

О.Д. Мюллер¹, В.И. Малыгин¹, В.К. Любое²

¹ Филиал «Севмашвтуз» Санкт-Петербургского государственного морского технического университета

² Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова

Мюллер Оскар Давидович родился в 1948 г., окончил в 1973 г. Ленинградский политехнический институт им. М.И. Калинина, кандидат технических наук, доцент кафедры океанотехники и энергетических установок филиала «Севмашвтуз» С.-Петербургского государственного морского технического университета. Имеет более 50 печатных работ в области повышения энергоэффективности использования древесного сырья. E-mail: oskar@mail.ru



Малыгин Владимир Иванович родился в 1952 г., окончил в 1979 г. Университет Дружбы народов им. П. Лу-мумы, доктор технических наук, профессор, действительный член АИН РФ, проректор по научной работе филиала «Севмашвтуз» С.-Петербургского государственного морского технического университета. Имеет более 180 научных работ в области математического моделирования физических процессов при резании. Тел.: 8(818) 458-07-89



Любов Виктор Константинович родился в 1954 г., окончил в 1976 г. Архангельский лесотехнический институт, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой промышленной теплоэнергетики Северного (Арктического) федерального университета, почетный работник высшего профессионального образования РФ. Имеет более 180 публикаций в области теплоэнергетики. Тел.: 8(8182) 21-61-75



ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА КАЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДРЕВЕСНЫХ ГРАНУЛ

Разработана математическая модель и проанализировано влияние некоторых конструктивных параметров технологического оборудования на качество древесных гранул.

Ключевые слова: вторичные топливно-энергетические ресурсы, некондиционные отходы лесопромышленного комплекса, биотопливо, котлы, древесная мука, пресс-гранулятор, матрица, фильера, энергетический потенциал, эффективность.

Архангельская область является одним из крупнейших в Европе производителем лесной продукции, а, соответственно, обладает и большими запасами некондиционных отходов лесопромышленного комплекса. Данные отходы являются вторичными топливно-энергетическими ресурсами, однако иногда не находят применения и вывозятся на свалки и в отвалы, где, разлагаясь, наносят существенный вред окружающей среде. Поэтому с экологической и экономической точек зрения наиболее целесообразно их использование в качестве энергетического топлива. Наиболее развитой технологией энергетического использования древесных отходов является их сжигание в топках котлоагрегатов с получением тепловой энергии. Однако при реализации данной технологии возникает ряд проблем, связанных как с высокой влажностью древесного топлива, значительно уменьшающей его тепловую ценность, ухудшающей процесс горения и снижающей экономические показатели работы котлов в целом, так и с неоднородным гранулометрическим составом. Поэтому для обеспечения эффективного сжигания древесного топлива вводятся ограничения по его влажности, что требует дополнительных

технологических процессов, инвестиций, производственных и складских площадей, немалых затрат энергии. Низкая энергетическая плотность древесного топлива вызывает проблему, связанную со складированием большого количества топлива. Помимо необходимости больших складских площадей, свежие опилки и щепа при хранении порой самовоспламеняются. Ввиду малой энергоемкости и низкой насыпной плотности древесных отходов технология их прямого сжигания в теплогенерирующих установках является экономически выгодной, если плечо доставки древесного топлива до места его утилизации не превышает 50 км.

Для повышения энергетической ценности древесных отходов и увеличения их насыпной плотности в конце прошлого века была разработана технология гранулирования древесного топлива, которая на сегодняшний день является одной из самых перспективных. Стремительное развитие производства древесных гранул получило в Канаде, Скандинавских странах, Дании, Германии и др. С начала этого века бурными темпами растет производство древесных гранул и в России. С развитием производства древесных гранул появилось и производство автоматизированных котлов, предназначенных для их сжигания. Технологические процессы, заложенные в этих котлах, предъявляют повышенные требования к качеству произведенных древесных гранул.

Целью настоящего исследования является определение основных параметров технологического оборудования, влияющих на качественные показатели древесных гранул.

Основными показателями качества древесных гранул являются следующие:

- теплотворная способность, определяющая энергетическую ценность древесных гранул;
- зольность, превышение содержания которой выше допустимого уровня может привести к снижению КПД котла и даже к его выходу из строя;
- насыпная плотность, определяющая экономическую привлекательность транспортировки древесных гранул как топлива на значительные расстояния;
- истираемость (массовая доля мелкой фракции – пыли и опилок, которые образуются при транспортировке и хранении древесных гранул); высокая истираемость гранул может быть причиной потерь при обработке груза, снижения насыпной плотности, повышения пожарной опасности, а также снижения КПД котлов и даже выхода дорогостоящего оборудования из строя.

Теплотворная способность древесных гранул зависит от естественных характеристик древесного сырья, его состояния, зольности и влажности древесных гранул.

Зольность древесных гранул не может быть ниже естественной зольности древесины из которой они изготовлены. Фактическая зольность древесных гранул несколько превышает зольность древесного сырья, наиболее распространенными причинами этого эффекта являются:

- загрязнения минерального происхождения (песок, содержащийся в коре; грунт, песок, пыль, попадающие в древесину в процессе транспортировки, хранения, переработки и т.д.);
- термическое воздействие и загрязнение сырья в процессе сушки;
- гниль, плесень, грибок и другие виды порчи древесины.

Относительная влажность топливных гранул обычно составляет 6...12%. Снижение влажности происходит в сушилках на этапе подготовки древесного сырья к гранулированию. Превышение влажности нежелательно по ряду причин, среди которых основными являются:

- опасность разрушения гранул;
- снижение КПД теплогенерирующих установок;
- удорожание транспортировки в больших объемах.

Истираемость (прочность гранул), также как и насыпная плотность, зависит от технологических процессов прессования и таких факторов как:

- используемое сырье (например, гранулы из древесины с большей долей лигнина при прочих равных условиях прочнее);
- размер частиц в составе гранулы (если фракция слишком мала или слишком велика прочность гранул снижается);
- влажность исходного сырья и гранул (если относительная влажность выше 12% или ниже 6%, скорее всего гранулы будут непрочными);
- состояние и качество наладки пресса-гранулятора, матрицы и роликов;
- конструктивные особенности и качество матрицы.

Технология гранулирования довольно широко известна и используется во всем мире. Технологический процесс получения древесных гранул состоит из следующих этапов:

- предварительное измельчение исходного древесного сырья;
- сушка измельченной древесины до влажности 8...12%;
- измельчение высушенной древесины до размеров частиц не более 1,5 мм;
- прессование высушенной и измельченной древесной массы в пресс-грануляторе;
- охлаждение полученных гранул в охладителе.

Если рассматривать строение древесины под микроскопом, то можно увидеть, что основную ее массу составляют клетки веретенообразной формы, вытянутые вдоль ствола. Некоторое количество клеток вытянуто в горизонтальном направлении, т.е. поперек основных клеток. Таким образом, по структуре древесина представляет собой продольно-слоистое твердое тело с поперечными связями. Вследствие этого, физические свойства древесины в продольном (в направлении роста ствола) и поперечном направлениях сильно различаются.

Из технологического процесса, приведенного ранее, следует, что на выходе из мельницы, после прохождения ее фильтров, частицы древесного сырья не имеют определенной формы и по размерам соизмеримы с составляющими древесину клетками. Кроме того, пространственная ориентация древесных частиц в поступающей на прессование в пресс-гранулятор древесной муке хаотична, вследствие чего исходную массу подготовленного для прессования древесного сырья с достаточной для инженерных расчетов точностью можно считать порошком из частиц шарообразной формы с одинаковыми физическими свойствами по всем направлениям. На основании этого, для поступающей на прессование древесной муки справедливы все основные технологические параметры, которые используются для расчетов процесса прессования порошков. К числу таких параметров относятся:

- угол естественного откоса;
- насыпная плотность;
- сыпучесть;
- уплотняемость;
- адгезия.

Угол естественного откоса α образуется поверхностью конуса свободно насыпанного материала и горизонтальной плоскостью в его основании. Угол естественного откоса является также и углом трения.

Насыпная плотность ρ_0 зависит от плотности исходного материала, его пористости и влажности.

Сыпучесть материала, то есть его способность перемещаться под действием силы тяжести, оценивается временем истечения навески материала через калибро-

ванное отверстие. Чем лучше сыпучесть порошка, тем легче его прокатка, тем более плотной и прочной будет прессовка. На сыпучесть материала существенное влияние оказывают размеры частиц и их влажность.

Уплотняемость – способность вещества к уплотнению под воздействием определенного давления:

$$\Gamma = \frac{\partial(\rho/\rho_0)}{\partial p}, \quad (1)$$

где ρ – плотность исходного материала при давлении p .

Адгезия – явление налипания порошковидных материалов на поверхность валков при прессовании. Адгезионные силы, в первую очередь, оказывают влияние на захват частиц порошкового материала поверхностью прессовочных роликов.

В настоящее время для производства древесных гранул используется принцип формования гранул, заключающийся в продавливании древесной муки при помощи одного или нескольких прижимных валков через перфорированные поверхности. Различают машины для формования гранул бегунами, с продавливанием через перфорации горизонтальной поверхности, так называемые прессы с плоской матрицей (рис. 1, *а*), и продавливанием через поверхность перфорированного барабана вращающимися прижимными валками, прессы с барабанной матрицей (рис. 1, *б*).

Прессуемый материал прижимными валками продавливается через отверстия матрицы и на выходе срезается ножами на формовке определенной длины. Процесс получения древесных гранул можно условно разбить на три этапа:

- повышение плотности древесного сырья и давления в клиновом зазоре между цилиндрической поверхностью прессовочного ролика и поверхностью матрицы до плотности спрессованного материала $\rho_{п}$ и давления прессования $p_{п}$;
- вырезание гранулы из спрессованного древесного материала, на что расходуется часть достигнутого давления прессования $\Delta p_{ср}$;
- продавливание вырезанной гранулы через фильеру матрицы, на которое расходуется давление $p_{ср}$.

Указанные давления связаны между собой уравнением:

$$p_{п} = \Delta p_{ср} + p_{ср}. \quad (2)$$

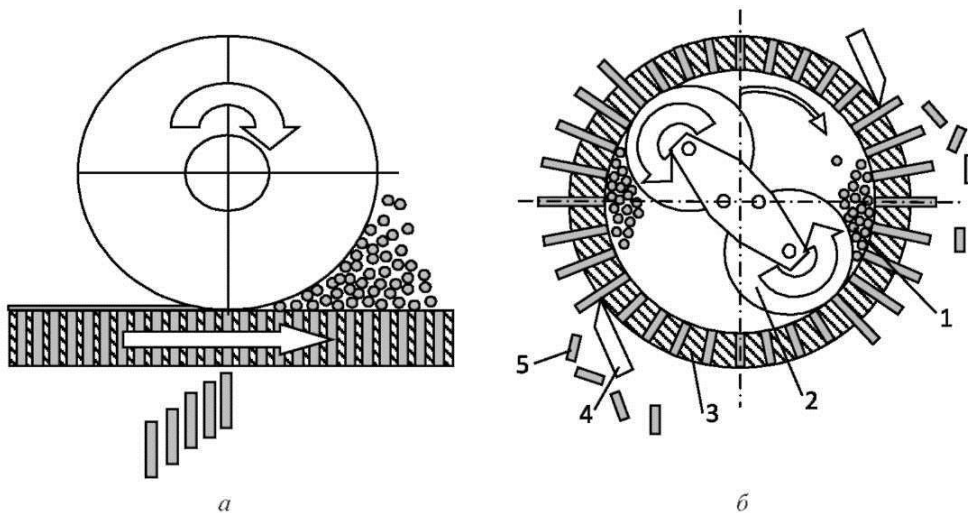


Рис. 1. Пресс-гранулятор: *а* – с цилиндрической матрицей; *б* – с барабанной матрицей; 1 – исходное сырье; 2 – прижимные валки; 3 – барабанная матрица; 4 – ножи; 5 – гранулы

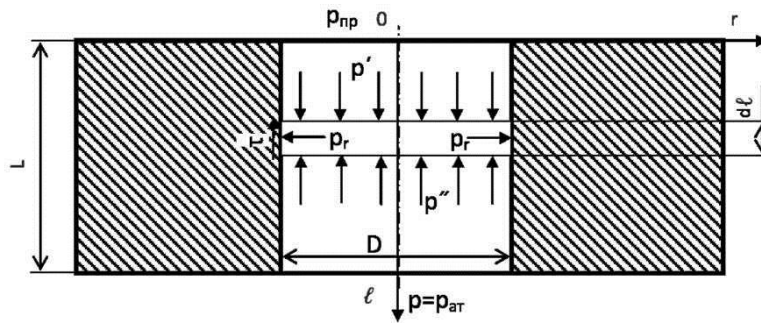


Рис. 2. Расчетная схема по определению проталкивающей силы для гранулированного топлива

Рассмотрим каждый этап по отдельности. Для предварительной оценки давления проталкивания $p_{пр}$ используем следующую модель процесса проталкивания гранулы через матричный канал (фильеру) (рис. 1).

Пусть матрица имеет толщину L и в ней имеется цилиндрическая фильера диаметром D , которая полностью заполнена цилиндрической гранулой. Определим условия, при которых эта гранула будет двигаться по каналу фильеры с постоянной скоростью. Для того чтобы гранула двигалась с постоянной скоростью, необходимо, чтобы сумма всех действующих на нее сил была равна нулю ($\sum F = 0$). Так как отверстие матрицы представляет собой цилиндр, то наиболее удобной для проведения анализа будет цилиндрическая система координат. Пусть вдоль оси цилиндра будет ось l и нормальная к ней ось r .

Выделим бесконечно малый цилиндрический элемент гранулы диаметром D и толщиной dl (см. рис. 2). Пусть на верхнюю торцевую поверхность выделенного элемента действует давление p' , а на нижнюю торцевую поверхность $-p''$. На боковую цилиндрическую поверхность выделенного элемента действует касательное напряжение трения τ и нормальное давление p_r . Тогда условие равновесия выделенного элемента запишется в следующем виде:

$$\frac{\pi D^2 (p' - p'')}{4} - \pi D \tau dl = 0. \quad (3)$$

После несложных преобразований уравнение приводится к виду

$$-dp = 4\tau \frac{dl}{D}. \quad (4)$$

В первом приближении можно принять, что местные касательные напряжения τ прямо пропорциональны местному нормальному давлению p_r :

$$\tau \sim p_r. \quad (5)$$

Уравнение (5) с учетом физических характеристик поверхностей трения и материала гранул k , запишем в следующем виде:

$$\tau = k p_r. \quad (6)$$

Полученные в процессе прессования древесные гранулы представляют собой твердое упруго-деформируемое тело. При поступлении исходного сырья на вход в фильеру матрицы под воздействием силы давления прессовочного валика происходит уплотнение исходного сырья и пластическая деформация уплотненной массы в цилиндр, т.е. формирование цилиндрической гранулы заканчивается на входе в фильеру. В этом случае развиваемое прессовочным роликом давление на входе в фильеру будет максимальным, которое затем снижается по мере продвижения спрес-

сованной массы по фильере. Так как осевое давление по длине фильеры снижается, то дополнительных пластических деформаций не происходит, а сама гранула по мере продвижения по фильере будет находиться в упруго-напряженном состоянии. Выбор в качестве расчетной модели цилиндрического элемента гранулы наружным диаметром D и бесконечно малой длины $d\ell$ приводит к тому, что перепад давления по длине этого элемента будет малым, упругие деформации будут также малы, вследствие чего упругое состояние этого элемента будет подчиняться закону Гука.

Исходя из указанных выше условий, радиальное давление p_r может быть определено через осевое давление p по зависимости

$$p_r = \varepsilon p, \quad (7)$$

где ε – коэффициент Пуассона.

С учетом (6) и (7) уравнение (4) принимает вид

$$dp = \frac{-4k \varepsilon p}{D} d\ell. \quad (8)$$

После разделения переменных и интегрирования получим

$$p = C \cdot \exp(-4k \varepsilon \ell/D), \quad (9)$$

где C – константа интегрирования.

Для определения константы интегрирования выберем граничное условие: при $\ell = L$ давление на торцевую поверхность $p = p_{\text{ат}}$.

После подстановки граничных условий в уравнение (9) получим

$$C = p_{\text{ат}} \cdot \exp(k \varepsilon L/D)$$

и уравнение (9) принимает вид

$$p = p_{\text{ат}} \cdot \exp\left(-\frac{k \varepsilon L - \ell}{D}\right). \quad (10)$$

Давление проталкивания $p_{\text{пр}}$ составит ($\ell = 0$)

$$p_{\text{пр}} = p_{\text{ат}} \cdot \exp\left(\frac{k \varepsilon L}{D}\right), \quad (11)$$

а сила проталкивания будет определяться по уравнению

$$F_{\text{пр}} = (p_{\text{пр}} - p_{\text{ат}}) \frac{\pi D^2}{4} \quad (12)$$

или с учетом (11)

$$F_{\text{пр}} = \frac{\pi D^2}{4} p_{\text{ат}} \left(\exp\left(\frac{4k\varepsilon L}{D}\right) - 1 \right). \quad (13)$$

Рассмотрим процесс обкатывания прессовочным роликом плоской матрицы, имеющей большое количество формирующих гранулы фильер. Фильеры, как правило, располагаются в шахматном порядке, перегородки между соседними фильерами малы (рис. 3).

Поскольку процесс формирования гранул непрерывный, то все фильеры заполнены спрессованными от предыдущего прохождения обкаточного ролика цилиндрическими гранулами, верхняя торцевая поверхность которых расположена заподлицо с плоской поверхностью матрицы. На матрицу непрерывно поступает исходное древесное сырье, которое образует перед прессовочным роликом слой сырья с насыпной плотностью ρ_0 и с углом естественного откоса α . Такой же слой исходного сырья образуется и за роликом, но это уже будет исходный слой сырья для следующего ролика.

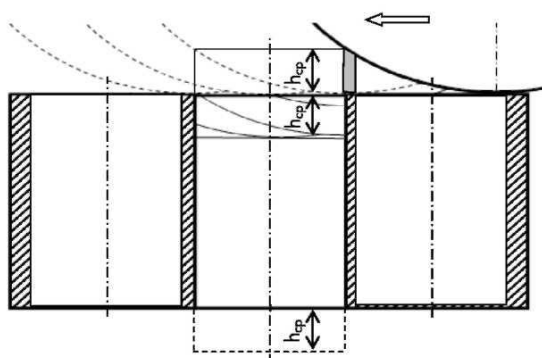


Рис. 3. Схема обкатывания матрицы прессовочным роликом

При угле $\varphi_{тр} \geq \alpha$ сила давления со стороны обкатывающего ролика на древесную шихту (муку) будет сталкивать сырье, образуя перед собой волну, перемещающую массу сырья с углом естественного откоса α . Начиная с угла $\varphi = \alpha$ (рис. 4) нормальная сила давления со стороны обкаточного ролика совпадает с углом естественного откоса α и с этого момента начнется уплотнение древесной шихты. Исходное сырье будет прессоваться в виде непрерывной ленты с уменьшающимся поперечным сечением в направлении, обратном перемещению прессовочного ролика.

Достижение давления в слое спрессованного сырья над фильерой давления проталкивания $p_{пр}$ не вызовет движение гранулы в фильере, т.к. над ней будет непрерывная лента спрессованного сырья. Для того, чтобы входная грань фильеры вырубил из этой ленты часть спрессованного материала, необходимо приложить дополнительное усилие, а значит необходимо создать дополнительный перепад давления $\Delta p_{сп}$ над давлением проталкивания $p_{пр}$. Величину этого перепада давления можно определить через напряжение среза $\sigma_{сп}$ для спрессованного материала из зависимости

$$\frac{\pi D^2}{4} \Delta p_{сп} = \pi D h_{сп} \sigma_{сп},$$

где $h_{сп}$ – толщина среза, или

$$\Delta p_{сп} = \frac{4 h_{сп} \sigma_{сп}}{D}. \quad (14)$$

При прокатке прессовочного ролика по матрице расстояние (толщина спрессованной древесной ленты) между цилиндрической поверхностью и поверхностью матрицы в начале очередного матричного канала по ходу движения прессовочного ролика (см. рис. 3) уменьшается, а плотность спрессованной массы и давление в ней возрастают. При уменьшении толщины спрессованной древесной ленты над входной кромкой фильеры до $h_{сп}$ величина избыточного давления в спрессованной ленте достигнет $p_{н} = \Delta p_{сп} + p_{пр}$. Входная кромка фильеры выполняет роль пуансона, вырезая из спрессованной ленты (по мере накатывания прессовочного ролика на входное отверстие фильеры) цилиндр поперечным сечением $\pi D^2/4$ и высотой $h_{сп}$ и вдавливая его в фильеру. Таким образом, за один проход прессовочного ролика над фильерой будет формироваться гранула с теоретическим объемом:

$$V_{т} = \pi D^2 h_{сп} / 4.$$

Действительный же объем сформированной гранулы будет несколько выше за счет разрушения и вдавливания в матричные каналы материала пе-

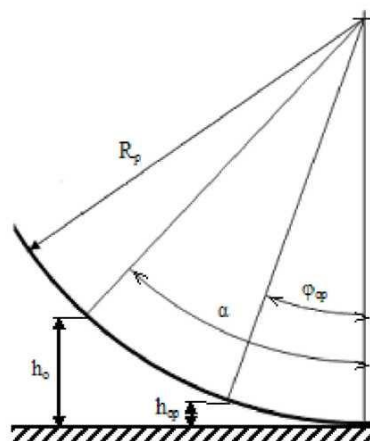


Рис. 4. Схема прессования порошкового сырья

регоронок между отверстиями перфорированной ленты прессованного материала. Если площадь поверхности матрицы, обкатываемой прессовочным роликом равна S_{cp} а количество фильер равно N , то производительность фильеры по сформированной грануле за один проход прессовочного ролика составит:

$$V_1 = S_{cp} h_{cp} / N. \quad (15)$$

Если число прессовочных роликов z , а число оборотов водила роликов в минуту n , то производительность пресса по гранулам составит:

$$V = \frac{\pi n}{30} z S_{cp} h_{cp}. \quad (16)$$

Полное давление формирования древесной гранулы согласно (1), (11) и (14) составит:

$$p_{п} = p_{ат} \left(\frac{k \varepsilon L}{D} \right) + \frac{h_{cp} \sigma_{cp}}{D}. \quad (17)$$

Если рассматривать массу вещества постоянной, а занимаемый ею объем в виде призмы с постоянным поперечным сечением и переменной высотой, то связь между плотностями вещества и высотой призм определится зависимостью:

$$\frac{\rho_o}{\rho} = \frac{h}{h_o}. \quad (18)$$

Исходя из этого уравнения конечная толщина прессования h_{cp} в зависимости от желаемой плотности древесных гранул $\rho_{п}$ и насыпной плотности исходной древесной массы ρ_o составит (рис. 4):

$$h_{cp} = \frac{\rho_o h_o}{\rho_{п}}. \quad (19)$$

После подстановки зависимости (19) в уравнение (17) получим

$$p_{п} = p_{ат} \left(\frac{k \varepsilon L}{D} \right) + \frac{\rho_o h_o \sigma_{cp}}{\rho_{п} D}. \quad (20)$$

Исходя из рис. 4 можно записать

$$h_o = R_r (1 - \cos \alpha), \quad (21)$$

где R_r – радиус прессовочного ролика.

С учетом (21) уравнение (20) примет вид

$$p_{п} = p_{ат} \left(\frac{k \varepsilon L}{D} \right) + \frac{\rho_o R_r (1 - \cos \alpha) \sigma_{cp}}{\rho_{п} D}. \quad (22)$$

Все порошковые материалы характеризуются коэффициентом уплотняемости (1), который обычно представляют в виде зависимости: $\rho/\rho_o = \psi(p)$ (рис. 5).

По требуемой плотности древесных гранул $\rho_{п}$, через их относительную плотность, зная влияние на нее давления (см. рис. 5), определяется требуемое давление прессования $p_{п}$. По найденному давлению прессования и физическим параметрам гранулируемого вещества по зависимости (22) определяются необходимые геометрические характеристики пресса-гранулятора.

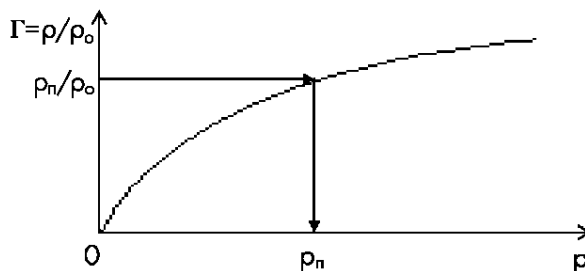


Рис. 5. Изменение относительной плотности гранулируемого вещества от приложенного давления

По результатам, выполненного теоретического анализа, можно сделать следующие выводы:

1. На качественные показатели древесных гранул, помимо физико-технических характеристик исходного древесного сырья (вид древесины, размеры частиц, исходная влажность, адгезионные свойства частиц, коэффициент внутреннего трения и уплотняемость), влияет относительная длина матричного канала, диаметр прессовочного ролика и значение коэффициента Пуассона для спрессованного материала.

2. Учитывая, что основные физико-технические характеристики древесных гранул зависят от относительной плотности спрессованного материала, необходимо провести экспериментальные исследования для определения этих характеристик и влияния на них гранулометрического состава древесной муки, ее влажности, температуры и давления прессования.

3. Полученные теоретические зависимости определяют направления экспериментальных исследований по повышению качества гранулированного древесного топлива.

Поступила 24.02.11

O.D. Mueller¹, V.I. Malygin¹, V.K. Lubov²

¹ Saint-Petersburg State Maritime Technical University, Severodvinsk branch

² Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov

Effect of technological equipment parameters on wood pellets quality factors

Mathematic model describing the effect of certain structural parameters of a technological equipment on the wood pellets quality has been developed.

Key words: secondary fuel-energetic resources, off-grade logging and sawing residues, biofuel, boilers, wood powder, pelleting press, master form, extrusion nozzle, energy potential, effectiveness.