DOI: 10.12737/article_5c1a322375b0c9.59926380
УДК 620.9:662.6

УПРУГО-ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕССОВАННОЙ ДРЕВЕСНОЙ ШИХТЫ

Н. М. Клюшин[1]
доктор технических наук, профессор **В. И. Мелехов**[1]
доктор технических наук, доцент **О. Д. Мюллер**[1]
А. М. Воронин[1]
В. В. Прохоров[1]
кандидат технических наук **Т. В. Тюрикова**[1]
1 – ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова»,
г. Архангельск, Российская Федерация

В работе приведены результаты исследований процесса прессования древесных гранул. Рассмотрено изменение модуля продольной упругости (модуль Юнга) при различном давлении прессования в зависимости от температуры нагрева, влажности и фракционного состава древесных опилок (шихты). В проведенных ранее исследованиях определены зависимости модуля упругости от внешних факторов для древесностружечных и древесноволокнистых плит, изготовленных из измельченных древесных частиц со связующим. В работах различных авторов имеются отдельные данные о зависимости величины конечной плотности и качества спрессованной гранулы от модуля Юнга спрессованной древесной шихты в каналах матрицы цилиндрической формы. При этом вопросы о влиянии давления прессования в зависимости от температуры, влажности и фракционного состава шихты на величину модуля продольной упругости спрессованной древесной шихты без связующих изучены недостаточно. Для определения модуля упругости спрессованной древесной шихты создана экспериментальная установка. В качестве базовой схемы проведения экспериментов выбрана модель деформационного сжатия древесной шихты в фильере матрицы цилиндрической формы. Для шихты различной фракции из древесины ели, сосны и березы выполнено экспериментальное определение модуля продольной упругости. Усилие прессования шихты варьировалось от 100 до 300 кгс. В результате проведенного исследования установлено, что зависимость модуля упругости древесных гранул от усилия прессования линейная; для спрессованной древесной шихты при рабочих давлениях 100-300 кгс в пресс-грануляторе модуль Юнга изменяется в пределах 600-1500 МПа; температура прессования оказывает существенное влияние на величину модуля упругости при значениях до 100-102 ºС, дальнейшее повышение температуры не вносит значимых изменений; при прессовании древесной шихты возникают преимущественно упругие деформации; изменение фракционного состава и влажности древесной шихты на модуль Юнга влияет в меньшей степени, чем температура; качество древесных гранул снижается при влажности древесной шихты 6 % и менее.

Ключевые слова: упруго-деформационная характеристика, модуль продольной упругости, древесная шихта, давление прессования, пресс-гранулятор, фильера, древесные гранулы.

ELASTIC-DEFORMATION CHARACTERISTICS OF PRESSED WOOD CHARGE

N. M. Klyushin[1]
DSc (Engineering), Professor **V. I. Melekhov**[1]
DSc (Engineering), Associate Professor **O. D. Myuller**[1]
A. M. Voronin[1]
V. V. Prokhorov[1]
PhD (Engineering) **T. V. Tyurikova**[1]
1 – Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov», Arkhangelsk, Russian Federation

Abstract

The paper presents the results of studies of the process of wood pellets pressing. The change in the modulus of longitudinal elasticity (Young's modulus) at different pressures depending on heating temperature, humidity and fractional composition of sawdust (charge) is considered. In previous studies, the dependences of the elastic modulus on external factors for chipboard and fiberboard made of crushed wood particles with a binder are defined. In the works of various authors there are separate data on the dependence of the magnitude of the final density and quality of compressed granules on the Young's modulus of compressed wood mixture in the channels of cylindrical matrix. At the same time, questions about the effect of pressing pressure as a function of temperature, humidity and fractional composition of chips on the magnitude of the modulus of the longitudinal elasticity of a compressed wood mixture without binders have not been studied sufficiently. An experimental setup has been created to determine the elastic modulus of compressed wood mixture. The model of the deformation compression of the wood charge in the filler of a cylindrical matrix has been chosen as the basic scheme for conducting experiments. An experimental determination of the modulus of longitudinal elasticity has been performed for the mixture of spruce, pine and birch wood of various fractions. The pressing force of the charge has varied from 100 to 300 kgf. As a result of the study, it was established that the dependence of the elastic modulus of wood pellets on the pressing force is linear one; for compressed wood mixture at operating pressures of 100-300 kgf in the press granulator, the Young's modulus varies within 600 - 1500 MPa; pressing temperature has a significant impact on the magnitude of the elastic modulus at values up to 100-102 ºC, a further increase in temperature does not make significant changes; when pressing the wood charge, predominantly elastic deformations occur; the change in the fractional composition and moisture content of the wood mixture affects the Young's modulus to a lesser extent than the temperature; the quality of wood pellets decreases when the moisture content of wood mixture is 6 % or less.

Keywords: elastic-deformation characteristic, modulus of longitudinal elasticity, wood charge, pressing pressure, pelleting press, spinneret, wood pellets.

Модуль продольной упругости является одним из характерных показателей, определяющих качество спрессованных древесных гранул. Для описания процесса прессования древесной шихты в цилиндрическом канале матрицы с помощью математической модели принято [1, 3, 4, 5], что плотность спрессованной древесной шихты и непосредственно связанное с ней качество гранулы определяется величиной модуля Юнга. В то же время в доступных источниках недостаточно данных о зависимости модуля упругости спрессованных древесных гранул от внешних факторов таких как температура, влажность материала и размер фракции. Поэтому целью настоящих исследований является определение модуля Юнга древесных гранул и установление влияния на модуль упругости усилия прессования, температуры, влажности материала и фракционного состава спрессованной шихты.

Древесина различных пород, являющаяся исходным сырьём для изготовления гранул, состоит из целлюлозы (40-50%), лигнина (16-33%), гемицеллюлоз (15-30%), экстрагируемых веществ и неорганических примесей (1-2%). Лигнин является связующим древесных частиц спрессованных гранул [10, 11]. Адгезия мелких древесных частиц в канале матрицы пресс-гранулятора происходит за счёт активации лигнина под действием давления и температуры. В процессе прессования древесная шихта нагревается и лигнин, переходя в высокоэластичное состояние, освобождается из клеток древесины. При понижении температуры происходит стеклование лигнина, и он связывает отдель-

ные частицы шихты в плотные древесные гранулы.

Лигнин – аморфный термопластичный полимер. В процессе нагревания он изменяет своё релаксационное состояние [7, 8]. Для него характерны три релаксационных состояния: стеклообразное, высокоэластичное и вязкотекучее. При нагревании до 150 ºС лигнин находится в стеклообразном или высокоэластичном состоянии. Лигнин не имеет определенной точки плавления. Он размягчается по мере повышения температуры в широком диапазоне от 125 до 255 ºС [6] (до 190 ºС в сухой древесине [7, 9]). Температура размягчения лигнина зависит от древесной породы, молекулярной массы и содержания влаги. Для лигнинов из древесины ели температура размягчения при молекулярной массе $\overline{M}_w$ равной 85000 составляет 176 ºС, а при $\overline{M}_w$ = 4300 – 127 ºС [7]. В присутствии влаги температура размягчения снижается [7]. Однако этот эффект проявляется при влажности материала до 2%. Дальнейшее повышение влагосодержания не влияет на температуру размягчения лигнина.

Каждому релаксационному состоянию лигнина соответствует определенный вид деформации [7]. В стеклообразном состоянии величина деформации пропорциональна значению температуры. Древесный полимер – лигнин в данном состоянии ведет себя как классическое твердое тело и подчиняется закону Гука. Для стеклообразных полимеров характерны относительно небольшие упругие деформации.

При температурах характерных для высокоэластичного состояния лигнина его деформация обратима. Модуль упругости лигнина в зависимости от температуры изменяется незначительно и имеет небольшие абсолютные значения. При этом лигнин как высокоэластичный полимер способен подвергаться значительной деформации сжатия и обратимо релаксируется. При деформации лигнина в высокоэластичном состоянии под нагрузкой происходит развертывание свернутых хаотично цепных молекул вещества. После снятия нагрузки форма молекулы лигнина возвращается в исходное состояние за счет теплового движения. Упругость лигнина в высокоэластичном состоянии имеет энтропийную природу.

Для осуществления эмпирических исследований по определению зависимости модуля Юнга от различных параметров прессования создан испытательный стенд, общий вид которого представлен на рисунке 1. Стенд включает пресс 1, матрицу 2 с цилиндрической фильерой диаметром 8 мм, регулируемый нагревательный элемент 3, плунжер с датчиком давления 4 и измерительный комплекс, состоящий из анализатора 5, термопары 6 и датчика перемещения плунжера 7.

При проведении исследований использовали древесную шихту сосны, ели и березы размером фракции до 0.45, 1 и 2 мм с влажностью 0-20%. При проведении эксперимента шихту прессовали при температуре 20-150ºС. Модуль упругости определяли для шихты предварительно подпрессованной с усилием 100-300 кгс. После подпрессовки к получаемым гранулам в фильере прикладывали кратковременные нагрузки с интервалом в 40 кгс до достижения величины усилия предварительного прессования.

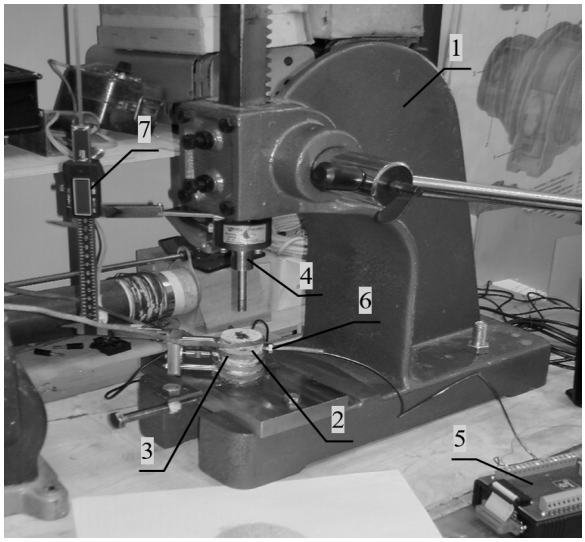

Рис. 1. Стенд для исследования процесса прессования древесных гранул

В результате проведенных исследований установлено, что основным видом деформации, возникающей при воздействии кратковременной нагрузки на подпрессованную древесную шихту в цилиндрической фильере, является упругая деформация. После кратковременного приложения нагрузки объем подпрессованной шихты стремится восстановить свою форму – релаксировать. Изменение длины гранулы от первоначального размера после кратковременной нагрузки до 92% от величины усилия подпрессовки составило не более 0.4% при длине фильеры 50 мм (рис. 2). Для сравнения изменения длины гранул при различных усилиях предварительного прессования целесообразно

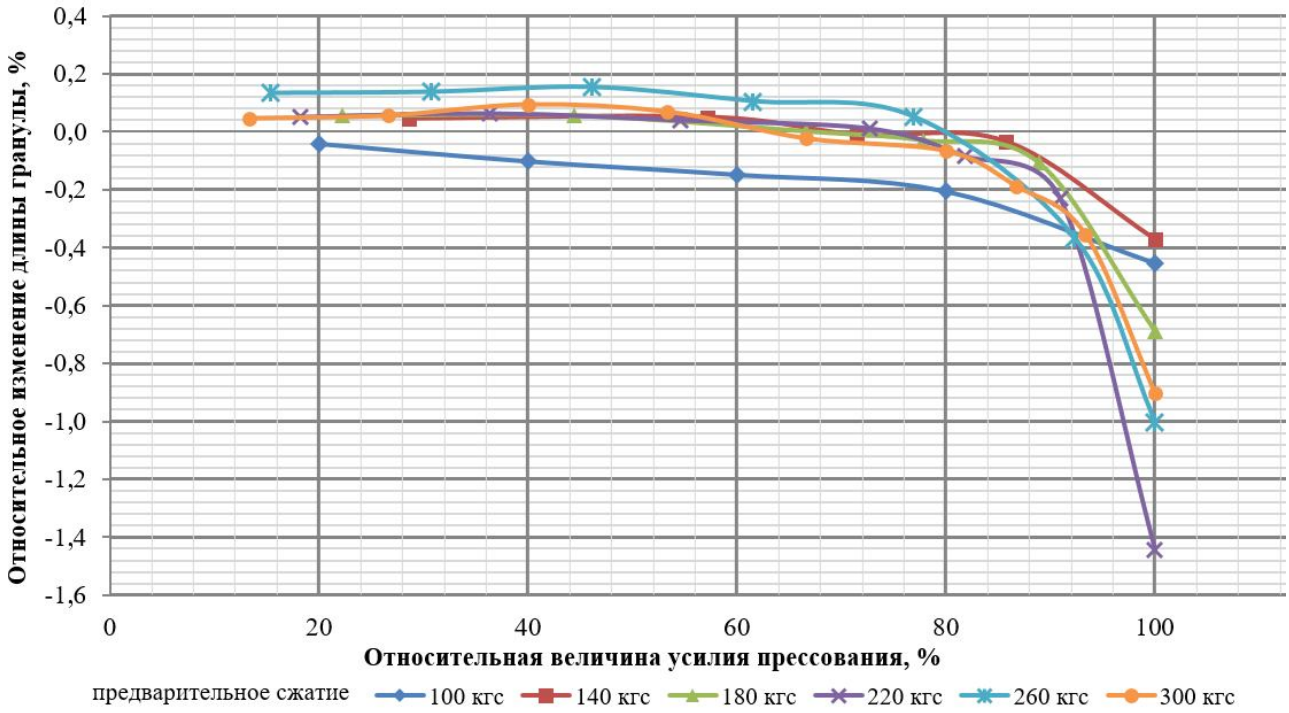

Рис. 2. Характер релаксации объема прессованной гранулы после снятия кратковременной нагрузки (ель, ≤1 мм, 15%, 100ºС)

использовать относительные величины. При повторной нагрузке подпрессованной массы шихты с разным начальным усилием уменьшение высоты гранулы составило 0.4-1.4%.

В результате исследования установлено, что при кратковременном нагружении спрессованных древесных гранул они проявляют свойства упругого тела (рис. 3) аналогично тому, как ведет себя цельная древесина при кратковременных нагрузках [1, 12]. В нашем случае значение модуля упругости для спрессованной древесной шихты определяется величиной давления подпрессовки. С ростом величины усилия подпрессовки возрастает напряжение деформации сжатия древесной гранулы.

Результаты проведенного экспериментального исследования позволяют утверждать, что процесс формирования древесных гранул взаимосвязан с температурой прессования и влажностью древесной шихты. При этом модуль продольной упругости в большей степени зависит от температуры процесса прессования и в меньшей от влажности и размера фракции шихты. Величина модуля упругости уменьшается при нагревании прессуемой шихты в диапазоне температур 20-98 ºС. При температурах 98-150 ºС не отмечено изменение величины модуля Юнга (рис. 4). Фракционный состав шихты не оказывает заметного влияния на модуль упругости. Модуль Юнга также не зависит от влажности прессуемой древесной шихты за исключением значений влажности менее 6-8 % (рис. 5). При этих значениях влажности величина модуля упругости древесной гранулы снижается на 20-30 %. Деструкция древесной гранулы наблюдается при влажности 6-8 %, полное разрушение наступает при влажности 2 %. Согласно мнению Ивина Е.Л. вода способствует распространению лигнина в древесной шихте и влияет на качество прессуемых гранул [2].

Выводы:

1. Экспериментально установлено, что при прессовании древесной шихты в фильере возникают преимущественно упругие деформации в спрессованной грануле;

2. Зависимость модуля упругости от усилия подпрессовки для прессуемой древесной шихты имеет линейный характер;

3. Величина модуля продольной упругости в большей степени зависит от температуры нагрева при прессовании древесных гранул и в меньшей

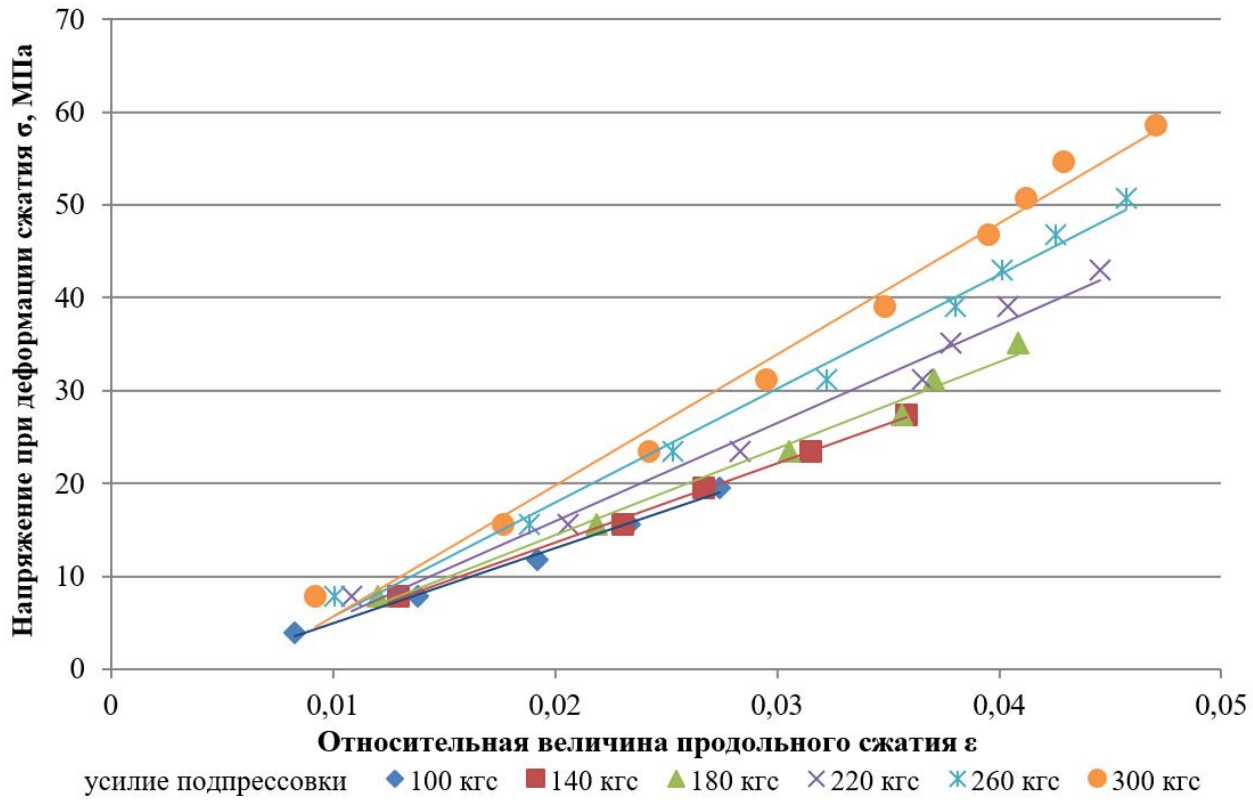

Рис. 3. Зависимость модуля упругости от величины подпрессовки (ель, ≤1 мм, 15%, 100 ºС)

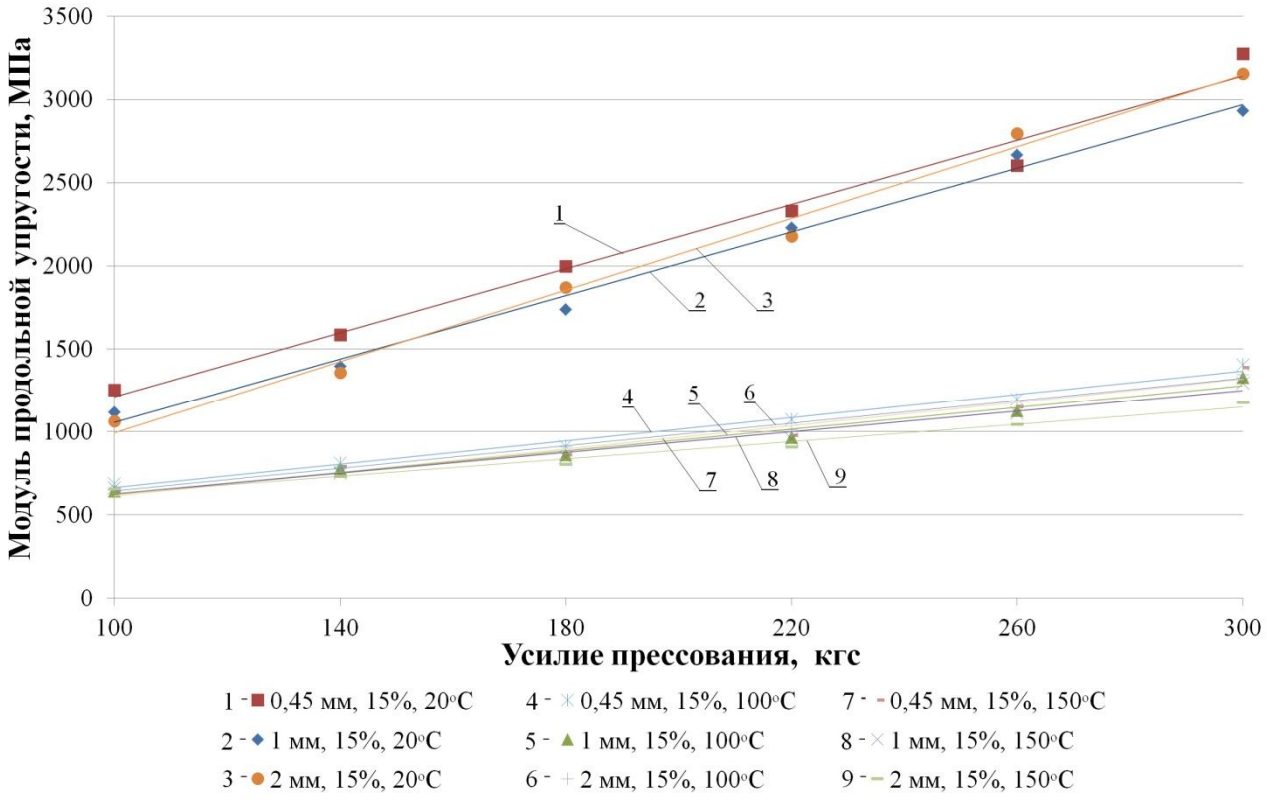

Рис. 4. Зависимость модуля упругости гранулы от размера фракции и температуры прессуемой шихты (ель)

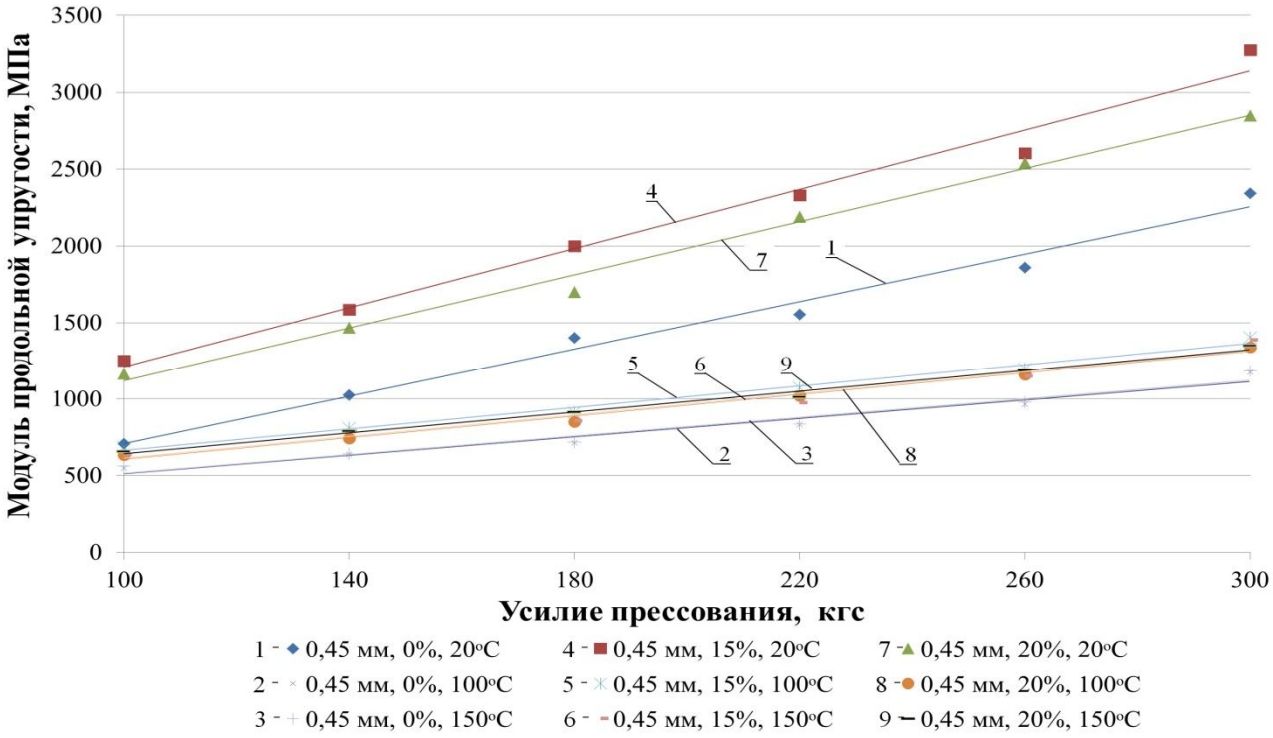

Рис. 5. Зависимость модуля упругости гранулы от влажности и температуры прессуемой шихты (ель)

степени от размера фракции и влажности шихты;

4. Температура нагрева древесной шихты в процессе прессования гранул оказывает существенное влияние на величину модуля продольной упругости до 98-102 ºС, при дальнейшем повышении температуры модуль упругости меняется незначительно.

5. При прессовании древесной шихты для получения гранул высокого качества оптимальными параметрами являются температура 100-102 ºС, влажность 10-15 %.

Библиографический список

1. Буров, А. В. Химия древесины и синтетических полимеров [Текст] / А. В. Буров, Р. Г. Алиев, Е. А. Павлова. – СПб., 2006. – 43 с.

2. Ивин, Е. Л. Гранулирование древесины. Практические и теоретические основы, или Что происходит внутри гранулятора [Текст] / Е. Л. Ивин, В. М. Глуховский // Биоэнергетика. – 2007. – № 2. – С. 64-67.

3. Косой, В. Д. Инженерная реология биотехнологических сред [Текст] / В. Д. Косой, Я. И. Виноградов, А. Д. Малышев. – СПб. : ГИОРГ, 2005. – 648 с.

4. Мюллер, О. Д. Влияние параметров технологического оборудования на качественные показатели древесных гранул [Текст] / О. Д. Мюллер, В. И. Малыгин, В. К. Любов // Лесной журнал. – 2012. – № 2. – С. 33-43.

5. Экспериментальное определение влияния на модуль юнга давления прессования древесной гранулы [Текст] / О. Д. Мюллер, В. И. Мелехов, Д. Л. Герасимчук, Н. М. Клюшин, Т. В. Тюрикова // Лесной журнал. – 2015. – № 3. – С. 69-74.

6. Никитин, В. М. Химия древесины и целлюлозы [Текст] / В. М. Никитин, А. В. Оболенская, В. П. Щеголев – М. : Лесн. пром-сть, 1978. – 368 с.

7. Тюленева, Е. М. Реологическая модель древесины [Текст] / Е. М. Тюленева // Хвойные бореальной зоны. – 2008. – № 1-2. – С. 179-183.

8. Уголев, Б. Н. Древесиноведение и лесное товароведение [Текст] / Б. Н. Уголев. – М. : Академия, 2006. – 272 с.

9. Akintunde, M. A. Effect of paper paste on the calorific value of sawdust briquette [Text] / M. A. Akintunde, M. E. Seriki // Journal of Mechanical and Civil Engineering. – 2013. – Vol. 2. – Iss. 1. – P. 7-17.

10. Odusote, J. K. Production of Paperboard Briquette Using Waste Paper and Sawdust [Text] / J. K. Odusote, S. A. Onowumab, E. A. Fodeke // Journal of Mechanical Engineering and Technology. – 2016. – Vol. 13. – No. 1. – P. 80-88.

11. Assessment of a new die pelleting rig attached to a texture analyzer to prodict process-ability of wood pellets. Power consumption and pellet quality [Text] / C. Salas-Bringas, T. Filbakk, G. Skjevrak, O.-I. Lekang, R. B. Schüller // Annual transaction of the Nordic Rheology Society. – 2010. – Vol. 18. – P. 87-93.

12. Kuti, O. A. Performance of Composite Sawdust Briquette Fuel in a Biomass Stove under Simulated Condition [Text] / O. A. Kuti // Department of Mechanical Engineering, Technical Report. – 2009. – Vol. 12. – No. 4. – P. 284-288.

References

1. Burov A.V., Aliev R.G., Pavlova E.A. *Khimiya drevesiny i sinteticheskikh polimerov* [Chemistry of wood and synthetic polymers]. Saint Petersburg, 2006, 43 p. (in Russian)

2. Ivin E.L., Glukhovskiy V.M. *Granulirovanie drevesiny. Prakticheskie i teoreticheskie osnovy, ili Chto proiskhodit vnutri granulyatora* [Granulation of wood. Practical and theoretical basis, or what happens inside the granulator] *Bioenergetika* [Bioenergetics], 2007, no.2, pp. 64-67. (in Russian)

3. Kosoy, V.D., Vinogradov, Ya.I., Malyshev, A.D. *Inzhenernaya reologiya biotekh-nologicheskikh sred* [Engineering rheology of biotechnological environments]. Saint Petersburg, 2005, 648 p. (in Russian)

4. Myuller O.D., Malygin V.I., Lyubov V.K. *Vliyanie parametrov tekhnologiche-skogo oborudovaniya na kachestvennye pokazateli drevesnykh granul* [Influence of the parameters of technological equipment on the quality of wood pellets]. *Lesnoy zhurnal* [Forest magazine]. 2012, no. 2, pp. 33-43. (In Russian)

5. Myuller O.D., Melekhov V.I., Gerasimchuk D.L., Klyushin N.M., Tyurikova T.V. *Eksperimental'noe opredelenie vliyaniya na modul' yunga davleniya pressovaniya drevesnoy granuly* [Experimental determination of the impact on the Young's modulus pressure of pressing of wood pellet]. *Lesnoy zhurnal* [Forest magazine]. 2015, no. 3, pp. 69-74. (In Russian)

6. Nikitin V.M., Obolenskaya A.V., Shchegolev V.P. *Khimiya drevesiny i tsellyulozy* [Chemistry of wood and cellulose]. Moscow, 1978, 368 p. (In Russian)

7. Tyuleneva E.M. *Reologicheskaya model' drevesiny* [Rheological model of wood] *Khvoynye boreal'noy zony* [Coniferous boreal zone]. 2008, no.1-2., pp. 179-183. (In Russian)

8. Ugolev B.N. *Drevesinovedenie i lesnoe tovarovedenie* [Wood Science and Forest Commodity Science]. Moscow: Publishing center "Academy", 2006, 272 p. (In Russian)

9. Akintunde, M.A., Seriki, M.E. Effect of paper paste on the calorific value of sawdust briquette. Journal of Mechanical and Civil Engineering, 2013, vol. 2, iss.1, pp. 7-17

10. Odusote J.K., Onowumab S.A., Fodeke E.A. Production of Paperboard Briquette Using Waste Paper and Sawdust. Journal of Mechanical Engineering and Technology, 2016, vol. 13, no.1, pp. 80-88.

11. Salas-Bringas C., Filbakk T., Skjevrak G., Lekang O.-I., Schüller R.B. Assessment of a new die pelleting rig attached to a texture analyzer to prodict process-ability of wood pellets. Power consumption and pellet quality. Annual Transactions of the Nordic Rheology Society. 2010, vol. 18, pp. 87-93.

12. Kuti O.A. Performance of Composite Sawdust Briquette Fuel in a Biomass Stove under Simulated Condition. Department of Mechanical Engineering, Technical Report, 2009, vol 12, no.4, pp. 284-288.

Сведения об авторах

Клюшин Николай Михайлович – аспирант кафедры Технологии лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, Российская Федерация; e-mail: n.klyushin@narfu.ru

Мелехов Владимир Иванович – профессор кафедры Технологии лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», доктор технических наук, профессор, г. Архангельск, Российская Федерация; e-mail: v.melekhov@narfu.ru

Мюллер Оскар Давыдович – профессор кафедры Океанотехника и энергетические установки, ИСМАРТ, филиал ФГАОУВО Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В.Ломоносова в г. Северодвинске, доктор технических наук, доцент, г. Северодвинск, Российская Федерация; e-mail: ockar@mail.ru

Воронин Александр Михайлович – аспирант кафедры Технологии лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, Российская Федерация; e-mail: a.voronin@narfu.ru

Прохоров Владимир Вячеславович – аспирант кафедры Технологии лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск, Российская Федерация; e-mail: v.prokhorov@narfu.ru

Тюрикова Татьяна Витальевна – доцент кафедры Технологии лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств, ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», кандидат технических наук, г. Архангельск, Российская Федерация; e-mail: t.turikova@narfu.ru

Information about authors

Klyushin Nikolay Mikhaylovich – post-graduate student of Wood technology and wood processing machinery department, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov», Arkhangelsk, Russian Federation; e-mail: n.klyushin@narfu.ru

Melekhov Vladimir Ivanovich – Professor of Wood technology and wood processing machinery department, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov», DSc in Engineering, Professor, Arkhangelsk, Russian Federation; e-mail: v.melekhov@narfu.ru

Myuller Oskar Davydovich – Professor of Ocean engineering and energy systems department, ISMART, Branch of Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov in Severodvinsk, DSc in Engineering, Associate Professor, Severodvinsk, Russian Federation; e-mail: ockar@mail.ru

Voronin Aleksandr Mikhaylovich – post-graduate student of Wood technology and wood processing machinery department, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov», Arkhangelsk, Russian Federation; e-mail: a.voronin@narfu.ru

Prokhorov Vladimir Vyacheslavovich – post-graduate student of Wood technology and wood processing machinery department, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov», Arkhangelsk, Russian Federation; e-mail: v.prokhorov@narfu.ru

Tyurikova Tat'yana Vital'evna – associate Professor of Wood technology and wood processing machinery department, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov», PhD in Engineering, Arkhangelsk, Russian Federation; e-mail: t.turikova@narfu.ru