

Введение Основной целью большинства исследований реологических и физических свойств навоза являлось проектирование насосов и разбрасывателей навоза. Наиболее детальные экспериментальные исследования в этой области были выполнены для навоза коров молочных и мясных пород (Kumar et al. 1972, Chen 1986, Achkari-Begdouri and Goodrich 1992, El-Mashad et al. 2005). Свиной навоз также изучался, однако в литературе очень мало данных, описывающих его реологические свойства в зависимости от диапазона температур и концентраций. Kumar и соавторы (1972) [1] использовали вискозиметр с постоянным «крутящим моментом» (измеряемым моментом силы сопротивления) для изучения влияния температуры, содержания воды и опилок на вязкость навоза коров молочной породы. Hashimoto и Chen (1976) [2] изучали реологические свойства свежей и аэрированной навозной суспензии птиц, свиней и коров молочной породы. Barker и Driggers (1981) [3] провели эксперименты по изучению вязкости жидкого свиного навоза (концентрации общего сухого вещества менее 3%) с целью разработки альтернативных систем его смыва. Chen (1986) исследовал реологию навозных суспензий коров мясной породы [4]. Achkari-Begdouri и Goodrich (1992) изучали вязкость навоза марокканских коров молочной породы. Были изучены растворы с концентрацией от 2,5% до 12% при температурах от 20°C до 60°C [5]. Benali и Kudra (2002) провели лабораторные исследования, чтобы определить параметры сушки необработанного свиного навоза. С помощью ротационного вискозиметра (скорости сдвига неизвестны) они определили, что жидкость является ньютоновской и вязкость при этом относительно постоянна при концентрации общего сухого вещества от 4,5% до 16% [6]. Landry, Laguë и Roberge (2004) [7] изучали объемную плотность, распределение частиц по размерам и реологические свойства жидкого и полутвердого свиного навоза с общей концентрацией сухого вещества свыше 10%. Massé, Beaudette и Muir (2004) сравнивали распределение частиц по размерам для сырого навоза и для сброженной массы в анаэробном реакторе периодического действия. Они установили, что в результате анаэробного брожения концентрация сухого вещества снизилась [8]. El-Mashad, Loon, Zeema (2005) изучали влияние температуры и скорости сдвига на коэффициент динамической вязкости навоза коров молочных пород [9]. С использованием ротационного вискозиметра Keener, Hoorman и Klingman (2006) провели исследования вязкости свиного навоза, в котором содержание сухого вещества составляет от 1,4% до 22,4%, были протестированы две скорости (30 и 60 оборотов в минуту) [10]. Langner, Bibeau (2009) исследовали значение коэффициента динамической вязкости свиного навоза с содержанием сухого вещества от 0,67% до 13,1% при температурах 15°C, 25°C, 40°C, и 60°C и скорости сдвига 0,0066 с<sup>-1</sup> до 44 с<sup>-1</sup>. При содержании сухого вещества более 6,5% навоз проявлял неньютоновские свойства [11].

Оценка реологических свойств свиного навоза (Голушко А.С., 1969; Личман Г.И.,

1975; Капустин В.П., 1976; Ледин Н.П., Письменный В.К., Полищук В.И., 1979; Письменов В.Н., 1988; Кушнарев А.С., 1989) проводилась давно [12-16]. В настоящее время действуют Методические рекомендации по проектированию систем удаления, обработки, обеззараживания, хранения и утилизации навоза и помета, разработанные еще в 1981 году. В них указан коэффициент динамической вязкости свиного и коровьего навоза в зависимости от содержания сухого вещества, а также значение предельного напряжения сдвига [17]. Экспериментальные исследования (Тропин А.Н., 2011) показали, что жидкий свиной навоз влажностью 88 – 91% может быть классифицирован как неньютоновская система со сложными нестационарными реологическими свойствами [18, 19, 20]. Следует отметить, что полученные значения коэффициента динамической вязкости, а также значение предельного напряжения сдвига в несколько раз выше, чем в Методических рекомендациях. Таким образом, необходимы дополнительные исследования вязкости свиного навоза.

Ротационный вискозиметр RM 100 Для определения коэффициента динамической вязкости субстрата использовался ротационный вискозиметр RM 100, предназначенный для исследования реологического поведения жидкостей и измерения динамической вязкости (вязкость по Брукфильду). Прибор зарегистрирован в реестре СИ № 41593-09, разработан для решения всего спектра задач, связанных с контролем реологического поведения жидкостей, построения реологических кривых и проведения их анализа (фирма LAMU Rheology, Франция). Универсальный вариант вискозиметра, работающий в соответствии с требованиями стандартов ASTM/ISO 2555 (ГОСТ 25271), DIN/ISO 3219, ГОСТ 29226, ГОСТ 52249 (GMP). Оснащается встроенным термодатчиком, таймером, данные выводятся на удобный ЖК-дисплей. На вискозиметре RM 100 возможна установка любой измерительной системы. Вискозиметр предназначен для производственных и исследовательских лабораторий. Измерение вязкости осуществляется посредством пересчета крутящего момента, необходимого для вращения шпинделя прибора с постоянной скоростью при погружении его в исследуемый субстрат на определенную глубину при определенной температуре окружающей среды.

Описание проведения эксперимента При проведении температурных испытаний (получение температурной зависимости вязкости) фиксировалось значение коэффициента динамической вязкости в зависимости от скорости сдвига и температуры. При проведении измерений использовалась измерительная система DIN/ISO 3219, состоящая из цилиндрического шпинделя МК DIN-1 и измерительного цилиндра DIN-1 с жидкостным термостатированием. Шпиндели и цилиндры могут использоваться в различных комбинациях.

Процедура измерения включала следующие этапы: 1. приготовление раствора свиного навоза заданной концентрации; 2. в измерительный цилиндр загружается субстрат, подогретый до необходимой температуры; 3. термостатирование пробы в измерительной системе в течение 10 минут с

одновременным вращением ротора с небольшой скоростью; 4. снятие кривой течения и вязкости при увеличении скорости сдвига; 5. обработка экспериментальных данных. 5.1. определение вида течения жидкости; 5.2. аппроксимация кривой течения; 5.3. построение графиков зависимости, . Таким образом, получены зависимости коэффициентов динамической вязкости субстрата от скорости сдвига и температуры для растворов субстрата с различной концентрацией сухого вещества. Обработка экспериментальных данных Проведено экспериментальное исследование динамической вязкости субстрата, применяемого в производстве биогаза, а именно, свиного навоза с содержанием сухого вещества от 6% до 14% в диапазоне температур от 100С до 600С и скорости сдвига 2,01 с-1 до 304 с-1. Свиной навоз был собран в зимний период с пола животноводческого комплекса. Хранение субстрата осуществлялось в холодильнике. Для приготовления раствора заданной концентрации использовалась новая порция из холодильника. На рис. 1 представлена зависимость коэффициента динамической вязкости субстрата от скорости сдвига при различной концентрации сухого вещества (СВ) и температуре 400С, что соответствует мезофильному режиму метанового сбраживания. Рис. 1 - Зависимость коэффициента динамической вязкости субстрата от скорости сдвига Динамическая вязкость зависит от скорости сдвига, температуры и концентрации. Будем считать, что эту зависимость можно представить в виде , (1) где  $k_0$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $b_1$  - реологические константы,  $B$  - энергия активации вязкого течения,  $R$  - универсальная газовая постоянная ( $R=8314$  Дж/моль·К). Пусть , тогда получим: , (2) где  $T_0$  - температура ( $T_0=293$  К),  $k$  - параметр, определяющий консистенцию субстрата при температуре  $T_0$ . Прологарифмируем выражение (2) (3) и введем обозначения: ,, , . Тогда (3) можно записать как . (4) В результате эксперимента были получены значения вязкости при различных значениях концентрации , температуры и скорости сдвига , где , . По этим данным определяем соответствующие величины , , , . Введем функцию квадратов разностей в точках эксперимента (5) Найдем неизвестные из условия минимума функции , которое является условием равенства нулю частных производных. В результате получим систему линейных уравнений, которую решаем методом Крамера. На основании экспериментальных данных получена следующая зависимость: . (6) Отклонение от экспериментальных данных было рассчитано по формуле: (7) Оно составило 0,023. Заключение Проведенные исследования показали, что жидкий свиной навоз влажностью от 94% и выше может быть классифицирован как неньютоновская жидкость. Получена зависимость коэффициента динамической вязкости от скорости сдвига, температуры и концентрации сухого вещества в субстрате. Работа выполнена в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы» (Соглашение № 8196).