

Ю. В. Караева, И. А. Трахунова, А. З. Миндубаев,
Д. Е. Белостоцкий, С. Т. Минзанова, С. А. Пушкин, С. В. Буренков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ДИНАМИЧЕСКОЙ ВЯЗКОСТИ СВИНОГО НАВОЗА

Ключевые слова: динамическая вязкость, концентрация сухого вещества, свиной навоз.

Проведено экспериментальное исследование коэффициента динамической вязкости свиного навоза с содержанием сухого вещества от 6% до 14% в диапазоне температур от 10°C до 60°C и скорости сдвига 2,01 с⁻¹ до 304 с⁻¹.

Keywords: dynamic viscosity, total solids concentration, swine manure.

The experimental investigation of dynamic viscosity coefficient for swine manure was carried with following conditions: a total solids concentration from 6% to 14%, the temperature range from 10°C to 60°C and a shear rate from 2,01 с⁻¹ to 304 с⁻¹.

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 азрированной 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]. Venali 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, Hoogman 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, Vibeau (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⁻¹ до 44 с⁻¹. 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 ротацион-

ный 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 LAMY 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 $\mu = f(T)$, $\mu = f(dw/d\tau)$.

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 10°C до 60°C 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 40°C, что соответствует мезофильному режиму метанового сбраживания.

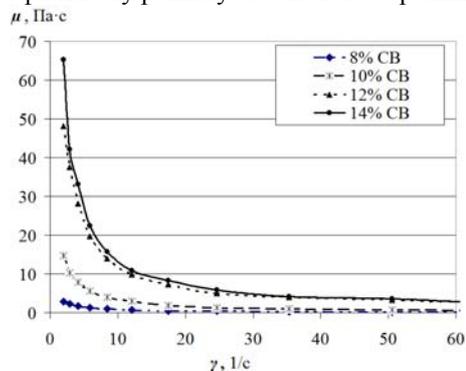


Рис. 1 - Зависимость коэффициента динамической вязкости субстрата от скорости сдвига

Динамическая вязкость зависит от скорости сдвига, температуры и концентрации. Будем считать, что эту зависимость можно представить в виде

$$\mu = k_0 \alpha^{a_2} \gamma^{a_1 \alpha + b_1} \exp(B/(RT)), \quad (1)$$

где k_0 , α_1 , α_2 , b_1 - реологические константы, B - энергия активации вязкого течения, R - универсальная газовая постоянная ($R=8314$ Дж/моль·К).

Пусть $k = k_0 \exp(B/RT_0)$, тогда получим:

$$\mu = k \alpha^{a_2} \gamma^{a_1 \alpha + b_1} \exp(B(T_0 - T)/(RTT_0)), \quad (2)$$

где T_0 - температура ($T_0=293$ К), k - параметр, определяющий консистенцию субстрата при температуре T_0 .

Прологарифмируем выражение (2)

$$\ln \mu = \ln k + a_2 \ln \alpha + a_1 \ln \gamma + b_1 \ln \gamma + B \frac{T - T_0}{RTT_0} \quad (3)$$

и введем обозначения: $z = \ln \mu$, $\ln k = K$, $x = \ln \alpha$,

$y = \ln \gamma$, $u = \frac{T - T_0}{RTT_0}$. Тогда (3) можно записать как

$$z = K + a_2 x + a_1 \alpha y + b_1 y + Bu. \quad (4)$$

В результате эксперимента были получены значения вязкости μ_{ijk} при различных значениях концентрации α_i , температуры T_j и скорости сдвига γ_k , где $i = 1, 2, \dots, N$, $j = 1, 2, \dots, M$, $k = 1, 2, \dots, L$. По этим данным определяем соответствующие величины $z_{ijk} = \ln \mu_{ijk}$, $x_i = \ln \alpha_i$, $y_k = \ln \gamma_k$, $u_j = \frac{T_j - T_0}{RT_j T_0}$.

Введем функцию $F(K, a_2, a_1, b_1, B)$ квадратов разностей в точках эксперимента

$$F(K, a_2, a_1, b_1, B) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L (z_{ijk} - K - a_2 x_i - a_1 \alpha_i y_k - b_1 y_k - Bu_j)^2 \quad (5)$$

Найдем неизвестные K, a_2, a_1, b_1, B из условия минимума функции $F(K, a_2, a_1, b_1, B)$, которое является условием равенства нулю частных производных. В результате получим систему линейных уравнений, которую решаем методом Крамера.

$$\left\{ \begin{aligned} & K \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L 1 + a_2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L x_i + a_1 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L \alpha_i y_k + \\ & + b_1 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L y_k + B \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L u_j = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L z_{ijk} \\ & K \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L x_i + a_2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L x_i^2 + a_1 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L \alpha_i x_i y_k + \\ & + b_1 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L y_k x_i + B \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L x_i u_j = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L x_i z_{ijk} \\ & K \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L \alpha_i y_k + a_2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L x_i \alpha_i y_k + a_1 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L (\alpha_i y_k)^2 + \\ & + b_1 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L \alpha_i y_k^2 + B \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L \alpha_i u_j y_k = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L z_{ijk} \alpha_i y_k \\ & K \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L y_k + a_2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L x_i y_k + a_1 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L \alpha_i y_k^2 + \\ & + b_1 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L (y_k)^2 + B \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L u_j y_k = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L z_{ijk} y_k \\ & K \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L u_j + a_2 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L x_i u_j + a_1 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L \alpha_i u_j y_k + \\ & + b_1 \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L u_j y_k + B \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L (u_j)^2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \sum_{k=1}^L z_{ijk} u_j \end{aligned} \right.$$

На основании экспериментальных данных получена следующая зависимость:

$$\mu = 5.4304 \cdot 10^{-5} \alpha^{6.0670} \gamma^{-0.0266} \alpha^{-0.6002} \cdot \exp(3.2918 \cdot 10^7 (T_0 - T)/(RTT_0)) \quad (6)$$

Отклонение от экспериментальных данных было рассчитано по формуле:

$$\sqrt{\frac{1}{MNL} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^L \left| \frac{\mu_{ijk} - \mu(\alpha_i, T_j, \gamma_k)}{\max(\mu_{ijk})} \right|} \quad (7)$$

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).

Литература

1. M. Kumar, H.D. Bartlett, N.N. Mohsenin. Flow properties of animal waste slurries. *Trans. ASAE*, 15(4), 718-722 (1972).

2. A.G. Hashimoto, Y.R. Chen. Rheology of livestock waste slurries. *Trans. ASAE*, 19(5), 930-934 (1976).
3. J.C. Barker, L.B. Driggers. Design criteria for alternative swine waste flushing systems. *Livestock Waste: A Renewable Resource, Proc 4th International Symposium on Livestock Wastes, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI*. pp. 367-370, 374 (1980).
4. Y.R. Chen. Rheological properties of sieved beef-cattle manure slurry: rheological model and effect of temperature and solids concentration. *Agric. Wastes*, 15(1), 17-33 (1986).
5. A. Achkari-Begdouri, P.R. Goodrich. Rheological properties of Moroccan dairy cattle manure. *Bioresour. Technol.*, 40(2), 149-156 (1992).
6. M. Benali, T. Kudra. Thermal dewatering of diluted organic suspensions: process mechanism and drying kinetics. *Drying Technol.*, 20(4-5), 935-951 (2002).
7. H. Landry, C. Laguë, M. Roberge. Physical and rheological properties of manure products. *Applied Eng. in Agric.*, 20(3): 277-288 (2004).
8. L. Massé, D.I. Massé, V. Beaudette, M. Muir. Particle size distribution and characteristics of raw and anaerobically digested swine manure slurry. *ASABE*. 2004. (<https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=20003&t=2&redir=&redirType=>).
9. H.M. El-Mashad, W.K.P van Loon, G. Zeeman, G.P.A. Bot. Rheological properties of dairy cattle manure. *Bioresour. Technol.*, 96(5), 531-535 (2005).
10. H.M. Keener, J.J. Hoorman, M.H. Klingman. Rheology and flowability properties of liquid dairy and swine manure. *ASABE*, Paper No. 064072, St. Joseph, Mich. ASABE. 2006. (<http://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=20932&t=2&redir=&redirType=>).
11. J.M. Langner. *Investigation of non-newtonian flow in anaerobic digesters*. Winnipeg, Manitoba, Canada, 2009, 374 p.
12. А.С. Голушко. Автореф. дисс. канд. тех. наук, ВИЭСХ, Москва, 1969. 23 с.
13. Г.И. Личман. Автореф. дисс. канд. тех. наук, ВИЭСХ, Москва, 1975. 27 с.
14. Н.П. Ледин, В.К. Письменный, В.И. Полищук. Расчет мощности роторного устройства для уборки навоза. *МЭСХ*, 4, 22-24 (1979).
15. В.Н. Письменов. *Получение и использование бесподстилочного навоза*. М., Россельхозиздат, 1988, 206 с.
16. В.П. Капустин. *Совершенствование систем уборки и транспортировки бесподстилочного навоза*. Тамбов, Изд-во ТГТУ, 2001, 123 с.
17. Методические рекомендации по проектированию систем удаления, обработки, обеззараживания, хранения и утилизации навоза и помета. Москва, МИНсельхоз, 1981 (<http://law.rufox.ru/view/9/2481.htm>).
18. А.Н. Тропин. Автореф. дисс. канд. тех. наук, ГНУ СЗНИИМЭСХ Россельхозакадемии, С-Пб., 2011. 19 с.
19. А.З. Миндубаев, С.Т. Минзанова, Е.В. Скворцов, В.Ф. Миронов, В.В. Зобов, Ф.Ю. Ахмадуллина, Л.Г. Миронова, Д.Е. Белостоцкий, А.И. Коновалов, Оптимизация параметров выработки биогаза в лабораторном масштабе, *Вестник Казан. технол. ун-та*, 4, 233 - 240 (2009).
20. К.В. Холин и др. Нефедьев, Физико-химический и биохимический анализ отработанных биогазовых субстратов, а также перспективы их практического применения, *Вестник Казан. технол. ун-та*, 2, 457 - 464 (2010).

© Ю. В. Караева - канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Исслед. центра проблем энергетики КазНЦ РАН, julieenergy@list.ru; И. А. Трахунова – асп. того же центра, irseen2@yahoo.com; А. З. Миндубаев – канд. хим. наук, ст. науч. сотр. ИОФХ им. А.Е. Арбузова КазНЦ РАН; Д. Е. Белостоцкий - канд. техн. наук, мл. науч. сотр. ИОФХ им. А.Е. Арбузова КазНЦ РАН; С. Т. Минзанова - канд. техн. наук, ст. науч. сотр. ИОФХ им. А.Е. Арбузова КазНЦ РАН; С. А. Пушкин – студ. КНИТУ; С. В. Буренков – студ. КНИТУ.