, а зависимость давления прессования от относительной длины фильеры матрицы в диапазоне рабочих давлений пресс-грануляторов валкового типа носит линейный характер [2]. Несоответствие полученных экспериментальных данных математической модели прессования можно объяснить тем, что для вывода принятой модели прессования рассматривался процесс сжатия древесной гранулы в цилиндрической фильере матрицы. В действительности процесс уплотнения мелкодисперсной древесной массы в пресс-грануляторах валкового типа заканчивается на входе в фильеру. Последующее формирование из спрессованной мелкодисперсной березовой коры гранулы происходит за счет ее пластических деформаций при входе в фильеру. Движение спрессованной гранулы из термомодифицированной березовой коры через фильеру происходит в условиях упругого деформирования. При определении сил, действующих на цилиндрической поверхности спрессованной гранулы, необходимо также учитывать силы адгезии между поверхностью гранулы из коры березы и цилиндрической поверхностью фильеры.

Выполненный математический анализ процесса прессования гранул из термомодифицированной коры березы на основе теории упругопластического деформирования мелкодисперсной среды при указанных условиях [3] с учетом сил адгезии позволил получить новое уравнение для определения давления проталкивания (выталкивания):

$$P_{\text{выт}} = 4 \frac{(\mu + \nu)L}{d} \frac{E}{(1 + \lambda)} \frac{\left(\frac{D}{d} - 1\right) \left(\frac{D^2}{d^2} - 1\right)}{\left(1 - 2\lambda + \frac{D^2}{d^2}\right)}, \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения спрессованной древесной гранулы о стенки фильеры;

ν – коэффициент, учитывающий силы адгезии;

L – длина фильеры;

d – диаметр фильеры;

E – модуль Юнга спрессованной древесной гранулы;

λ – коэффициент Пуассона для спрессованной древесной гранулы;

D – наружный диаметр древесной гранулы после выхода из фильеры матрицы.

Введем обозначение $\alpha = 4 \frac{(\mu + \nu)}{(1 + \lambda)}$ и преобразуем уравнение (1):

$$P_{\text{выт}} = \alpha E \frac{L}{d} \frac{\left(\frac{D}{d} - 1\right) \left(\frac{D^2}{d^2} - 1\right)}{\left(1 - 2\lambda + \frac{D^2}{d^2}\right)}. \quad (2)$$

Коэффициент пропорциональности α , учитывающий коэффициент Пуассона, силы трения и поверхностной адгезии, является функцией физических характеристик исходного и спрессованного древесного сырья (влажности, породы дерева, фракционного состава, температуры).

Для экспериментальных исследований по проверке полученной математической модели прессования гранул и определения коэффициента α для термомодифицированной березовой коры была изготовлена пресс-форма диаметром 40 мм и длиной 50 мм, в которой была выполнена сквозная одиночная фильера диаметром 8 мм, и три плунжера наружным диаметром 8 мм и длиной 20, 30 и 55 мм (рис. 1).

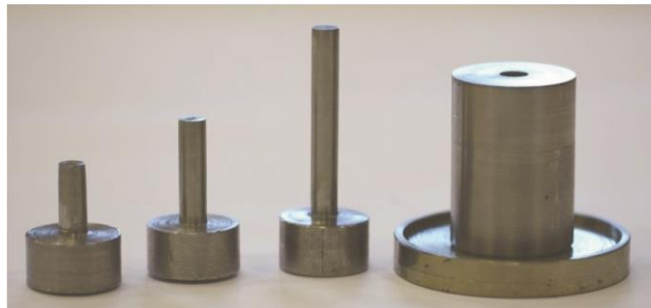


Рис. 1. Плунжеры и пресс-форма для прессования гранул из термомодифицированной древесной коры

Эксперименты проводили на испытательном стенде (рис. 2), состоящем из универсальной испытательной машины серии AG-X Plus («Shimadzu») с нагрузочной ячейкой SFL-50KNAG, которая обеспечивала максимальную нагрузку до 50 кН и класс точности $\pm 0,5\%$.

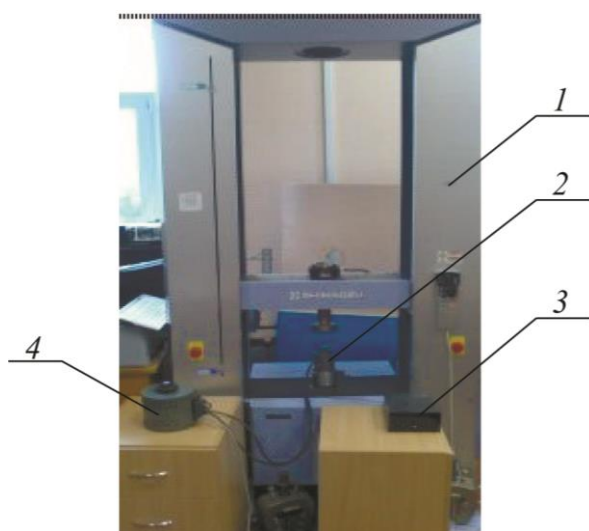


Рис. 2. Стенд для прессования гранул из термомодифицированной коры березы: 1 – испытательная машина с нагрузочной ячейкой; 2 – пресс-форма; 3 – контроллер температуры пресс-формы; 4 – линейный автотрансформатор

Перед прессованием древесной гранулы в фильеру матрицы вставляли упорный плунжер диаметром 8 мм и длиной 5 мм, затем с помощью автотрансформатора осуществляли электронагрев пресс-формы до заданной температуры, которую во время эксперимента поддерживали постоянной. В фильеру пресс-формы засыпали порцию исходного материала – мелкодисперсной древесной коры березы, после чего в испытательной машине ее прессовали соответствующим плунжером. По достижении заранее определенной силы прессование прекращали, плунжер удаляли, а в фильеру пресс-формы добавляли следующую порцию исходного материала, после чего процесс повторяли. После получения гранулы требуемой длины пресс-форму со спрессованной гранулой из коры березы устанавливали на опорную плиту с центральным отверстием, которое обеспечивало свободный выход спрессованной гранулы длиной до 40 мм. В свободное отверстие фильеры вставляли плунжер, после чего на стенде осуществляли выталкивание спрессованной гранулы из фильеры. Во время удаления гранулы из фильеры измеряли прикладываемую силу и ход плунжера. График, отражающий связь между силой, развиваемой плунжером, и его ходом в матрице, представлен на рис. 3.

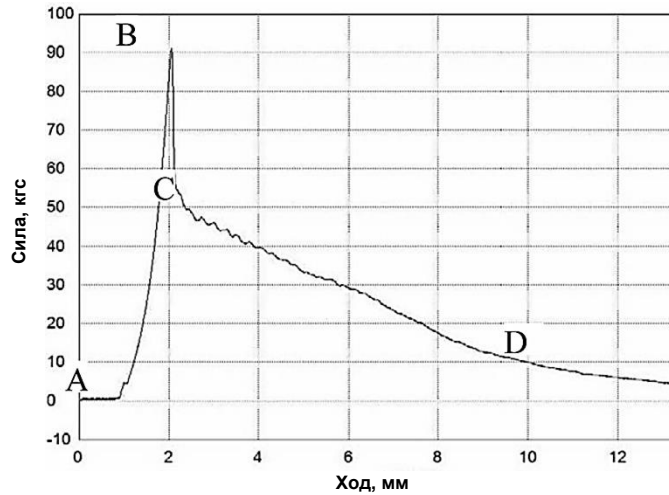


Рис. 3. Зависимость силы, развиваемой плунжером, от его хода в матрице (материал – термомодифицированная березовая кора, давление прессования $P_{\text{пресс}} = 20$ МПа)

Результаты исследования и их обсуждение

Из приведенного на рис. 3 графика видно, что процесс выталкивания гранулы термомодифицированной коры березы состоит из трех участков: А–В – выбор неплотностей и повышение давления на гранулу, развиваемого приложенной силой, до давления, которое обеспечивает начало движения спрессованной гранулы в фильере матрицы; В–С – начало движения и разгон гранулы до скорости движения плунжера; С–D – выталкивание гранулы из фильеры.

В ходе экспериментов были получены зависимости силы, прикладываемой плунжером к спрессованной при давлении $P_{\text{пресс}}$ грануле, от его перемещения в матрице при выталкивании гранул из фильеры.

На графиках зависимости «давление–длина гранулы» (рис. 4), характеризующих ход выталкивания из фильеры спрессованной при давлении $P_{\text{пресс}}$

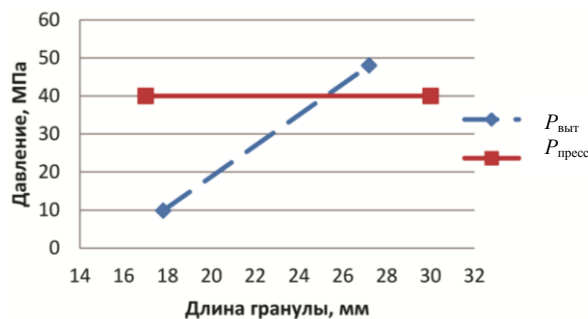


Рис. 4. Определение давления проталкивания

древесной гранулы длиной L_0 , находили прямолинейный участок С–D и для точек С и D определяли длину гранулы в фильере (L_C и L_D) и давление проталкивания (P_C и P_D). Так как в пресс-грануляторах движение гранулы начинается, когда давление прессования $P_{\text{пресс}}$ становится равным давлению проталкивания $P_{\text{выт}}$, строили графики $P_{\text{пресс}} = \text{const}$ и $P_{\text{выт}} = f(L_{\text{гр}})$.

По точке пересечения прямых устанавливали искомую длину гранулы $L_{\text{гр}} = L_D - L_C$ и равную ей длину фильеры L , при которой $P_{\text{пресс}} = P_{\text{выт}}$. Зная $P_{\text{выт}}$ и соответствующую ему $L_{\text{гр}}$, с помощью уравнения (2) находили коэффициент пропорциональности:

$$\alpha = \frac{P_{\text{выт}}}{E} \frac{d}{L_{\text{гр}}} \frac{\left(1 - 2\lambda + \frac{D^2}{d^2}\right)}{\left(\frac{D}{d} - 1\right) \left(\frac{D^2}{d^2} - 1\right)}. \quad (3)$$

Чтобы определить коэффициент α для мелкодисперсной термомодифицированной березовой коры, выполнили серию экспериментов, в которых влажность исходного сырья W изменялась в диапазоне 10...30 %, давление прессования $P_{\text{пресс}} = 20...60$ МПа (рис. 5).

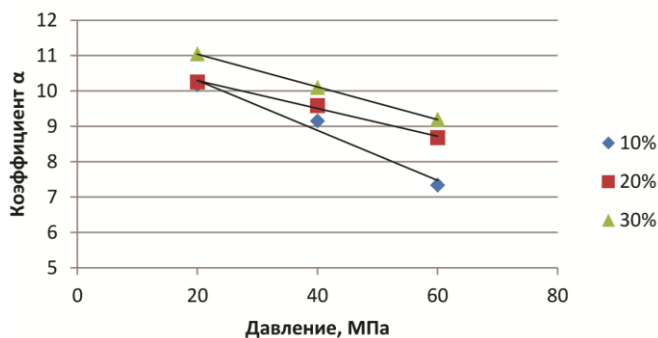


Рис. 5. Зависимость коэффициента пропорциональности α для термомодифицированной березовой коры от давления прессования $P_{\text{пресс}}$ при различной влажности исходного сырья

В результате математической обработки [2] результатов экспериментальных исследований процесса прессования термомодифицированной древесной коры получено следующее уравнение регрессии для нахождения коэффициента α :

$$\alpha = 11,37 - 0,082P_{\text{выт}} + 0,021W + 0,00115P_{\text{выт}}W, \quad (4)$$

а после подстановки (4) в (2) и преобразования – уравнение для определения давления $P_{\text{пресс}}$ при прессовании термомодифицированной древесной коры различной влажности W через фильеру диаметром d :

$$P_{\text{выт}} = \frac{E \frac{L}{d} (11,37 + 0,021W) \left(\frac{D}{d} - 1\right) \left(\frac{D^2}{d^2} - 1\right)}{E \frac{L}{d} (0,082 - 0,00115W) \left(\frac{D}{d} - 1\right) \left(\frac{D^2}{d^2} - 1\right) + \left(1 - 2\lambda + \frac{D^2}{d^2}\right)}, \quad (5)$$

где L – толщина матрицы.

Заключение

На основании результатов, полученных при исследовании процесса формирования гранул из термомодифицированной коры березы, предложена математическая зависимость, позволяющая определять давление, развиваемое при прессовании гранул в пресс-грануляторах валкового типа.

При этом установлено, что давление прессования зависит от относительной длины фильеры матрицы L/d , модуля упругости E и исходной влажности W спрессованной термомодифицированной коры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булатов И.А. Разработка процесса прессового гранулирования мелкодисперсных сред на примере минеральных порошков и древесных отходов: автореф. ... канд. техн. наук. М., 2012. – 19 с.
2. Богданович Н.И., Кузнецова Л.Н., Третьяков С.И., Жабин В.И. Планирование эксперимента в примерах и расчетах: учеб. пособие. Архангельск: САФУ, 2010. 126 с.
3. Попов А.Н., Любов В.К., Мюллер О.Д., Попова Е.И. Математическая модель и процесс производства древесного гранулированного топлива // Химия твердого топлива. 2016. № 2. С. 38–45.
4. Hodolic J., Vukelic Dj., Agarski B., Hudjik C. Briquetting of Biomass and Environmental Engineering // Proc. Quality Festival 2007-2. Conference about Quality of Life. Kragujevac, 2007. Pp. 8–11. ISBN 85-86663-09-5.
5. Holm J.K., Henriksen U.B., Hustad J.E., Sørensen L.S. Toward an Understanding of Controlling Parameters in Softwood and Hardwood Pellets Production // Energy and Fuels. 2006. No. 20(6). Pp. 2686–2694.
6. Krizan P., Matus M., Kers J., Vukelic Dj. Change of Pressing Chamber Conicalness at Briquetting Process in Briquetting Machine Pressing Chamber // Acta Polytechnica. 2012. Vol. 52, no. 3. Pp. 60–65.
7. Krizan P., Šoos L., Matus M., Svatek M., Vukelic Dj. Evaluation of Measured Data from Research of Parameters Impact on Final Briquettes Density // Aplimat – Journal of Applied Mathematics. 2010. Vol. 3, no. 3. Pp. 69–76.
8. Krizan P., Vukelic Dj. Shape of Pressing Chamber for Wood Biomass Compacting // International Journal for Quality Research. 2008. Vol. 2, no. 3. Pp. 193–197.
9. Matus M., Krizan P. Modularity of Pressing Tools for Screw Press Producing Solid Biofuels // Acta Polytechnica. 2012. Vol. 52, no. 3. Pp. 71–76.
10. Myuller O.D., Melekhov V.I., Malygin V.I. Elastoplastic Deformation of Fine-Grain Media // Russian Engineering Research. 2015. Vol. 35, iss. 12. Pp. 911–918.

Поступила 25.03.17

UDC 674.812

DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.5.110

Influence of the Relative Length of the Matrix Drawplate on the Compacting Pressure of Thermally-Modified Birch Bark in the Roller Press-Granulators

O.D. Myuller, Doctor of Engineering Sciences, Professor

V.I. Melekhov, Doctor of Engineering Sciences, Professor

N.G. Ponomareva, Postgraduate Student

T.V. Tyurikova, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Naberezhnaya Severnoy Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation; e-mail: ockar@mail.ru, n.ponomareva@narfu.ru

The process of obtaining of granulated biofuel from thermally-modified woodpulp by roller press granulators is a promising method for utilization of birch bark refuse wood. Density of bark pellets is an important indicator, of their high quality. The production of qualitative pellets from thermally-modified birch bark depends on the compacting pressure, which is directly associated with the relative length of the matrix drawplate and feedstock physical and mechanical properties, primarily with the friction and adhesion coefficients of the pressed wood pellet with the cylindrical surface of the matrix drawplate in the roller press granulators. At present, there are practically no data on the adhesion and friction coefficients for thermally-modified tree bark, which does not allow us to determine the pressure developed by the pressing rolls during the wood pellets pressing. Based on the developed mathematical model for calculating the compacting pressure in the cylindrical matrix drawplate, we combined the friction and adhesion coefficients into a factor α , which made it possible to create a stand and develop a technique for its experimental determination. The researches on obtaining granules from thermally-modified birch bark demonstrate that the generalizing coefficient α is a function of initial moisture content of thermally-modified raw material and compacting pressure. The statistical processing of the experimental results made it possible to obtain a regression equation for the determining coefficient α .

Keywords: granulation, thermally-modified, birch bark, fine mass, press-granulator, pellet, compacting pressure.

REFERENCES

1. Bulatov I.A. *Razrabotka protsessa pressovogo granulirovaniya melkodispersnykh sred na primere mineral'nykh poroshkov i drevesnykh otkhodov: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of a Granulation Technology for Small-Grain Media for the Example of Mineral Powder and Wood Waste: Cand. Eng. Sci. Diss. Abs.]. Moscow, 2012. 19 p.

For citation: Myuller O.D., Melekhov V.I., Ponomareva N.G., Tyurikova T.V. Influence of the Relative Length of the Matrix Drawplate on the Compacting Pressure of Thermally-Modified Birch Bark in the Roller Press-Granulators. *Lesnoy zhurnal* [Forestry journal], 2017, no. 5, pp. 110–118. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.5.110

2. Bogdanovich N.I., Kuznetsova L.N., Tret'yakov S.I., Zhabin V.I. *Planirovanie eksperimenta v primerakh i raschetakh: ucheb. posobie* [Design of Experiments in Examples and Calculations]. Arkhangelsk, SAFU Publ., 2010. 126 p. (In Russ.)
3. Popov A.N., Lyubov V.K., Myuller O.D., Popova E.I. Matematicheskaya model' i protsess proizvodstva drevesnogo granulirovannogo topliva [Mathematical Model and Process for Production of Granulated Fuel Wood]. *Khimiya tverdogo topliva* [Solid Fuel Chemistry], 2016, no. 2, pp. 38–45.
4. Hodolic J., Vukelic Dj., Agarski B., Hudjik C. Briquetting of Biomass and Environmental Engineering. *Proc. Quality Festival 2007-2. Conference about Quality of Life*. Kragujevac, 2007, pp. 8–11, ISBN 85-86663-09-5.
5. Holm J.K., Henriksen U.B., Hustad J.E., Sørensen L.S. Toward an Understanding of Controlling Parameters in Softwood and Hardwood Pellets Production. *Energy and Fuels*, 2006, no. 20(6), pp. 2686–2694.
6. Krizan P., Matus M., Kers J., Vukelic Dj. Change of Pressing Chamber Conicalness at Briquetting Process in Briquetting Machine Pressing Chamber. *Acta Polytechnica*, 2012, vol. 52, no. 3, pp. 60–65.
7. Krizan P., Šoos L., Matus M., Svatek M., Vukelic Dj. Evaluation of Measured Data from Research of Parameters Impact on Final Briquettes Density. *Aplimat – Journal of Applied Mathematics*, 2010, vol. 3, no. 3, pp. 69–76.
8. Krizan P., Vukelic Dj. Shape of Pressing Chamber for Wood Biomass Compacting. *International Journal for Quality Research*, 2008, vol. 2, no. 3, pp. 193–197.
9. Matus M., Krizan P. Modularity of Pressing Tools for Screw Press Producing Solid Biofuels. *Acta Polytechnica*, 2012, vol. 52, no. 3, pp. 71–76.
10. Myuller O.D., Melekhov V.I., Malygin V.I. Elastoplastic Deformation of Fine-Grain Media. *Russian Engineering Research*, 2015, vol. 35, iss. 12, pp. 911–918.

Received on March 25, 2017