

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЛОТНОСТИ ВОЛОКНИСТОЙ ЦЕЛЛЮЛОЗНОЙ МАТРИЦЫ ДЛЯ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ПОЛИМЕРНОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ МАЛЫХ ДАВЛЕНИЯХ ПРЕССОВАНИЯ

Д.В. Чащилов^{1,2}, Л.А. Злочевский¹, А.Е. Струкова¹, И.Н. Павлов¹

¹ Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск

² Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт проблем химико-энергетических технологий» Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН), г. Бийск

Для теплоизоляционных полимерных композиционных материалов (ПКМ) с наполнителем из целлюлозных волокон одним из актуальных вопросов является изменение плотности волокнистой матрицы под действием внешних механических нагрузок. Предметом экспериментального исследования явились образцы разрыхленной небелёной древесной сульфитной целлюлозы из хвойной древесины в воздушно-сухом состоянии. Цель исследования – оценка изменения насыпной плотности разрыхленной целлюлозы от величины давления прессования при малых давлениях прессования. В экспериментальных исследованиях использован метод денсиметрии. Из целлюлозной папки в лабораторных условиях получены образцы разрыхленной целлюлозы путём механического разволокнения. Использован лабораторный колковый рыхлитель роторного действия. Разрыхление проведено при окружной скорости ротора 50 м/с. Давление прессования варьировалось от 0 до 7,5 кПа. Получены образцы разрыхленной целлюлозы с насыпной плотностью от 11,1 до 100,0 кг/м³. Эксперименты проведены с трёхкратным повторением. Показано, что при увеличении давления прессования насыпная плотность целлюлозы стабильно возрастает. В исследованном диапазоне давлений прессования уплотнение целлюлозы проходит в два этапа. На первом этапе при давлении прессования от 0 до 5 кПа насыпная плотность возрастает от 11,1 до 87,5 кг/м³. На втором этапе, при давлении прессования свыше 5 кПа, насыпная плотность возрастает с 87,5 до 100 кг/м³. На втором этапе замедление нарастания насыпной плотности при росте давления прессования может быть обусловлено деформацией элементарных волокон целлюлозы. Результаты экспериментального исследования могут быть применены для создания теплоизоляционных ПКМ на основе целлюлозных волокон.

Ключевые слова: элементарные волокна, древесная целлюлоза, целлюлозная папка, механическое разволокнение, колковый рыхлитель, насыпная плотность, денсиметрия, экспериментальное исследование.

ВВЕДЕНИЕ

Целлюлоза является одним из распространенных материалов-полуфабрикатов. Из целлюлозы – одного из природных полимеров получают разнообразные производные, в основном, эфиры. Целлюлоза используется в качестве основного компонента в составе теплоизоляционных материалов, например, эковаты. Также получают микрокристаллическую, микроволокнистую, нанокристаллическую и нановолокнистую целлюлозу. Эти формы целлюлозы сейчас активно используются в качестве наполнителей полимерных композиционных материалов [1]. Целлюлозные волокна в различных формах обладают высокими механическими свойствами – прочностью и модулем упругости [2].

Источником целлюлозы является растительное сырьё. Наиболее массовой является целлюлоза из древесного сырья. Также перспективным источником целлюлозного сырья являются одно- и многолетние растения и кустарники. Используют различные морфологические части растений – стебель, листья,

плодовые оболочки, корни [3]. Из древесины же, в основном, целлюлозу получают из стволов деревьев. В зависимости от источника исходного сырья волокна целлюлозы имеют различные размеры – длину и толщину, а также различное качество [4]. Длина волокон может составлять от долей миллиметра до 1,7 метра.

Целлюлоза – полимер, имеющий сложное надмолекулярное строение. Макромолекулы целлюлозы, на первом уровне, объединяются в агрегаты по несколько десятков макромолекул, образуя нановолокна. Основные связи макромолекул между собой – водородные. Далее, на следующем уровне, нановолокна объединяются в микроволокна, или микрофибриллы. Здесь, помимо водородных связей, задействованы и химические связи – с белками, пектинами и лигнинами, в некотором количестве входящими в состав микрофибрилл [5].

Микрофибриллы целлюлозы являются основным силовым компонентом стенок растительных клеток. В зависимости от фазы жизненного цикла клетки варьируется толщина и состав клеточной стенки [1].

Некоторые растительные клетки имеют особую форму – являются удлинёнными и имеют заострённые концы. Такие клетки называют элементарными волокнами. Внутри клеток имеется канал, так называемый просвет. На концах канал через мембраны канал выходит на поверхность клетки. Выходы каналов смежных клеток объединяются, создавая объединённую сеть. Канал выполняет транспортную функцию, обеспечивая движение соков растения или дерева с питательными веществами. При отмирании всего растения или его части происходит испарение влаги и канал может смыкаться, частично или полностью, утрачивая транспортную функцию [7].

Далее, элементарные волокна образуют технические волокна, также видимые невооружённым глазом. Длина технических волокон может составлять от нескольких миллиметров до сантиметров. В некоторых случаях, например, изо льна или конопли, длина волокон может достигать до нескольких дециметров. Из корней некоторых кустарников, например, известно получение технических волокон длиной до 20 м.

Технические волокна являются силовым элементом различных тканей растений и деревьев – стебля или ствола, листьев, эпидермиса или коры, цветков или плодов. В некоторых растениях образуется особый лубяной слой, состоящий из так называемых лубяных волокон. Эти волокна играют роль силового каркаса, например, всего стебля растения [8].

На уровне технических волокон роль соединительного компонента выполняют пектины и лигнин. Также лигнин, являясь гидрофобным, покрывает поверхность технических волокон. Так лигнин защищает целлюлозу от повреждений и разрушения от внешних факторов – действия ферментов бактерий или грибов, воздействия влаги.

Продуктами, которые получают из целлюлозы, как было отмечено выше, являются её простые и сложные эфиры, микрокристаллическая целлюлоза (МКЦ), нанокристаллическая целлюлоза (НКЦ), микро- и нановолокна целлюлозы [9, 10]. Целлюлозу в форме волокон и (или) кристаллов используют в качестве армирующих наполнителей или наномодификаторов в различных полимерных композиционных материалах. Ещё одной сферой является получение тепло- и звукоизоляционных материалов. Волокна целлюлозы образуют разветвлённую сеть с большой долей воздушных пустот и имеют низкий коэффициент теплопроводности.

Благодаря волокнам целлюлоза, как материал, в сухом разрыхленном состоянии обладает малой насыпной плотностью, высокой связностью и низким коэффициентом теплопроводности [11]. Она может быть использована в качестве основы для тепло-

звуко- и виброизоляционных или демпфирующих материалов. Как пример, известен такой теплоизоляционный материал, как эковата. Она представляет собой механическую смесь из распущенных волокон целлюлозы с антипиренами и антисептиками.

Определённую перспективу имеют и другие теплоизоляционные материалы на основе разрыхленной целлюлозы. Так, эковата является насыпным материалом и поэтому может лишь укладываться (или задуваться) лишь в замкнутые по контуру конструкции. Однако, например, минеральные теплоизоляционные материалы могут быть использованы как в насыпном виде – в форме гранул, так и в виде полужёстких матов. Область применения для таких матов значительно шире, чем для гранулированного материала. Исходя из такой аналогии, интерес представляют теплоизоляционные материалы из целлюлозного сырья в форме полужёстких или жёстких матов. Маты должны иметь более высокую собственную прочность и более высокую плотность. Для обеспечения связности в матах из минерального сырья используют связующее, в небольшом количестве.

Относительно разрыхленного волокнистого материала из целлюлозы можно отметить специфическую особенность, специфичную именно для целлюлозы [12]. Как было отмечено выше, для целлюлозных волокон характерно образование водородных связей. Это проявляется в самопроизвольном агрегировании, комковании волокон целлюлозы с образованием устойчивых агрегатов и потере сыпучести, частичной или полной [13, 14]. Комки и агрегаты целлюлозы сцепляются друг с другом, создавая многочисленные водородные связи между волокнами в смежных агрегатах, в местах плотного контакта между собой. Также стоит отметить сравнительно лёгкое уплотнение материала, в том числе и под собственным весом.

Целлюлоза для промышленной переработки используется в нескольких товарных формах. Это, в первую очередь, листовая целлюлоза, в форме, так называемой, папки [15, 16]. Также целлюлоза может быть разрыхленной, для удобства транспортировки и хранения её формируют в кипы в форме параллелепипеда.

В производстве целлюлоза может подвергаться различной обработке. Одним из проблемных вопросов является измерение количества целлюлозы. Особенно это сложно сделать для уже разрыхленной целлюлозы [17]. В то же время рабочие среды для обработки целлюлозы очень чувствительны к её концентрации.

Например, вязкость волокнистых суспензий значительно повышается при росте концентрации твёрдой фазы. Также изменяется характер движения такой среды. При превышении концентрацией

определённого предела суспензия начинает вести себя как однородное тело, проявляет свойства, характерные для твёрдого тела.

Одной из проблем является дозирование целлюлозного сырья в технологические аппараты или машины – реакторы, смесители и т.п. Одним из надёжных вариантов дозирования является способ дозировки целлюлозы по линейной плотности кип. Для этого используют ленточный питатель и колковый разрыхлитель [18]. При этом кипа предварительно взвешивается и для неё определяется линейная плотность (для партии из нескольких кип). Скорость движения ленты питателя или дозатора вручную (для питателя) или автоматически (для дозатора) настраивается таким образом, чтобы обеспечить требуемую, в среднем, производительность по массе подаваемой на разрыхление целлюлозы. Кипы устанавливаются на ленту питателя вплотную, друг за другом, обеспечивая непрерывность подачи исходного сырья на разрыхление. Также дозирование или питание может выполняться при помощи шнекового дозатора или питателя. При использовании таких способов дозирования или питания определённую роль играет насыпная плотность целлюлозы.

Также насыпная плотность будет важна для теплоизоляционного материала типа эковаты. Рабочим состоянием эковаты является разрыхленное состояние, её насыпная плотность при этом невелика. Для уменьшения объёма при транспортировке и хранении разрыхленный материал может быть несколько уплотнён, для повышения насыпной плотности. Перед использованием материал вновь разрыхляется, вручную или механизировано, в зависимости от объёма материала, и в разрыхленном состоянии укладывается в проектное положение внутри изолируемой конструкции.

При работе внутри конструкции теплоизоляционный материал может дополнительно уплотняться под действием собственного веса. При этом его насыпная плотность, в нижней части конструкции, увеличивается. В верхней части конструкции может образовываться пустота вследствие оседания теплоизоляционного материала.

Из представленных примеров можно отметить, что важно знать закономерность, в соответствии с которой происходит уплотнение целлюлозного материала. Причём интерес представляют сравнительно небольшие значения давления прессования. Это такие давления, которые могут развиваться в бункерах технологического оборудования, в типичных конструкциях со слоем насыпного утеплителя. Высота слоя в таких случаях может достигать от 3 до 4 м. При насыпной плотности в свободном состоянии порядка от 15 до 20 кг/м³ дополнительное давление от собственного веса может составлять величину, достигающую 8 кПа. Поэтому

речь может идти о давлениях в пределах первого десятка килопаскалей. Также стоит отметить, что для сохранения необходимых теплоизоляционных функций насыпная плотность должна быть как можно меньшей. Повышение насыпной плотности приводит к увеличению коэффициента теплопроводности и для обеспечения заданного сопротивления теплопередаче приходится выполнять конструкцию более объёмной (и массивной, и дорогостоящей).

Отдельным вопросом является определение непосредственно величины насыпной плотности волокнистого материала. Для этого необходимо использовать специальный денсиметр. Как правило, поперечный размер рабочей камеры должен на порядок превышать поперечный размер частиц испытуемого материала.

Одним из способов укладки эковаты в несущую конструкцию является её задув воздухом. При этом целлюлозный утеплитель разрыхляется и в сухом состоянии, вместе с нагнетаемым воздухом (практически, в режиме пневмотранспорта), подаётся в утепляемую конструкцию. Внутри конструкции волокнистый утеплитель оседает из потока, вследствие замедления скорости его движения, а воздух через щели и зазоры выходит наружу из утепляемой конструкции. При этом плотность укладываемого волокнистого утеплителя будет определяться перепадом давления, которое действует внутри утепляемой конструкции – то есть избыточным давлением воздуха в утепляемой конструкции.

Таким образом, для ряда практических применений разрыхленной целлюлозы необходимо знать зависимость насыпной плотности от давления, создаваемого при действии внешней механической нагрузки.

Целью данного исследования явилось определение зависимости насыпной плотности волокнистой целлюлозной матрицы от давления прессования. Задачами исследования явились:

- приготовление опытных образцов разрыхленной целлюлозы;
- создание и калибровка денсиметра для определения плотности уплотнённого волокнистого материала;
- проведение экспериментов по влиянию давления прессования на насыпную плотность волокнистой матрицы.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Материалы и методы

В качестве исходного материала использовали листовую целлюлозу древесную сульфитную полубелёную из хвойной древесины производства Сясьского ЦБК (г. Сясьстрой, Ленинградская область, Россия). Целлюлозу разрыхляли согласно [19]. Кратко – целлюлозу в форме листов прессованной папки

разрыхляли на молотковой мельнице с размером отверстий решета 5 мм. Окружная скорость ротора составляла 50 м/с, согласно рекомендаций [20]. Разрыхленное сырьё хранили до эксперимента в закрытом полиэтиленовом мешочке, не допуская уплотнения разрыхленного материала.

Сырьё использовали равновесной влажности. Температура в помещении составляла 20 °С, влажность воздуха составляла от 40 до 60%.

Влажность сырья и разрыхленного продукта определяли весовым способом путём высушивания при температуре 105°С. Испытывали два параллельных образца, за влажность принимали среднеарифметическое значение.

Для определения плотности использовали специальный денсиметр. Денсиметр представляет собой вертикальную цилиндрическую гильзу диаметром 105 мм, внутри которой с зазором располагается стакан с плоским дном. Внутри стакана находится груз определённой массы. Масса груза может варьироваться. Масса стакана с грузом соответствует созданию определённого давления на порцию материала под дном стакана. На внешней стенке стакана имеется линейка с делениями, позволяющая измерять высоту слоя под дном стакана. Линейка была предварительно проградуирована на жёстких вкладышах известной высоты. Это позволяло оперативно оценивать плотность навески уплотнённого материала.

Также предварительно выполняли проверку денсиметра на сыпучих материалах. В частности, использовали пшеничную крупу. Предварительно определяли насыпную плотность пшеничной крупы методом свободной засыпки. В денсиметр насыпали пшеничную крупу определённой массы через воронку, исключая падение частиц крупы с большой высоты. Получили, что насыпная плотность крупы, определённая по обоим способам, отличаются друг от друга не более чем на 1%.

Для проведения экспериментов по насыпной плотности разрыхленной целлюлозы в гильзу вручную помещали, без уплотнения, хлопья разрыхленной целлюлозы. Масса навески составляла 50 г в воздушно-сухом состоянии. Далее, в стакан помещали груз, соответствующий требуемому давлению на дне стакана, и устанавливали стакан в гильзу, поверх навески материала. При этом исключали ударное приложение нагрузки, толчки и вибрации. Определяли по линейке на стенке стакана высоту слоя уплотнённого материала. Далее, последовательно увеличивали массу груза в стакане и проводили также измерения высоты уплотнённой навески волокнистого материала в гильзе.

Проводили эксперименты, исходя из достижения плотности до 100 кг/м³. Давление прессования при этом в диапазоне уплотняющих давлений варьировалось и не превышало 7,5 кПа. Для контроля

проводили измерение влажности разрыхленного (перед экспериментом) и уплотнённого (после эксперимента) материалов. Пробы для определения влажности отбирали из нижней и верхней части навески уплотнённого материала. Все испытания проводили для трёх параллельно подготовленных образцов.

Результаты и их обсуждение

Влажность исходного сырья перед разрыхлением составляла $6 \pm 0,5\%$. Влажность разрыхленного материала перед уплотнением составляла $6,5 \pm 0,5\%$. Аналогично, влажность уплотнённого материала, и в нижней, и в верхней части уплотнённой навески составляла также $6,5 \pm 0,5\%$. Таким образом, было решено, что влажность материала в ходе эксперимента существенно не изменялась.

Площадь поперечного сечения навески материала, на которую действует уплотняющая нагрузка, принимали равной площади поперечного сечения гильзы. Считали, что уплотняющее давление равномерно распределяется по поперечному сечению навески. Уплотняющее усилие вычисляли как произведение массы стакана с грузом на ускорение свободного падения. Уплотняющее давление определяли как отношение уплотняющего усилия к площади дна стакана. Уплотняющее давление считали приложенным в верхнем сечении навески волокнистого материала.

Объём исходной и уплотнённой навески считали равным объёму цилиндра с диаметром, равным диаметру гильзы и высотой, равной высоте, отмеренной по линейке стакана. При уплотнении воздух из навески вытесняется стаканом и через воздушный зазор между стаканом и гильзой выходит в атмосферу. Плотность уплотнённого материала определяли как отношение массы навески к объёму уплотнённой навески.

На рисунке приведён типичный пример испытания одного из образцов – график изменения плотности от величины уплотняющего давления. Начальная плотность (для неуплотнённого, свободно помещённого в гильзу) материала составила $11,1 \pm 0,2 \text{ кг/м}^3$. Конечная плотность была достигнута на уровне $100 \pm 2 \text{ кг/м}^3$. Из анализа представленной зависимости можно отметить, что в диапазоне от 0 до 5 кПа плотность уплотнённого материала увеличивается практически линейно. При давлении прессования выше 5 кПа линия графика располагается более полого. Это может быть объяснено следующим. При давлениях прессования до 5 кПа происходит лишь более плотное примыкание волокон друг к другу. При давлении прессования свыше 5 кПа волокна, видимо, достаточно сближены и дальнейшая деформация образца связана уже с необходимостью деформирования самих целлюлозных волокон, на что и требуется дополнительная энергия. Изменение

насыпной плотности ρ , кг/м^3 , от давления прессования p , кПа, может быть выражено в форме линейных зависимостей, для давлений прессования p от 0 до 5 кПа и от 5 до 7,5 кПа, соответственно

$$\rho = 15,38p + 11,10;$$

$$\rho = 4,78p + 63,64.$$

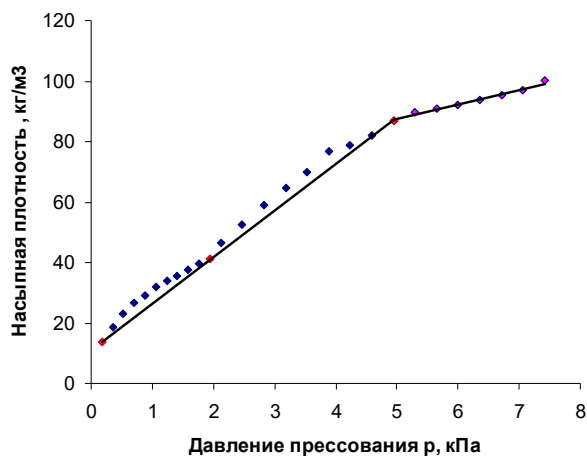


Рис. График зависимости насыпной плотности разрыхленной целлюлозы от давления прессования

Также можно заметить на графике волнообразное отклонение плотности от аппроксимирующей прямой с локальными экстремумами отклонений на уровне 1 кПа и 3,5 кПа. Возможно это связано с некоторым сопротивлением деформации образца за счёт силы бокового давления. Образец, испытывая нормальное давление от уплотняющей нагрузки, приложенное по оси цилиндрического образца, вследствие эффекта возникновения бокового давления создаёт боковое давление на стенку гильзы. При этом вследствие явления трения частиц волокнистого материала о поверхность стенки, возникает сила трения от бокового давления, распределённая по боковой поверхности образца. Эта сила противодействует уплотняющей нагрузке. При приложении очередной порции груза уплотняющая нагрузка увеличивается и превышает силу трения от бокового давления. То есть это явление наблюдается в экспериментах периодически. Исходя из этого обстоятельства было решено аппроксимирующую прямую проводить не «среди» точек, а по точкам, характеризующихся переходом от одного периода отклонений к другому. В исследованном диапазоне давлений прессования было отмечено два таких периода – в диапазонах от 0 до 2 кПа и от 2 до 4,5 кПа.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разрыхление целлюлозной папки из сульфитной полубелёной целлюлозы из хвойной древесины на роторной мельнице позволяет получить сильноразрыхленный волокнистый продукт.

Плотность разрыхленного продукта находится на уровне 11 кг/м^3 . Посредством приложения уплотняющей нагрузки плотность разрыхленной целлюлозы может быть повышена до 100 кг/м^3 , то есть в 9 раз, при этом давление уплотняющей нагрузки сравнительно невелико и не превышает 7,5 кПа.

Уплотнение разрыхленной целлюлозы при небольших давлениях прессования развивается в два этапа. На первом этапе, при давлении ниже 5 кПа, плотность практически линейно зависит от давления прессования, на каждый килопаскаль давления прессования плотность прирастает на $15,4 \text{ кг/м}^3$. На втором этапе, при давлении прессования свыше 5 кПа, эта зависимость выражена слабее. Аналогичный прирост составляет лишь $4,8 \text{ кг/м}^3$ на каждый килопаскаль давления прессования, то есть в 3,2 раза меньше.

Использованный денсиметр может быть использован для определения плотности разрыхленных волокнистых материалов при действии различного давления прессования.

Результаты настоящего исследования могут быть применены для создания тепло-, звуко-, и виброизолирующих, демпфирующих полимерных композиционных материалов на основе наполнителя из целлюлозных волокон.

Работа выполнена при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск).

Исследование выполнено в рамках госзадания на тему «Фундаментальные основы создания интегрированной технологии переработки легковозобновляемого непищевого растительного сырья в востребованные экономикой РФ продукты», № госрегистрации 121061500030-3.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Роговина, С.З. Композиционные материалы на основе синтетических полимеров, армированные волокнами природного происхождения [Текст] / С.З. Роговина, Э.В. Прут, А.А. Берлин // Высокомолекулярные соединения. Серия А. – 2019. – Т.61. - №4. С.291-315. DOI: 10.1134/S0965545X19040084
2. Chaudhary, V., Ahmad, F. A review on plant fiber reinforced thermoset polymers for structural and frictional composites, *Polymer Testing*. – 2020. V. 91, 106792. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106792
3. Вураско, А.В. Технология получения целлюлозы из недревесного растительного сырья [Текст] / А.В. Вураско, А.Р. Минакова, Б.Н. Дрикер, В.П. Спиваков, А.М. Косачёва // Химия растительного сырья. 2010. №2. С. 165-168.
4. Keijsers E.R.P., Yilmaz G., Van Dam J.E.G. The cellulose resource matrix. *Carbohydrate Polymers*, 2013. V. 93. №1, pp. 9-21. DOI: 10.1016/j.carbpol.2012.08.110
5. Charlet K., Jernot J.P., Eve S., Gomina M., Bréard J., Multi-scale morphological characterisation of flax: From the stem to the fibrils, *Carbohydrate Polymers*, 2010. V.82, № 1, pp. 54-61. DOI: 10.1016/j.carbpol.2010.04.022.

6. Болотова, К.С. Морфологические особенности фибриллярной структуры растительной и бактериальной целлюлозы [Текст] / К.С. Болотова, Д.Г. Чухчин, Л.В. Майер, А.А. Гурьянова // Известия вузов. Лесной журнал. – 2016. - №6. – С. 153-165. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.6.153
7. Lev-Yadun, S. Plant fibers: initiation, growth, model plants, and open questions [Текст] / S. Lev-Yadun // Физиология растений. – 2010. Т.57. - №3. С.323-333. DOI: 10.1134/S1021443710030015
8. Горшкова, Т.А. Формирование надмолекулярной структуры растительной клеточной стенки. Обзор [Текст] / Т.А. Горшкова, П.В. Микшина, О.П. Гурьянов, С.Б. Челнокова // Биохимия. 2010. т.75. №2. С. 196-213.
9. Нисковская, М.Ю. К вопросу о получении карбоксиметилловых эфиров целлюлозы суспензионным способом [Текст] / М.Ю. Нисковская, Н.В. Чернецкая, Б.А. Ульянов, О.А. Брагина, В.С. Богданов // Сборник научных трудов Ангарского государственного технического университета. 2006. №1. С.176-179.
10. Светлов С.А. Разработка оборудования производства натрий-карбоксиметилцеллюлозы [Текст] / С.А. Светлов / Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2019. Т.55. №6. С.3-6.
11. Логинова, С.В. Модель структуры измельченной целлюлозы [Текст] / С.В. Логинова, А.А. Латуга // Вестник Московского государственного университета леса - Лесной вестник. 2016. Т. 20. № 2. С. 132-136.
12. Подгорбунских, Е.М. Разупорядочение кристаллической структуры целлюлозы при механической активации [Текст] / Е.М. Подгорбунских, Н.В. Булина, А.Л. Бычков, О.И. Ломовский // Журнал структурной химии. 2018. Т. 59. № 1. С. 197-204. <https://doi.org/10.1134/S0022476618010328>
13. Huang L., Wu Q., Wang Q., Wolcott M. Mechanical activation and characterization of micronized cellulose particles from pulp fiber. *Industrial Crops and Products*. 2019. 141, art. no. 111750. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111750>
14. Lee H., Mani S. Mechanical pretreatment of cellulose pulp to produce cellulose nanofibrils using a dry grinding method. *Industrial Crops and Products*. 2017. 104. pp. 179-187. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.04.044>
15. Антонова, Н.М. Сравнительный анализ структуры листовой и модифицированной целлюлозы [Текст] / Н.М. Антонова, А.С. Пузанова, А.А. Небрат // Инженерный вестник Дона. 2020. № 3 (63). С. 39-46.
16. Юсупов, Ф.Т. Совершенствование технологий разволокнения, агрегирования и кондиционирования целлюлозных материалов [Текст] / Ф.Т. Юсупов, А.А. Саетшин, З.Т. Валишина, В.Г. Борбузанов, Е.Л. Матухин // Вестник технологического университета. 2017. Т. 20. – № 6. С. 76-78.
17. Борбузанов, В.Г. Автоматизированный комплекс подготовки целлюлозного сырья новой физической формы [Текст] / В.Г. Борбузанов, Е.Л. Матухин, Ф.Т. Юсупов, З.Т. Валишина, А.В. Косточко // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т.18. №1. С. 297-299.
18. Осин, А.И. Оборудование производств энергонасыщенных материалов [Текст] / А.И. Осин, А.С. Пивоваров, Н.Н. Волкова; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та – 2010. – 94с.
19. Чашилов, Д.В. Опыт исследования процесса разволокнения целлюлозных материалов и анализ работы оборудования: от лабораторного стенда – к промышленной установке [Текст] / Д.В. Чашилов // От химии к технологии шаг за шагом. 2021. Т.2. № 1. С. 30-41.
20. Чашилов Д.В. Исследование процесса разволокнения листовой целлюлозы [Текст] / Д.В. Чашилов // В сборнике: Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности. Материалы XIII Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных с международным участием. Бийск: изд-во АлтГТУ. 2020. С. 224-228.
- Чашилов Дмитрий Викторович – к.т.н., доцент кафедры машин и аппаратов химических и пищевых производств Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО АлтГТУ, р.т. (3854)435299, e-mail: dmitry.chashchilov@mail.ru; ведущий инженер лаборатории материаловедения минерального сырья ФГБУН ИПХЭТ СО РАН, тел.(3854)305906, e-mail: labmineral@mail.ru;*
- Злочевский Леонид Анатольевич – студент инженерного специального факультета Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО АлтГТУ, р.т. (3854)435299, e-mail: mahipp@bti.secna.ru.*
- Струкова Анастасия Евгеньевна – студентка инженерного специального факультета Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО АлтГТУ, р.т. (3854)435299, e-mail: mahipp@bti.secna.ru.*
- Павлов Игорь Николаевич – к.т.н., доцент кафедры машин и аппаратов химических и пищевых производств Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО АлтГТУ, р.т. (3854)435299, e-mail: pawlow-in@mail.ru.*

INVESTIGATION OF THE DENSITY OF A FIBROUS CELLULOSE MATRIX FOR A HEAT-INSULATING POLYMER COMPOSITE MATERIAL AT LOW PRESSING PRESSURES

D. V. Chashchilov^{1,2}, L. A. Zlochevsky¹, A. E. Strukova¹, I. N. Pavlov¹

¹ Biysk Technological Institute (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Altai State Technical University named after I. I. Polzunov", Biysk

² Federal State Budgetary Institution of Science "Institute of Problems of Chemical and Energy Technologies" of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPHET SB RAS), Biysk

Abstract – For heat-insulating polymer composite materials (PCM) with a cellulose fiber filler, one of the topical issues is the change in the density of the fiber matrix under the influence of external mechanical loads. The subject of the experimental study was samples of loosened unbleached wood sulfite cellulose from coniferous wood in an air-dry state. The aim of the study is to assess the change in the bulk density of loosened pulp from the value of the pressing pressure at low pressing pressures. In experimental studies, the method of densimetry was used. Samples of loosened cellulose were obtained from the pulp folder under laboratory conditions by mechanical de-fibration. A laboratory rotary chopper was used. Loosening was carried out at a circumferential rotor speed of 50 m / s. The pressing pressure varied from 0 to 7.5 kPa. Samples of loosened cellulose with a bulk density from 11.1 to 100.0 kg/m³ were obtained. The experiments were carried out in three-fold repetition. It is shown that with an increase in the pressing pressure, the bulk density of cellulose steadily increases. In the studied range of pressing pressures, the pulp compaction takes place in two stages. At the first stage, at a pressing pressure of 0 to 5 kPa, the bulk density increases from the initial value 11.1 to 87.5 kg / m³. At the second stage, when the pressing pressure exceeds 5 kPa, the bulk density increases from 87.5 to 100 kg / m³. At the second stage, the slowdown in the increase in bulk density with an increase in the pressing pressure can be caused by the deformation of the elementary cellulose fibers. The results of the experimental study can be used to create heat-insulating PCM based on cellulose fibers.

Index terms: elementary fibers, wood pulp, cellulose folder, mechanical unfolding, sharp ripper, bulk density, densimetry, experimental study.

REFERENCES

1. Rogovina, S. Z., Prut, E. V., Berlin A. A. Composite Materials Based on Synthetic Polymers Reinforced with Natural Fibers. Polymer Science. Series A - 2019. - Vol. 61. - no. 4. p. 417-438. DOI: 10.1134/S0965545X19040084
2. Chaudhary, V., Ahmad, F. A review on plant fiber reinforced thermoset polymers for structural and frictional composites, Polymer Testing. – 2020. V. 91, 106792. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106792
3. Vurasko, A.V. Technology for obtaining cellulose from non-wood vegetable raw materials [Text] / A.V. Vurasko, A. R. Minakova, B. N. Driker, V. P. Spivakov, A.M. Kosacheva // Chemistry of growing raw materials. 2010. No. 2. pp. 165-168.
4. Keijsers E. R. P., Yilmaz G., Van Dam J. E. G. The cellulose re-source matrix. Carbohydrate Polymers, 2013. V. 93. №1, pp. 9-21. DOI: 10.1016/j.carbpol.2012.08.110
5. Charlet K., Jernot J.P., Eve S., Gomina M., Bréard J., Multi-scale morphological characterisation of flax: From the stem to the fi-brils, Carbohydrate Polymers, 2010. V.82, № 1, pp. 54-61. DOI: 10.1016/j. carbpol. 2010. 04. 022.
6. Bolotova, K. S. Morphological features of the fibrillar structure of plant and bacterial cellulose[Text] / K. S. Bolotova, D. G. Chukhchin, L. V. Mayer, A. A. Guryanova // Izvestiya vuzov. Forest Journal. - 2016. - No. 6. - pp. 153-165. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2016.6.153
7. Lev-Yadun, S. Plant fibers: initiation, growth, model plants, and open questions [Text] / S. Lev-Yadun // Plant Physiology. - 2010. Vol. 57. - No. 3. pp. 323-333. DOI: 10.1134/S1021443710030015
8. Gorshkova, T. A. Formation of the supramolecular structure of the plant cell wall. Review [Text] / T. A. Gorshkova, P. V. Mikshina, O. P. Guryanov, S. B. Chelnokova // Biochemistry. 2010. vol. 75. no. 2. pp. 196-213.
9. Niskovskaya, M. Yu., Chernetskaya, N. V., Ulyanov, B. A., Bragina, O. A., and Bogdanov, V. S., On the issue of obtaining carboxymethyl ethers of cellulose by suspension method, Sbornik nauchnykh trudov Angarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2006. No. 1. pp. 176-179.
10. Svetlov S. A. Development of equipment for the production of sodium-carboxymethylcellulose [Text] / S. A. Svetlov / Chemical and oil and gas engineering. 2019. Vol. 55. no. 6. p. 3-6.
11. Loginova, S. V.. Model of the structure of crushed cellulose [Text] / S. V. Loginova, A. A. Latuga // Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa-Lesnoy vestnik. 2016. Vol. 20. no. 2. pp. 132-136.
12. Podgorbunskikh, E. M. Disordering of the crystalline structure of cellulose under mechanical activation [Text] / E. M. Podgorbunskikh, N. V. Bulina, A. L. Bychkov, O. I. Lomovsky // Journal of Structural Chemistry. 2018. Vol. 59. No. 1. pp. 197-204. <https://doi.org/10.1134/S0022476618010328>
13. Huang L., Wu Q., Wang Q., Wolcott M. Mechanical activation and characterization of micronized cellulose particles from pulp fiber. Industrial Crops and Products. 2019. 141, art. no. 111750. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111750>
14. Lee H., Mani S. Mechanical pretreatment of cellulose pulp to produce cellulose nanofibrils using a dry grinding method. Industrial Crops and Products. 2017. 104. pp. 179-187. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.04.044>
15. Antonova, N. M. Comparative analysis of the structure of sheet and modified cellulose [Text] / N. M. Antonova, A. S. Puzanova, A. A. Nebrat // Engineering Bulletin of the Don. 2020. No. 3 (63). pp. 39-46.

16. Yusupov, F. T. Sovershenstvovanie tekhnologii razvoloknenii, agreagirovaniya i conditionirovaniya cellulosic materials [Text] / F. T. Yusupov, A. A. Saetshin, Z. T. Valishina, V. G. Borbuzanov, E. L. Matukhin // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. 2017. Vol. 20 – no. 6. pp. 76-78.

17. Borbuzanov, V. G. Automated complex of preparation of cellulose raw materials of a new physical form [Text] / V. G. Borbuzanov, E. L. Matukhin, F. T. Yusupov, Z. T. Valishina, A.V. Kos-tochko // Bulletin of the Kazan Technological University. 2015. Vol. 18. no. 1. pp. 297-299.

18. Osin, A. I. Oborudovanie produktsii energonasyshennykh materialov [Text] / A. I. Osin, A. S. Pivovarov, N. N. Volkova; Alt. gos. tehn. un-t, BTI. - Biysk: Publishing house of the Alt. state Technical University. - 2010 – - 94c.

19. Chashchilov, D. V. Opyt issledovaniya protsessa razvolokneniya cellulosic materials i analiz rabota oborudovaniya: ot labornogo stenda-k promyshlennoy ustanovke [The experience of the research of the process of de – fiberization of cellulose materials and the analysis of equipment operation: from a laboratory stand to an industrial installation]. 2021. Vol. 2. No. 1. pp. 30-41.

20. Chashchilov D. V. Issledovanie protsessa razvolokneniya listovoi cellulose [Text] / D. V. Chashchilov // In the collection: Technologies and equipment of the chemical, biotechnological and food industry. Materials of the XIII All-Russian Scientific and Practical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists with International Participation. Biysk: Publishing house of AltSTU. 2020. pp. 224-228.

Chashchilov Dmitry Viktorovich-Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machines and Devices of Chemical and Food Production of the Biysk Technological Institute (branch) of the FSBEI VO AltSTU, R. T. (3854)435299, e-mail: dmitry.chashchilov@mail.ru; leading engineer of the Laboratory of Materials Science of Mineral Raw Materials, FGBUN IPHET SB RAS, tel. (3854)305906, e-mail: labmineral@mail.ru;

Leonid A. Zlochevsky-Student of the Engineering Special Faculty of the Biysk Technological Institute (branch) of the AltSTU, R. T. (3854)435299, e-mail: mahipp@bti.secna.ru.

Anastasia E. Strukova-student of the Special Engineering Faculty of the Biysk Technological Institute (branch) of the AltSTU, R. T. (3854)435299, e-mail: mahipp@bti.secna.ru.

Pavlov Igor Nikolaevich-Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Machines and Apparatuses of Chemical and Food Production, Biysk Technological Institute (branch), AltSTU, R. T. (3854)435299, e-mail: pawlow-in@mail.ru.