

Выводы.

1. Разработанная математическая модель движения идеальной жидкости в рабочем органе перемешивающего устройства – трубке переменного сечения, равномерно вращающейся относительно вертикальной оси рабочей камеры, реализована средствами вычислительного комплекса MATLAB в форме численной модели.

2. В результате модельного эксперимента получены зависимости составляющих скоростей движения жидкости в рабочем органе при входном значении скорости вращения $v_{\phi}^{\text{вход}} = 0,1$ м/с по текущему радиусу r вращения в диапазоне изменения от $r_1 = 0,01$ м до $r_2 = 0,02$ м.

3. Полученные функциональные зависимости радиальной, окружной и осевой составляющей абсолютной скорости жидкости по радиусу вращения в рабочей камере перемешивающего устройства дают возможность определить оптимальный скоростной режим движения жидкости в трубке переменного

сечения перемешивающего устройства и, как следствие, решать задачи по его геометрическому и динамическому синтезу.

Литература

1. Васильев, О. Ф. Основы механики винтовых и циркуляционных потоков / О. Ф. Васильев. – М. : Л., 1958.
2. Гуюмджян, П. П. Движение жидкости в канале переменного сечения / П. П. Гуюмджян, С. О. Кожевников, В. А. Дельцова // Информационная среда вуза: Материалы X Междунар. науч.-техн. конф. Иван. гос. архит.-строит. акад. – Иваново, 2003. – С. 203–205.
3. Кожевников, С. О. Методы диспергирования жидких сред / С. О. Кожевников, П. П. Гуюмджян // Информационная среда вуза: Материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф. – Иваново, 2008. – С. 865–868.
4. Кожевников, С. О. Обзор основных типов перемешивающих устройств для получения технологических жидкостей / С. О. Кожевников // Вестник научно-промышленного общества. Вып. 6. – М., – 2003. – С. 67–69.
5. Шерман, Ф. Эмульсии / Ф. Шерман. – Л., 1972.

УДК 662.6/9

А. Н. Попов, В. К. Любов, О. Д. Мюллер, Е. И. Попова
Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова

ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ ДРЕВЕСНЫХ ГРАНУЛ НА ГРАНУЛЯТОРЕ С ПЛОСКОЙ МАТРИЦЕЙ

Цель данной работы заключалась в проведении экспериментальных работ по определению силы прессования мелкодисперсного древесного сырья в каналах плоских матриц грануляторов. В статье дано описание и рассмотрен принцип действия исследовательской установки с тензометрической системой измерений. Проведен сбор и анализ фиксируемых параметров. Сравнение результатов расчетного и экспериментального определения давления прессования позволило сделать вывод о применимости разработанной математической модели.

Пресс-гранулятор, плоская матрица, прессования, древесное сырье, давление прессования, тензометрическая система, датчик силы, математическая модель.

The purpose of this work is an experimental testing of wood raw material in the channels of the flat die pellet mills to determine the pressing force. The article describes the principle of operation of the research facility equipped strain gauge measurement system. The analysis of recorded parameters are completed. The comparison of experimental and estimated data of the extrusion pressure has confirmed the applicability of the developed mathematical model.

Pellet mill, flat die, pressing, wood raw material, extrusion pressure, strain gauge system, force sensor, mathematical model.

Введение.

Одним из широко распространенных активно используемых возобновляемых видов энергоресурсов являются древесные топливные гранулы (пеллеты). Согласно ежегодному отчету об использовании биотоплива в ЕС 2013 [3], потребление древесных гранул в 2012 г. составило 14 млн т. Прогнозируется дальнейший рост потребления гранул, и по данным аналитического прогноза POYRY, ежегодное использование пеллет в Европе к 2050 г. достигнет 23,8 млн т.

Падение цен на первичные энергоресурсы, снижение курса национальной валюты РФ, увеличение потребления биотоплива и вовлечение в энергосистемы новых видов биотоплива (биодизель, биогаз), колоссальные объемы неосвоенных природных ре-

сурсов РФ открывают для компаний, производящих биотоплива, и для биоэнергетики в целом, возможности для успешного развития, как внутри страны, так и за рубежом.

Основная часть.

Наиболее распространенным методом формования при изготовлении древесных гранул является прессование продавливанием сырья через каналы матрицы цилиндрическими роликами. Эффективность гранулирования зависит от физико-механических свойств исходного древесного сырья, технологических режимов и условий протекания процесса. При этом нет достаточно обоснованной информации и технической литературы по компонентам, рекомендуемому оборудованию и техноло-

гическим процессам заводов, производящих древесные гранулы. В научно-технической литературе и нормативно-технической документации отсутствуют данные по оптимальным технологическим условиям и режимам формования гранул методом прессования, обеспечивающим стабильно высокие теплотехнические и прочностные характеристики готового продукта.

Пресс-гранулятор немецкой фирмы Amandus Kahl, тип 14-175 (рис. 1), с плоской матрицей в сборке имеет следующие габаритные размеры: длина – 1125 мм, ширина – 855 мм, высота – 2012 мм; его масса составляет 330 кг. Принцип действия установки основан на продавливании измельченного материала двумя роликами 12 диаметром 130 мм и шириной 29 мм через каналы матрицы 8, в которых происходит уплотнение сырья.

Предварительно подготовленное мелкодисперсное сырье загружается в приемный бункер 16 с перемешивающим устройством, из которого одинарным спиральным шнеком SSF диаметром 40 мм подается в прессовальную камеру 3. Приводом шнекового транспортера является двигатель постоянного тока.

В центре прессовальной камеры находится главный вал 13 диаметром 30 мм, соединенный с вращающимся дном 6, режущим устройством 7 и бегунковой головкой 9. Верхняя часть камеры ограничена кожухом 4, закрытым противопылевым колпаком 5 с рассекателем поступающего сырья. В пазы корпуса прессовальной камеры 14 устанавливается матрица диаметром 175 мм и высотой, равной пятикратному значению диаметра ее каналов. По всему периметру матрица плотно прилегает к стенкам прессовальной камеры, с помощью термопары контактного типа фиксируется ее температура. Оси роликов распо-

жены в бегунковой головке таким образом, что ролики с подшипниковой опорой и креплением образуют единый узел.

Цилиндрическая наружная поверхность пресующих роликов имеет рифление, нанесенное параллельно оси вращения ролика и предназначенное для лучшего сцепления роликов с прессуемым материалом. Высота расположения бегунковой головки над матрицей устанавливается регулировочной гайкой 10 и фиксируется контргайкой 11.

Средняя часть прессовальной камеры жестко соединена с опорой подшипников главного вала. На ее фронте расположено устройство для выпуска готовых гранул. При выходе готовых гранул из каналов матрицы происходит их срезание и перемещение к выпускному устройству за счет вращающегося дна. В нижней части прессовальной камеры установлен горизонтальный редуктор 2 с понижающей передачей. Вал приводится во вращение асинхронным двигателем 1 мощностью 3 кВт, расположенным в корпусе гранулятора 18, где также установлен распределительный шкаф 17 для управления прессом и дозирующим устройством 15. Оба привода имеют частотное регулирование, осуществляемое посредством блоков управления Danfoss FC 300 и DigiDrive.

Каналы матрицы на входном участке имеют форму конуса, выполненного с помощью зенкования под углом 40°. Слой спрессованной древесной массы на 45,5 % площади кольцевой области прессования расположен над каналами матрицы.

Для сбора данных о работе пресса использовались датчики силы модели CMM2-T1 компании Dacell. Их выбор обусловлен тем, что они имеют оптимальные параметры для анализа силы сжатия при компактных размерах и малой массе. Тензодатчики располагаются внутри прессовальной камеры под

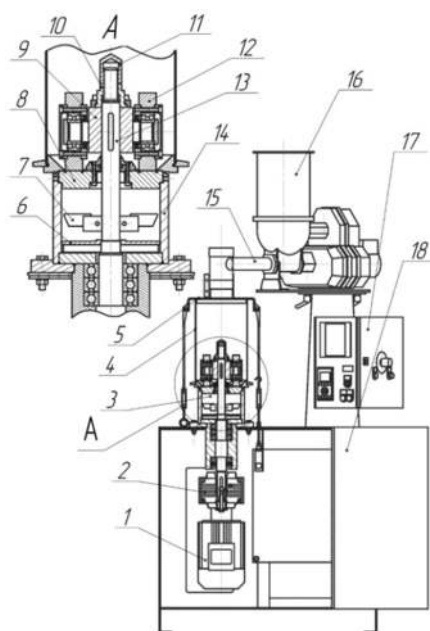


Рис. 1. Пресс-гранулятор Amandus Kahl, тип 14-175

матрицей и воспринимают усилия, создаваемые роликами. Обработка сигналов осуществляется с помощью тензометрической станции ZET 017-T8, воспринимающей и преобразующей сигнал для отображения информации в числовом и графическом виде на ПК в режиме реального времени. Подключение к ПК осуществляется по шине HighSpeed USB 2.0, питание – от блока 220 → 12 В. Тензостанция проводит измерения сразу по трем каналам. Датчики силы подключаются по мостовой схеме, питание осуществляется от встроенного генератора переменным током с напряжением 5 В и частотой 180 Гц.

Для обработки получаемых от датчиков данных на ПК используется специализированное программное обеспечение ZETLAB TENS0. В приложениях «Тензомер» выбирается генератор тока, задается чувствительность и предел измерений каждого датчика в отдельности, а через «Многоканальный самописец» происходит вывод показаний в графическом виде.

Применение датчиков силы позволило определить оптимальные технологические условия и режимы формования гранул методом прессования, обеспечивающие стабильно высокие теплотехнические и прочностные характеристики готового продукта. Каждый из них имеет предел измерения 1000 кгс и допускает перегрузку 150 %.

Разработанная методика проведения эксперимента с использованием дополнительных измерительных средств позволила получить комплекс данных, характеризующих процесс прессования древесного материала, включая усилия при продавливании сырья через каналы матрицы в совокупности с температурой матрицы, а также температурой и влажностью среды в кожухе камеры прессования.

Установка тензодатчиков потребовала механического вмешательства в конструкцию пресса, а именно: в корпус прессовальной камеры. В пространстве между нижней поверхностью матрицы и режущим устройством вмонтирована жесткая площадка, кото-

рая является измерительным столом для установки трех датчиков силы. Кольцевая опора и измерительный стол установлены в прессовальной камере гранулятора под матрицу таким образом, что все усилия, передаваемые роликами матрице через прессуемое сырье, полностью передаются датчикам силы (рис. 2). Данное решение обеспечивает минимальное вмешательство в конструкцию пресс-гранулятора.

В нижнюю часть камеры прессования 1 установлена кольцевая опора 2 с вырезом 3 для выхода спрессованных древесных гранул. На опору установлен круглый измерительный стол 4, который опирается на кольцо с помощью трех опорных ребер 5, расположенных под углом 120°. В измерительный стол по концентрической окружности вмонтировано три датчика силы 6, расположенных также под углом 120°. На датчики силы через плиту 8 опирается плоская матрица 9, образуя зазор 10 с ее опорной поверхностью. Штатный стопор 11 предохраняет матрицу от проворачивания.

Согласно техническим характеристикам рабочая температура датчика СММ2-Т1 находится в диапазоне от -20 до +70 °С. При работе температура матрицы пресс-гранулятора может достигать 160 °С и выше, поэтому была предусмотрена система охлаждения во избежание погрешности снимаемых показаний, перегрева датчиков и выхода их из строя. Оптимальной с конструктивной точки зрения представляется система тепловых труб, позволяющая отводить теплоту от датчиков, поэтому кольцевая опора внутри имеет канал 7, по которому принудительно с малой скоростью прокачивается вода из системы холодного водоснабжения.

Датчики силы перед проведением исследований были откалиброваны с помощью разрывной машины с предельным усилием 5 кН с шагом в 200 Н. В результате были получены калибровочные таблицы, на основании которых построены линии тренда и определены коэффициенты, после чего уточнялась чувствительность датчиков силы.

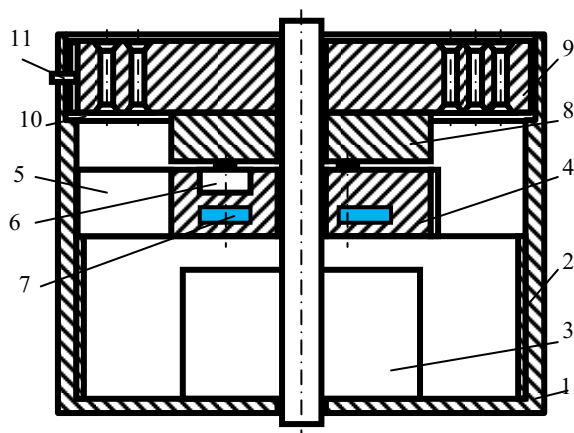


Рис. 2. Установка датчиков силы: 1 – нижняя часть камеры прессования; 2 – кольцевая опора; 3 – прямоугольный вырез в опорном цилиндре; 4 – измерительный стол; 5 – опорные ребра измерительного стола; 6 – датчик силы; 7 – канал для охлаждающей жидкости; 8 – опорная плита; 9 – матрица; 10 – зазор; 11 – стопор; 12 – штуцер

Для всех датчиков был найден коэффициент несоответствия показаний: первого – 2,4121; второго – 2,3430 и третьего датчика – 2,2319. На основе полученных коэффициентов была вычислена чувствительность датчиков, которая позволила проводить измерения с погрешностью не более 1 % от измеряемой величины, и составила 0,62; 0,573; 0,581 мВ/В соответственно для первого, второго и третьего датчика.

Калибровка показала, что датчики имеют линейную зависимость выходного напряжения от приложенного усилия, что позволяет считать полученные данные достоверными во всем диапазоне работы. Следует отметить, что датчики силы имеют большую погрешность при малых нагрузках (приблизительно до 500 Н), но суммарное усилие в 1500 Н возникает лишь на ранних пусковых стадиях работы пресс-гранулятора.

В качестве сырья для исследований была выбрана мелкодисперсная древесная мука разного гранулометрического состава, полученная из хвойных пород древесины.

С целью обеспечения бесперебойной работы пресс-гранулятора важно правильно выбрать оптимальные режимы для сырья с различным гранулометрическим составом и физическими свойствами. В результате отладки режимов работы пресс-гранулятора древесные гранулы класса качества А1 [2] или выше имели светлую окраску без признаков пережога и гладкую блестящую поверхность, образующуюся за счет застывания лигнина.

При проведении эксперимента на пресс-грануляторе выполнялся сбор следующих параметров: частоты вращения дозирующего шнека, уставки мощности, нагрузки на главный двигатель, температуры поверхности матрицы. Для записи вышеперечисленных параметров использовался фотоаппарат, делающий кадры с периодичностью в 30 с. Во время эксперимента велась запись данных с датчиков силы в табличный файл ПО Zetlab.

При выполнении исследований проводился контроль влажности и гранулометрического состава древесной муки, снимались показания с блоков управления Danfoss FC 300 и DigiDrive: частота вращения дозирующего шнека, установка мощности, нагрузка на главный двигатель, температура поверхности матрицы.

Для определения величины давления прессования проводилась запись усилий и выходных напряжений с датчиков силы. График изменения нагрузки во времени с момента пуска до выхода на рабочий режим гранулятора представлен на рис. 3.

Данный эксперимент помог определить силы воздействия роликов на слой сырья, при которых наблюдается стабильный выход древесных гранул с высокими показателями качества. С увеличением толщины слоя на матрице и плотности прессуемого сырья в каналах прикладываемые роликами силы растут и после достижения рабочего режима гранулятором составляют 15,73 кН.

Экспериментальные исследования показали [1], что наличие парогенератора в технологической схеме позволяет использовать свежий пар для тепловой

обработки сырья перед прессованием. Это дает возможность расширить влажностный диапазон, сдвинув его в сторону более сухого материала, уменьшить время нахождения сырья в каналах матрицы и вероятность его пересушки, увеличить производительность установки. Подача пара в момент пуска установки позволяет избежать сильных перегрузок и даже аварийный останов пресса.

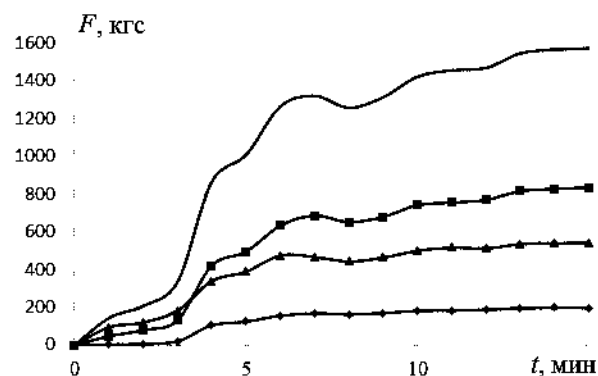


Рис. 3. Изменение прессовочного усилия:

—◆— датчик силы №1; —▲— датчик силы №2;
—■— датчик силы №3; ——— аппроксимирующая сила

Отработка режимов прессования для разных пород древесины позволила определить оптимальные параметры работы пресс-гранулятора с тепловой обработкой сырья паром и без нее [1]. Температура насыщенного пара находилась при этом в диапазоне 125–135 °С. Исследования показали, что для каждого древесного сырья требуется индивидуальный поиск оптимальных режимов прессования с момента пуска до выхода на рабочий режим.

В процессе прессования на поверхности матрицы образуется слой сырья, толщина которого регулируется с помощью установочного зазора. Ролики в каждый момент времени воздействуют на слой только в двух площадях, представляющих собой вогнутые поверхности, ограниченные двумя сегментами цилиндра. Интенсивность нагрузки в каждой из этих площадей нелинейная. Площадь соприкосновения роликов и слоя определялась ручным измерительным инструментом и составляла 0,000704 м².

В ходе экспериментов с помощью тензометрической системы измерений была определена сила воздействия прессовочных роликов на уплотненный слой древесной муки. Для вычисления давления прессования учтены геометрические параметры матрицы. Площадь поверхности, занимаемая каналами матрицы, как было отмечено ранее, составляет 45,5 % от общей площади. Полезная сила и площадь соприкосновения роликов с прессуемым сырьем находились по пропорции, они составляют 7,16 кН и 0,00032032 м² соответственно. Давление, возникающее над каналами плоской матрицы, в среднем составляет 22,35 МПа.

При разработке математической модели [1] использована теория упругости и пластичности, применимая для частиц с размером до 2 мм. Для сырья с более высоким пределом крупности частиц приме-

нимость модели упруго-пластического формирования гранулы находится под сомнением. В этом случае желательно использовать реологическую математическую модель, учитывающую упругие, вязкие и пластические свойства древесины.

При выполнении экспериментальных исследований по подготовке мелкодисперсного древесного сырья и его прессованию на грануляторе с плоской матрицей использовалось сырье с размером до 2 мм, поэтому расчет давления прессования может быть выполнен по разработанной модели:

$$p_{np} = \sigma_{\tau} \frac{4k \left[R_r (1 - \cos \alpha) - \frac{p_{np}}{E_w} h_2 \right]}{d_0 \left(1 + 2 \frac{l_k}{d_0} \operatorname{tg} \gamma \right) \left(\ln \frac{p_{np}}{p_0} + k \right)} +$$

$$+ 2\sigma_{\tau} \left(1 + \frac{\mu_{tp} v}{2(1 - \cos \gamma) + \sin^2 \gamma} \right) \cdot \ln \left(1 + \frac{2l_k}{d_0} \operatorname{tg} \gamma \right) +$$

$$+ 4 \frac{k l_{\text{ц}}}{d_0} \frac{E_w}{(1 + v)} \frac{(D_{\text{гр}} - d_0) \left(\frac{D_{\text{гр}}^2}{d_0^2} - 1 \right)}{d_0 \left(1 - 2v + \frac{D_{\text{гр}}^2}{d_0^2} \right)},$$

где k – коэффициент пропорциональности, характеризующий физические характеристики материала поверхностей трения фильеры и гранулы; σ_{τ} – предел текучести; R_r – радиус прессовочного ролика; α – угол естественного откоса; E_w – модуль упругости; v – коэффициент Пуассона; h_2 – толщина начального спрессованного слоя древесной муки; d_0 – диаметр цилиндрического канала; l_k – высота конического участка матрицы; γ – половина угла конической части; μ_{tp} – коэффициент трения спрессованной древесной муки о стенки фильеры; $l_{\text{ц}}$ – длина цилиндрического канала матрицы; $D_{\text{гр}}$ – диаметр гранулы на выходе из фильеры матрицы; $\frac{D_{\text{гр}}}{d_0}$ – относительное расширение гранулы после выхода из фильеры.

В ходе экспериментов были изучены физико-механические свойства древесного сырья, получены данные об относительной плотности, коэффициенте Пуассона и модуле Юнга древесных гранул, и влиянии на них породы древесины, гранулометрического состава древесного сырья, давления прессования [1].

Расчеты, выполненные по уравнению, представленному выше, показали, что давление проталкивания лежит в диапазоне от 18 до 25 МПа в зависимости от прессуемого сырья, что подтверждается экспериментальными исследованиями на стенде по производству древесного гранулированного топлива. Расчеты проводились для пресс-гранулятора с плоской матрицей с диаметром каналов 8 мм. Угол при вершине конической части (угол зенковки) составлял 40°. Диаметр гранулы на выходе из цилиндрической части определялся экспериментально.

Выводы.

Эксперименты показали, что процесс прессования древесных гранул является упруго-пластическим, при этом гранула в каналах матрицы находится в упругодеформированном состоянии.

Тензометрические исследования позволили определить величину давления прессования мелкодисперсного древесного сырья в каналах плоских матриц. Сравнение результатов расчета давления прессования и его экспериментального определения позволили сделать вывод о применимости разработанной математической модели, использующей физико-механические свойства прессуемого сырья и геометрические параметры гранулятора в качестве исходных данных.

Литература

1. Любов, В. К. Исследование технологического процесса производства древесного гранулированного топлива и эффективности его энергетического использования / [В. К. Любов и др.] // Теплофизика и энергетика: конференция с международным участием «VIII Всероссийский семинар вузов по теплофизике и энергетике»: Сборник докладов. – Екатеринбург, 2013. – С. 350–357.
2. EN 14961-1. Solid biofuels – Fuel specification and classes – Part 1: General requirements. European Standards (EN). Deutschen Pelletinstitut (DEPI) and Deutsche Biomasseforschungszentrum (DBFZ). – Berlin, 2010.
3. Flach, B. EU Biofuels Annual 2013 / [Bob Flach et al.] The Hague.