

УДК 631.867

UDC 631.867

05.00.00 Технические науки

Engineering

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ТВЕРДОЙ ФРАКЦИИ СБРОЖЕННОГО ПТИЧЬЕГО ПОМЕТА НА ПРОЦЕСС ВЛАЖНОГО ГРАНУЛИРОВАНИЯ**

**STUDY OF THE INFLUENCE OF STRUCTURAL-MECHANICAL PROPERTIES OF THE SOLID FRACTION OF DIGESTED POULTRY MANURE ON THE PROCESS OF WET GRANULATION**

Марченко Виктор Иванович  
к.т.н., доцент  
SPIN-код автора: 4713-4848  
e-mail: [marchenko59@mail.ru](mailto:marchenko59@mail.ru)

Marchenko Viktor Ivanovich  
Cand.Tech.Sci., assistant professor  
RSCI SPIN-code: 4713-4848  
e-mail: [marchenko59@mail.ru](mailto:marchenko59@mail.ru)

Сидельников Дмитрий Алексеевич  
ассистент  
SPIN-код автора: 6034-1779  
e-mail: [dimasud@yandex.ru](mailto:dimasud@yandex.ru)

Sidelnikov Dmitry Alekseevich  
assistant  
RSCI SPIN-code: 6034-1779  
e-mail: [dimasud@yandex.ru](mailto:dimasud@yandex.ru)

Панасенко Андрей Валентинович  
магистрант  
SPIN-код автора: 1522-0349  
e-mail: [pav-stav@yandex.ru](mailto:pav-stav@yandex.ru)  
*ФГБОУ ВО Ставропольский государственный аграрный университет, 355017, Россия, г. Ставрополь, пер. Зоотехнический, 12*

Panasenko Andrey Valentinovich  
undergraduate  
RSCI SPIN-code: 1522-0349  
e-mail: [pav-stav@yandex.ru](mailto:pav-stav@yandex.ru)  
*FSBEI HE Stavropol State Agrarian University, 12, Zootechnical lane, 355017, Stavropol, Russia*

Представлена схема поэтапного гранулирования твердой фракции сброженного птичьего помета (СПП ТФ) в шнековом грануляторе. Рассмотрен процесс прессования материала на каждом этапе гранулирования. Изучены структурно-механические свойства прессуемого материала. Выявлено, что ТФ СПП относится к псевдопластическим телам, которые при воздействии на них давления проявляют свойства аномальной среды. Предложена реологическая модель поведения прессуемого материала в шнековом грануляторе. Смоделирована механическая модель поведения ТФ СПП. Выявлено, что прессуемый материал при значениях давления создаваемого в шнековом грануляторе в зоне пластикации, ведет себя как аномальная жидкая среда. Она подчиняется законам течения ньютоновской жидкости

The article presents a staged scheme for granulation of solid fraction solids of fermented poultry manure (SF FPM) in an augered granulator. Granulation process of material has been reviewed in every stage of compression. The structural and mechanical properties of the pressable material were studied. It was revealed that SF FPM refers to pseudoplastic bodies, which when exposed to pressure exhibit anomalous properties. We present a rheological model of the motion of pressed materials in an augered granulator. We have modeled a mechanical model of actions at SF FPM. It was revealed that the compressible material at voltages generated in an augered granulator at the area of plasticizing was acting like an abnormal liquid. This liquid obeys the regularities of Newtonian liquids

Ключевые слова: АНАЭРОБНЫЙ ПРОЦЕСС СБРАЖИВАНИЯ, ПТИЧИЙ ПОМЕТ, ВЛАЖНОЕ ГРАНУЛИРОВАНИЕ, МАТРИЦА, РЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Keywords: ANAEROBIC DIGESTION, POULTRY MANURE, WET GRANULATION, MATRIX, RHEOLOGICAL MODEL

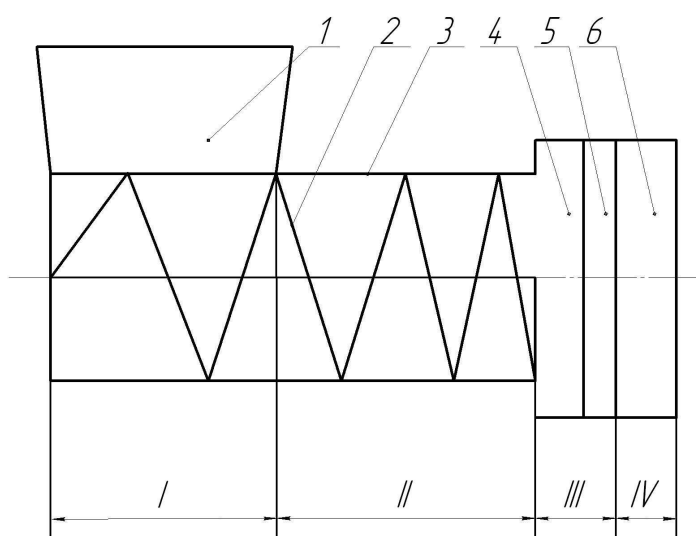
Doi: 10.21515/1990-4665-124-078

**Введение.** Исследования специалистов [1] показывают, что перспективным направлением развития переработки птичьего помета

является создание малоотходного или полностью безотходного ресурсосберегающего производства. Примером подобной технологии является ресурсосберегающая технология переработки птичьего помета, разработанная сотрудниками кафедры «Машины и технологии АПК» Ставропольского государственного аграрного университета [2]. В ее основе лежит биологическое разложение органического вещества птичьего помета в условиях отсутствия кислорода – анаэробное сбраживание.

Одним из не решенных вопросов в технологической линии является этап получения гранулированных органических удобрений. Данный этап решает очень важную задачу – дальнейшего использования питательного и энергетического потенциала твердой фракции сброженного птичьего помета (ТФ СПП), которая в настоящее время имеет спрос на рынке удобрений.

**Метод исследования.** Для реализации поставленной задачи нами предлагается конструкция шнекового гранулятора, представленная на рисунке 1.



1 – загрузочное окно; 2 – шнек; 3 – корпус; 4 – зона пластикации;  
5 – лопасть; 6 – матрица

Рисунок 1 – Схема шнекового гранулятора с распределением этапов прессования ТФ СПП

В шнековом грануляторе необходимо выделить четыре этапа обработки материала (рисунок 1):

I – этап загрузки материала; он служит для принятия поступающего материала, его захвата и продвижения в глубь корпуса;

II – этап сжатия, уплотнения материала;

III – этап изменения структурно-механических свойств материала (материал приобретает вязкопластическое состояние);

IV – этап формования материала (движение материала сквозь фильеры матрицы).

Принцип работы шнекового гранулятора можно описать так. Прессуемый материал, поступающий в шнековый гранулятор через загрузочное окно (I этап). На втором этапе (II) материал постепенно сдавливается (деформируется), происходит его уплотнение и частичное разрушение межчастичных связей. На этапе изменения структурно-механических свойств материала (III) под действием давления в материале полностью разрушаются межчастичные связи. При этом идет образование структур с преобладанием сил притяжения частиц дисперсной фазы, т.е. мельчайшие частички органики вступают с молекулами жидкости в фазовые контакты, и происходит их «сращивание» в результате диффузионных процессов под действием напряжения. На этом этапе материал приобретает свойства вязкопластического тела и начинает течь. Далее прессуемый материал поступает в фильеры матрицы, где он формуется в гранулы (IV этап).

Обоснование конструктивных параметров шнекового гранулятора и определение оптимальных технологических режимов процесса прессования ТФ СПП должны быть основаны на общих закономерностях его поведения, что предполагает обязательное знание структурно-механических свойств ТФ СПП, а также ее объемных деформационных свойств, характеризующих поведение материала при всестороннем сжатии.

**Исследование структурно-механических свойств ТФ СПП.** ТФ СПП является дисперсной системой. Все дисперсные системы состоят из

двух и более фаз. Согласно классификации В. Оствальда [3] исследуемый материал (ТФ СПП) вначале процесса гранулирования можно отнести к гетерогенной твердообразной дисперсной системе (ТДС). Данная система вначале процесса прессования состоит из трех фаз: твердой фазы – органических частичек, жидкой фазы – жидкости и газовой фазы – воздушных пузырьков. По мере продвижения прессуемого материала по гранулятору происходит механическое воздействие на него и воздушные пузырьки выходят, поэтому в дальнейшем будем рассматривать данную дисперсную систему уже состоящую из двух фаз.

В качестве дисперсной фазы в ней выступает твердая органика, которая составляет 55...60 %, а в качестве дисперсной среды – жидкость, составляющая 40...45% [4]. Обозначим такую дисперсную систему как Т/Ж. Поскольку в материале содержание твердой фракции значительно больше, чем жидкой, поэтому данная система по своему характеру является высококонцентрированной ТДС.

Важным свойством подобных систем является дисперсность частичек (их размер), входящих в ее состав. Анализ фракционного состава ТФ СПП показал, что это многокомпонентный состав, имеющий сложную структуру, которая определяется различной степенью дисперсности слагающих его частиц (рисунок 2).

Размеры частичек варьируются в широком диапазоне. Так, частички размером от 2 до 3 мм и свыше составляют 12 %. Они представлены волокнами растительного происхождения. Частички размером от 1 до 2 мм в ТФ СПП составляют 19 %. Они представлены частичками кормов и мелкими минеральными примесями – песком. Частички размером от 0,1 до 1 мм составляют самое большое количество – 36,8 %. В их состав входят более мелкие органические примеси.

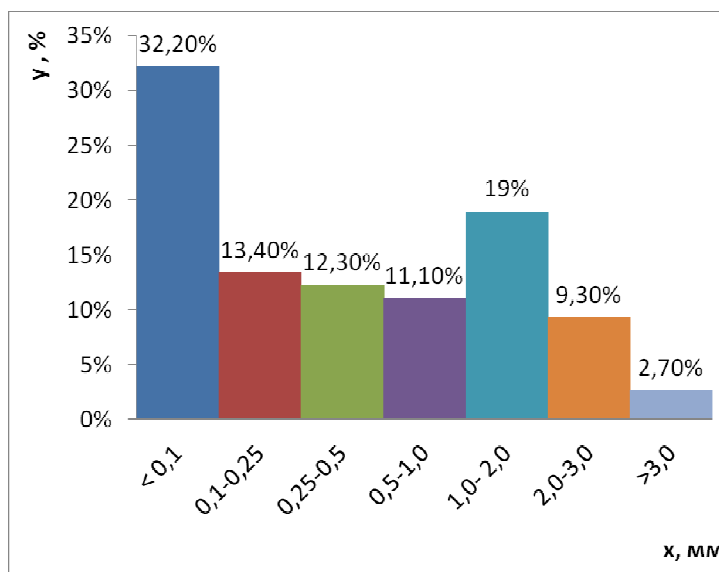


Рисунок 2 – Гистограмма процентного распределения крупности частиц в твердой фракции сброженного птичьего помета

Остальная часть ТФ СПП размером менее 0,1 мм составляет 32,2 % и представлена бактериями метаногенной ассоциации и мельчайшими органическими примесями. Следовательно, по степени дисперсности ТФ СПП обладает широким спектром, так как в нем присутствуют частички с размерами от микрогетерогенных величин с размером от  $10^{-7}$  до  $10^{-5}$  м (бактерии метаногенной ассоциации) до гетерогенных, размер которых превышает  $10^{-5}$  м и более (различные частички органического и минерального происхождения).

Анализ ТФ СПП по степени дисперсности твердой фракции показывает, что в материале содержится треть высокодисперсных частичек и при воздействии на прессуемый материал механических сил сжатия (напряжения) в нем происходит следующее. В объеме материала – дисперсной системы с жидкой дисперсионной средой происходит формирование структур с нарушением агрегативной устойчивости. При этом идет образование структур первого типа с преобладанием сил притяжения частиц дисперсной фазы, т.е. мельчайшие частички органики вступают с

молекулами жидкости в фазовые контакты, и происходит их «срачивание» в результате диффузионных процессов под действием напряжения.

При воздействии на материал напряжений основным структурно-механическим свойством его является вязкость (внутреннее трение или мера сопротивлению течения). Для изучения структурно-механических свойств таких дисперсных систем используют методы реологии, в основе которых лежат три идеальных закона [5].

Первый закон определяет идеально упругое твердое тело Гука и представляет собой спиральную пружину. Энергия, затраченная на деформацию, накапливается в теле и может быть возвращена при разгрузке. Такое поведение тела выражается реологической моделью [6]:

$$\tau = G\gamma, \quad (1)$$

где  $G$  – коэффициент пропорциональности или модуль сдвига, Па;

$\gamma$  – деформация материального тела.

Идеально вязкому телу Ньютона соответствует второй закон, механическую модель которого можно представить в виде гидравлического поршня, перемещающегося в цилиндре с жидкостью. Ее отличие состоит в том, что в ней напряжения пропорциональны скорости деформации и уравнение состояния такого ньютоновского тела можно записать в виде:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}. \quad (2)$$

При возникновении в дисперсном теле структурных преобразований их течение становится неньютоновским. Этому соответствует третий реологический закон [6]. Эффективная вязкость таких дисперсных систем при постоянной температуре зависит от скорости деформации и напряжения сдвига. К ним относятся неньютоновские аномально вязкие тела. В качестве математической модели для описания таких тел используется реологическое уравнение вязко-пластичного тела Оствальда–Вейля или Оствальда–де Валя:

$$\tau = k\dot{\gamma}^n, \quad (3)$$

где  $k$  – коэффициент консистенции, зависящий от природы материала;

$n$  – индекс течения материала.

Многочисленные теоретические и экспериментальные исследования различных авторов показали, что реальные тела обладают всеми тремя свойствами. Поэтому для выявления характеристики ТФ СПП в процессе влажного гранулирования необходимо провести исследования ее свойств.

**Результаты исследования.** В грануляторе ТФ СПП находится в условиях нарастающего сжатия, а при подходе к матрице – в условиях всестороннего сжатия. Совокупность упругих, вязких и пластических характеристик ТФ СПП поможет определить принятую реологическую модель. С этой целью рассмотрим зависимость скорости сдвига прессуемого материала от напряжения сдвига. Кривая имеет сложный характер (рисунок 3). В ней отражается влияние реологических свойств материала в процессе его деформации.

Как видно из зависимости, при постоянном напряжении сдвига  $\tau$  больше, чем значение предельного напряжения сдвига  $\tau_{kl}$  имеет место мгновенная упругая деформация ТФ СПП (точки 0-1). Внешнее воздействие на материал не нарушает прочности его структуры. В данный промежуток времени действия напряжения сдвига на прессуемый материал подчиняется закону Гука. Это можно охарактеризовать как действие спиральной пружины. Напряжение сдвига растет от 0 до 3 кПа, скорость сдвига равна 0, эффективная вязкость имеет максимальное значение, равное 10,0 Па·с. Участок 1-2 соответствует I этапу прессования (рисунок 1).

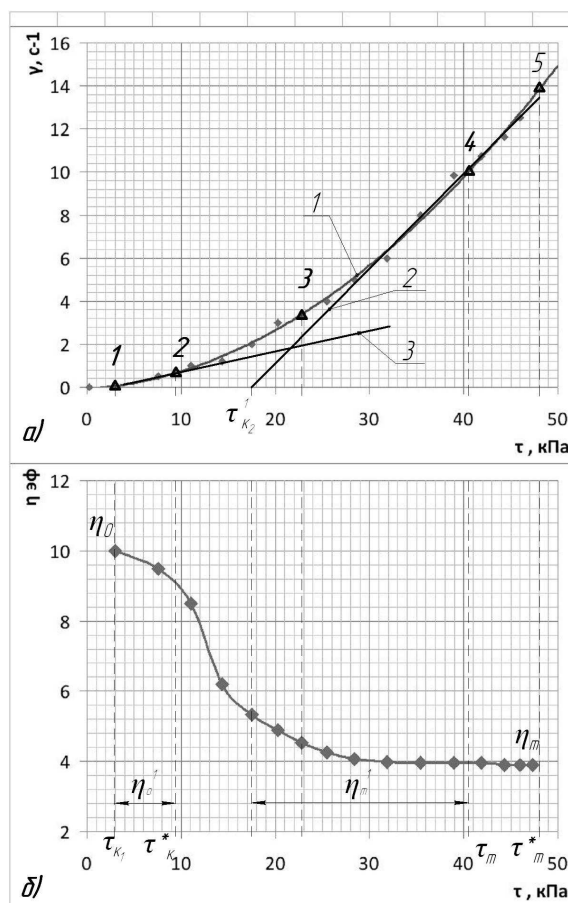


Рисунок 3 – Зависимость скорости сдвига  $\gamma$  и логарифма эффективной вязкости  $\eta_{эф}$  от напряжения сдвига  $\tau$  ТФ СПП

Затем наступает предельное значение напряжения сдвига, начинается упругая (эластическая) деформация ТФ СПП (точки 1-3). Этот этап можно разделить на два участка. Первый – точки 1-2 характеризуется постепенным разрушением структуры в материале, нарушением межфазных связей в нем. Этап характеризуется началом течения материала с проявлением наибольшей эффективной и пластической вязкостью. Смоделировать поведение материала можно элементом Кельвина-Фогта. Значение скорости сдвига при увеличении напряжения сдвига от 3 до 9,3 кПа постепенно увеличивается до  $0,7 \text{ с}^{-1}$ . Эффективная вязкость ТФ СПП в пределах участка уменьшается от максимального значения 10,0 до 9,1 кПа·с. На участке 2-3 структура материала начинает лавинно разрушаться. При этом напряжение



сдвига растет до значения 22,8 кПа, скорость сдвига составляет  $3,5 \text{ с}^{-1}$ , а значение эффективной вязкости снижается практически в два раза и достигает значения 4,7 кПа·с. Материал на этом участке начинает обладать другими структурно-механическими свойствами – он начинает течь. II этап соответствует процессу прессования (рисунок 1).

Далее рассмотрим участок 3-4. На нем в материале начинается лавинное разрушение его структуры – происходит течение материала с наименьшей пластической вязкостью. Материал приобретает полностью свойства псевдопластического тела. При резко увеличивающемся напряжении сдвига до 40,5 кПа, также увеличивается скорость сдвига в 2,9 раз и достигает значения  $10,0 \text{ с}^{-1}$ . Эффективная вязкость снижается незначительно до минимума – 4 кПа·с. Этот участок соответствует III этапу прессования ТФ СПП в шнековом грануляторе (рисунок 1), который проходит в предматричной зоне, где располагается зона пластикации и нагнетающая лопасть.

Участок 4-5 характеризуется ньютоновским течением материала с постоянной вязкостью. На нем несколько увеличивается напряжение сдвига до 48 кПа, и скорость сдвига достигает значения  $13,8 \text{ с}^{-1}$ , при этом значение эффективной вязкости материала остается практически на том же уровне и равна 3,8 кПа·с. Закономерности движения материала в зоне пластикации шнекового гранулятора и далее в фильерах матрицы можно рассматривать как движение ньютоновской жидкости в стационарном режиме. Этот участок соответствует IV этапу прессования материала – формованию из материала гранул (рисунок 1).

Выявленная закономерность кинетики деформации ТФ СПП состоит из последовательно соединенных элементов механических моделей: элемента Гука с модулем упругости  $G$ , Ньютона с вязкостью  $\eta_{эф}$  и пластического элемента Сен-Венан (рисунок 4).

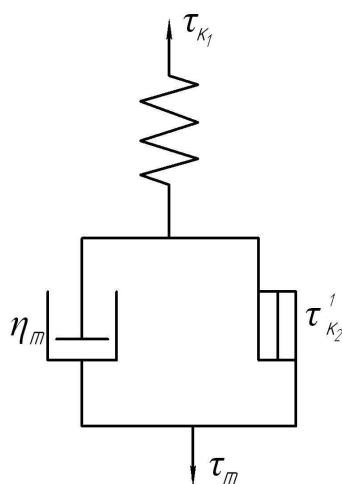


Рисунок 4 – Объединенная механическая модель течения ТФ СПП

Приложение напряжения  $\tau$  к объединенной модели, которое превышает предельное напряжение сдвига  $\tau_{K1}$ , приведет к деформированию упругого элемента на некоторую величину деформации и модуль сдвига вычисляется по формуле:

$$G_l = \frac{\tau}{\dot{\gamma}_0}, \quad (4)$$

где  $\tau$  – приложенное напряжение сдвига, кПа;

$\dot{\gamma}_0$  – относительная величина мгновенной упругой деформации.

В это же время в шнековом грануляторе начинается медленное течение в вязком элементе  $\eta'_0$ . Этот участок медленного течения ТФ СПП представлен кривой 1-2 на рисунке 3. Вязкость упругого последствия определяли по формуле:

$$\eta'_0 = \frac{\tau}{\Delta\dot{\gamma}_l}, \quad (5)$$

где  $\Delta\dot{\gamma}_l$  – изменение скорости эластической деформации на участке 1-2, характеризуемое изменением тангенса угла  $\alpha$  наклона касательной к этому участку,  $\text{с}^{-1}$ .

К моменту времени, соответствующему точке 3, развитие упругой деформации полностью заканчивается и далее наблюдается вязкое

течение, выражающееся аппроксимированной прямой 2. Скорость течения на этом участке пропорциональна напряжению ( $\tau < \tau_{k2}^l$ ) и обратно пропорциональна наибольшей пластической вязкости по Шведову, которую определяли по формуле:

$$\eta_m = \frac{\tau - \tau_{k2}^l}{\dot{\gamma}_m}, \quad (6)$$

где  $\dot{\gamma}_m$  – скорость нарастания деформации течения,  $\text{с}^{-1}$ .

Составленная механическая модель, представленная на рисунке 4, является моделью Гершеля–Балкли и практически совпадает с механической моделью Бингама, та как отражает физическую суть процесса, происходящего в шнековом грануляторе.

Объединенная модель, представленная на рисунке 4 описывается реологическим уравнением при  $\tau < \tau_{k2}^l$

$$\dot{\gamma} = \frac{\tau}{G} + \frac{\tau - \tau_{k2}^l}{\eta_m}. \quad (7)$$

По характеру кривой течения  $\dot{\gamma} = f(\tau)$ , изображенной на рисунке 4, ТФ СПП может быть отнесена к твердообразным вязкопластическим дисперсным системам, а ее формирование может рассматриваться как пластическое деформирование и течение псевдопластического материала.

Подтверждением вышеописанному служат построенные нами три реологические кривые течения ТФ СПП (рисунки 5-7). Их сравнивали с помощью степенного уравнения Гершеля – Балкли

$$\tau - \tau_0 = B_1 \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (8)$$

где  $\tau_0$  – предельное напряжение сдвига, кПа;

$B_1$  – коэффициент пропорциональности вязкости при градиенте скорости равном единице, Па·с;

$n$  – индекс течения материала.

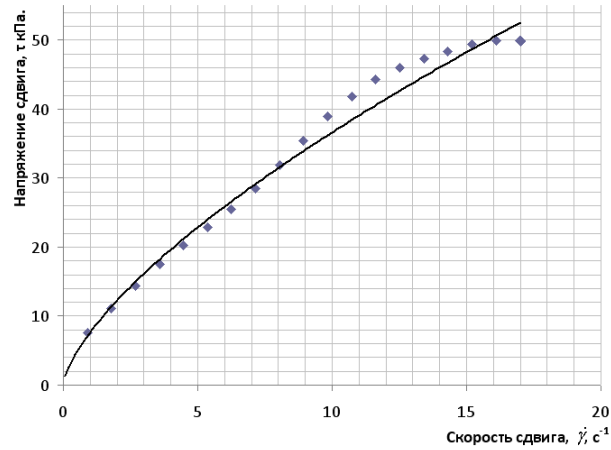


Рисунок 5 – Зависимость напряжения сдвига  $\tau$  от скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  ТФ СПП в равномерных шкалах

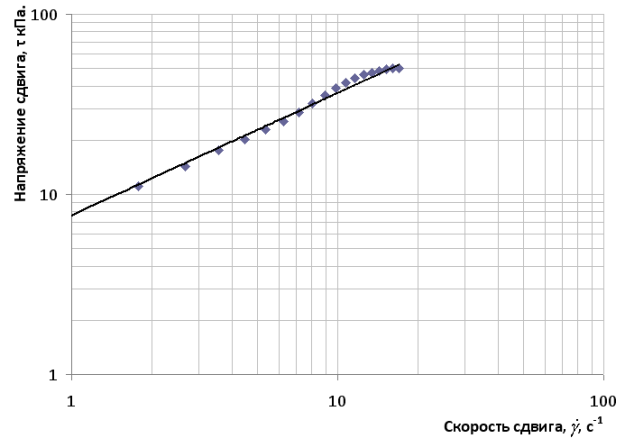


Рисунок 6 – Зависимость напряжения сдвига  $\tau$  от скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  ТФ СПП в логарифмических шкалах

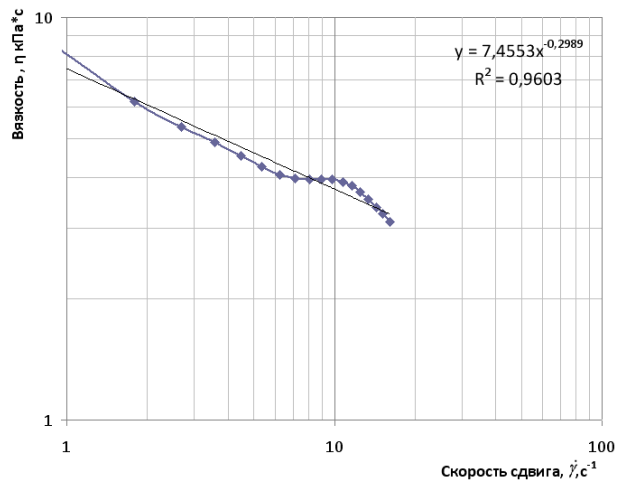


Рисунок 7 – Зависимость эффективной вязкости  $\eta_{эф}$  от скорости сдвига  $\dot{\gamma}$  ТФ СПП в логарифмических шкалах

При  $\tau_0=0$  уравнение 8 приобретает вид степенного уравнения Оствальда-де Виля:

$$\tau = B_1^* \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (9)$$

при  $n=1$  – Шведова-Бингама, а  $B_1^*$  представляет собой коэффициент пропорциональности при градиенте скорости  $\dot{\gamma}_1 = 1 \text{ с}^{-1}$ .

Для придания коэффициенту пропорциональности определенного физического смысла – эффективной вязкости  $\eta_{эф}$  запишем:

$$\tau - \tau_0 = B_o^* \dot{\gamma}^n \dot{\gamma}_1^{1-n} = B_o^* \left( \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_1} \right)^n \cdot \dot{\gamma}_1 = B_o^* \left( \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_1} \right)^{n-1} \cdot \left( \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_1} \right) \dot{\gamma}_1. \quad (10)$$

Обозначив через  $m=1-n$  скорость разрушения структуры, а через  $\dot{\gamma}/\dot{\gamma}_1 = \gamma_*$  безразмерный градиент скорости, получим

$$\tau - \tau_0 = B_o^* \dot{\gamma}_*^{-m} \dot{\gamma} = \eta_{эф} \dot{\gamma}, \quad (11)$$

откуда

$$\eta_{эф} = B_o^* \dot{\gamma}_*^{-m}, \quad (12)$$

где  $\eta_{эф}$  – эффективная вязкость, Па·с.

Согласно классификации [6] поведение кривых (рисунки 5-7) соответствуют псевдопластическому твердообразному телу. Кроме того, из уравнения регрессии кривой на рисунке 7, где значение  $-m = -0,2989$ , после использования формулы  $m=1-n$  получаем  $n$  равное 0,7, что меньше, чем единица. Такое значение индекса течения прессуемого материала характеризует его как псевдопластическую твердообразную систему.

**Выводы.** Исследование реологических свойств прессуемого материала – ТФ СПП показали, материал является твердообразным псевдопластическим телом и обладает всеми его свойствами. Аномальное поведение вязкости материала обусловлено структурированием системы и изменением структуры в процессе его деформации. При достижении напряжения сдвига

более 20 кПа материал начинает течь. Вязкость становится независимой от скорости сдвига и принимает минимальное значение равное 4 кПа·с. Таким образом, в этом диапазоне ТФ СПП ведет себя как ньютоновская жидкость. Экстраполяция участка 4-5 до пересечения с осью абсцисс позволила определить предел текучести ТФ СПП по Бингаму, который равен 17,5 кПа, и характеризует число и прочность межчастичных контактов и прочность его структуры. Широкая область текучести (разность  $\eta_{\max} - \eta_{\min}$ ) предельных вязкостей ТФ СПП обуславливает важное технологическое его свойство – формуемость (гранулируемость).

#### Список литературы

1. Интенсификация анаэробного сбраживания птичьего помета / Марченко В.И. // Техника в сельском хозяйстве. 2011. № 6. С. 27-29.
2. Ways to intensify the process of anaerobic digestion of poultry manure in a bioreactor / Marchenko V.I., Sidelnikov D.A., Gritsai D.I., Gerasimov E.V., Shvetsov I.I. / Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. Т. 7. № 3. С. 1913-1918.
3. Мачихин Ю.А. Инженерная реология пищевых материалов / Ю.А. Мачихин, С.А. Мачихин. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. – 216 с.
4. Гранулятор для прессования птичьего помета / Сидельников Д.А., Герасимов Е.В., Белый Ю.В. // Сельский механизатор. 2015. № 1. С. 28-29.
5. Косой В.Д. Инженерная реология биотехнологических сред / В.Д. Косой, Я.И. Виноградов, А.Д. Малышев. – СПб.: ГИОРД, 2005. – 648 с.
6. Падохин В.А. Физико-механические свойства сырья и пищевых продуктов: Учеб. пособие / В.А. Падохин, Н.Р. Кокина // Иван. гос. хим.-технол. ун-т., Институт химии растворов РАН. – Иваново, 2007. – 128 с.

#### References

1. Intensifikacija anajerobnogo sbrzhivaniya ptich'ego pometa / Marchenko V.I. // Tehnika v sel'skom hozjajstve. 2011. № 6. S. 27-29.
2. Ways to intensify the process of anaerobic digestion of poultry manure in a bioreactor / Marchenko V.I., Sidelnikov D.A., Gritsai D.I., Gerasimov E.V., Shvetsov I.I. / Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. Т. 7. № 3. S. 1913-1918.
3. Machihin Ju.A. Inzhenernaja reologija pishhevyh materialov / Ju.A. Machihin, S.A. Machihin. - M.: Legkaja i pishhevaja promyshlennost', 1981. – 216 s.
4. Granuljator dlja pressovanija ptich'ego pometa / Sidel'nikov D.A., Gerasimov E.V., Belyj Ju.V. // Sel'skij mehanizator. 2015. № 1. S. 28-29.
5. Kosoj V.D. Inzhenernaja reologija biotehnologicheskikh sred / V.D. Kosoj, Ja.I. Vinogradov, A.D. Malyshev. – SPb.: GIORD, 2005. – 648 s.
6. Padohin V.A. Fiziko-mehanicheskie svojstva syr'ja i pishhevyh produktov: Ucheb. posobie / V.A. Padohin, N.R. Kokina // Ivan. gos. him.-tehnol. un-t., Institut himii rastvorov RAN. – Ivanovo, 2007. – 128 s.