

УДК551.114(0758)+553+666.32/.36

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОЛУЧЕНИЯ УСТОЙЧИВЫХ МИКРОСУСПЕНЗИЙ МОНТМОРИЛЛОНИТОВЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ ГЛИН ДЛЯ ПТИЦЕВОДСТВА¹

**В.А. Перистый, А.И. Везенцев,
В.Д. Буханов, Л.Ф. Перистая,
Е.В. Добродомова, В.Н. Богданов,
Г.В. Фролов, А.А. Шапошников**

*Белгородский государственный
национальный исследовательский
университет, Россия, 309015,
г. Белгород, ул. Победы, 85*

E-mail: vesentsev@bsu.edu.ru

Гидродинамические расчеты показали, что устойчивая суспензия глины соответствует размерам частиц 10^{-6} – 10^{-5} м. при этом скорость свободного осаждения будет составлять менее $0.56 \cdot 10^{-6}$ м/с.

Ключевые слова: гидродинамика, глина, гидравлическое сопротивление, сила тяжести, режим течения, уравнение Ньютона.

Введение

Монтмориллонитовые наноструктурные глины Белгородской области обладают высокими сорбционными свойствами и их применение в птицеводстве позволяет повысить усвояемость кормов и снизить вредное влияние микроорганизмов на желудочно-кишечную систему птиц [1-5]. Наиболее удобной формой применения данных глин является устойчивая водная микросуспензия (взвесь) мелкодисперсных частичек глины в воде автопоилок птицефабрик. При этом суспензия не должна седиментировать в течение примерно 10 часов, считая с момента ее приготовления и заполнения автопоилок. Это требование может быть выполнено при условии, что скорость седиментации (осаждения) частичек глины, по возможности, должна быть минимальной. С этой целью были проанализированы закономерности гидродинамики твердых тел в жидкости и произведены соответствующие математические вычисления, которые приводятся ниже.

Процессы свободного осаждения в жидкости твердых тел (частиц) связаны с их движением под действием силы тяжести и зависят от сопротивления жидкой среды, которое направлено в сторону, противоположенную оседанию твердых частиц, и складывается из сопротивления сил трения и сил инерции. При осаждении с очень малой скоростью мелкодисперсных частичек глины, т.е. в условиях ламинарного режима, сопротивление трения многократно преобладает над силами инерции, которыми практически можно пренебречь. Но независимо от режима движения и формы твердого тела, движущегося в ждкости, сила сопротивления жидкой среды R , согласно уравнению Ньютона равна:

$$R = \zeta F \frac{\rho_{ж} w^2}{2} \text{ [Н]}, \quad (1)$$

где ζ – коэффициент сопротивления среды;

F – площадь проекции твердого тела на плоскость, перпендикулярную вектору его движения, м²;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкой среды, кг/м³;

w – скорость движения (осаждения) твердого тела в жидкости, м.

Примем, что формула частичек глины близка к шарообразной, т.е. в данном случае

$$F = \frac{\pi d^2}{4} \text{ и тогда уравнение (1) примет вид:}$$

¹ Работа выполнена в соответствии с Государственным заданием БелГУ, проект № 4.3392.201 и грантом РФФИ, проект № 12-04-97 584 Р_Центр_А.

$$R = \zeta \frac{\Pi d^2}{4} \frac{\rho_{ж} w^2}{2} \text{ [Н]}, \quad (2)$$

где d – диаметр твердой частицы, м.

В этом случае величину $\zeta \frac{\pi}{4 \cdot 2}$ можно принять за коэффициент сопротивления среды (Ψ) (для условно шарообразных частичек глины) и уравнение (2) примет вид:

$$R = \Psi d^2 \rho_{ж} w^2 \text{ [Н]} \quad (3)$$

Известно, что при движении шарообразных тел в жидкости при малых значениях гидродинамического критерия Рейнольдса ($Re \leq 2$) коэффициент сопротивления Ψ равен $\frac{3\Pi}{Re}$.

Действительно, проанализировав значения Re для режима сверхмедленного (w) осаждения мелкодисперсных частичек глины можно сделать очевидный вывод о малом значении критерия Рейнольдса, который учитывает и размер частиц и скорость их движения (осаждения):

$$Re = \frac{wd}{\nu}, \quad (4)$$

где w – скорость осаждения частиц, м/с;

d – диаметр шарообразной частицы, м;

ν – коэффициент кинетической вязкости жидкости, м²/с.

В свою очередь, скорость осаждения частиц может быть определена из уравнения (3):

$$w = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{R}{\Psi \rho_{ж}}} \text{ [м/с]} \quad (5)$$

При свободном оседании с минимальной скоростью мелкодисперсных частиц глины сила сопротивления R практически равна силе тяжести P , которая определяется по уравнению (6):

$$P = V(\rho_{мс} - \rho_{ж})g \text{ [Н]}, \quad (6)$$

где V – объем шарообразной твердой частицы, равный $V = \frac{\Pi d^3}{6}$, м³;

$\rho_{мс}$ – плотность частичек глины, кг/м³;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости (воды), кг/м³.

Поставляя (6) в (5), получим:

$$w = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{V(\rho_{мс} - \rho_{ж})g}{\Psi \rho_{ж}}} \text{ [м/с]} \quad (7)$$

Исходя из условий получения устойчивой суспензии, которая бы практически не седиментировалась в течение 10 часов, примем, что заданная скорость свободного осаждения частиц глины должна быть равной 2 см за 10 часов, т.е.

$$w_{зад} = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{10 \cdot 3600} = 0,56 \cdot 10^{-6} \text{ [м/с]} \quad (8)$$

Исходя из заданной скорости осаждения $w_{зад}$, вычислим размер частиц глины, которые при свободном осаждении могли бы обеспечить заданную скорость осаждения (седиментации). Для этого преобразуем уравнение (7) относительно d , принимая во внимание, что объем шарообразной частицы V равен $\frac{\Pi d^3}{6}$:

$$d = \frac{6w^2 \rho_{ж} \Psi}{\Pi(\rho_{мс} - \rho_{ж})g} \text{ [м]} \quad (9)$$

Учитывая, что плотность монтмориллонитовой глины $\rho_{мс}$ составляет 2010 кг/м³, а воды $\rho_{ж}$ 1000 кг/м³, и производя упрощения уравнение (9), получим более удобное уравнение для расчетов:

$$d = \frac{6w^2 1000 \Psi}{3,14(2010 - 1000)9,8} = 0,19 \Psi w^2 \text{ [м]} \quad (10)$$

Подставим значение $w=w_{зад}=0,56 \times 10^{-6} \text{ м/с}$, получим окончательное значение d , удобное для дальнейших вычислений:

$$d = 0,19\Psi \cdot (0,56 \cdot 10^{-6})^2 = 0,6 \cdot 10^{-13}\Psi \text{ [м]} \quad (11)$$

Коэффициент сопротивления Ψ зависит от гидродинамики, режим которой характеризуется критерием Рейнольдса (Re), который в свою очередь, зависит от размера оседающей в жидкости твердой частицы монтмориллонитовой глины. Поэтому единственный математический способ решения уравнения (11) – метод последовательных приближений: с учетом теоретических закономерностей гидродинамики, практического опыта и интуиции априори задают конкретное значение критерий Рейнольдса ($Re_{зад}$) и согласно этому значению вычисляют по

формуле Стокса ($\Psi = \frac{3\Pi}{Re}$) конкретное значение коэффициента сопротивления Ψ . Далее по

формуле (11) вычисляют значение диаметра (d) частицы монтмориллонитовой глины, а по значению диаметра (d) вычисляется фактическое значения критерия Рейнольдса ($Re_{факт}$). Сравниваются значения $Re_{зад}$ и $Re_{факт}$. При несовпадении $Re_{зад}$ и $Re_{факт}$ расчет повторяют: задают новые значения $Re_{зад}$ и вычисления производят вышесказанным способом. Расчеты заканчиваются при совпадении значений $Re_{зад}$ и $Re_{факт}$ с точностью $\pm 10\%$ относительных.

Пример методики расчета

С целью ориентирования при выборе первоначально заданного критерия Рейнольдса анализируется данный критерий:

$$Re = \frac{w_{зад} \cdot d}{\nu} = \frac{0,56 \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-6}}{1,05 \cdot 10^{-6}} = 0,53 \cdot 10^{-6}, \quad (12)$$

где $w_{зад}=0,56 \cdot 10^{-6}$ – заданная скорость осаждения частиц глины (см. уравнение 8), которая при свободном осаждении могла бы обеспечить скорость седиментации, равную 2 см за 10 часов, м/с;

$\nu=1,05 \cdot 10^{-6}$ – кинетическая вязкость воды при температуре 20°C, м²/с;

$d=10^{-6}$ – диаметр частиц глины, которые под действием сил гравитации склонны к седиментации, м.

Известно [6], что седиментации начинается при условии перехода коллоидных систем ($d=10^{-9}$ - 10^{-7}) к тонким взвесям (суспензия с размером дисперсной фазы более 10^{-6} м).

Таким образом, исходя из вышесказанных предварительных оценок зададим первоначальное значение критерия Рейнольдса равным:

$$R^1 e_{зад} = 10^{-6} \quad (13)$$

$$\Psi_1 = \frac{3\Pi}{Re} = 9,4 \cdot 10^6$$

$$d_1 = 0,6 \cdot 10^{-13}\Psi = 0,6 \cdot 10^{-13} \cdot 9,4 \cdot 10^6 = 5,7 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$R^1 e_{факт} = \frac{w_{зад} \cdot d_1}{\nu} = \frac{0,56 \cdot 10^{-6} \cdot 5,7 \cdot 10^{-7}}{1,05 \times 10^{-6}} = 3,0 \cdot 10^{-7}$$

$$R^1 e_{зад} = 10^{-6} \text{ больше } R^1 e_{факт} = 3,0 \cdot 10^{-7}$$

Поэтому на следующем этапе вычислений методом последовательного математического приближения необходимо уменьшить $R^2 e_{зад}$:

$$R^2 e_{зад} = 0,3 \cdot 10^{-6} \quad (14)$$

$$\Psi = \frac{3\Pi}{Re} = 31,4 \cdot 10^6$$

$$d_2 = 0,6 \cdot 10^{-13}\Psi_2 = 0,6 \cdot 10^{-13} \cdot 31,4 \cdot 10^6 = 18,9 \cdot 10^{-7} \text{ м}$$

$$R^2 e_{факт} = \frac{w_{зад} \cdot d}{\nu} = \frac{0,56 \cdot 10^{-6} \cdot 18,9 \cdot 10^{-7}}{1,05 \cdot 10^{-6}} = 1,02 \cdot 10^{-6}$$

$$R^2 e_{зад} = 0,3 \cdot 10^{-6} \text{ меньше } R^2 e_{факт} = 1,02 \cdot 10^{-6}$$

Поэтому на следующем третьем этапе вычислений $R^3 e_{зад}$ надо увеличить

$$R^3 e_{зад} = 0,530 \cdot 10^{-6} \quad (15)$$

$$\Psi_3 = \frac{3\Pi}{Re} = 17,7 \cdot 10^6$$

$$d_3 = 0,6 \cdot 10^{-13} \Psi_3 = 0,6 \cdot 10^{-13} \cdot 17,7 \cdot 10^6 = 1,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}$$

$$R^3 e_{\text{факт}} = \frac{w_{\text{зад}} \cdot d_3}{\nu} = \frac{0,56 \cdot 10^{-6} \cdot 1,06 \cdot 10^{-6}}{1,05 \cdot 10^{-6}} = 0,564 \cdot 10^{-6}$$

Таким образом, на третьем этапе вычислений $R^3 e_{\text{зад}} = 0,530 \cdot 10^{-6}$ вплотную приблизилось к $R^3 e_{\text{факт}} = 0,564 \cdot 10^{-6}$ и относительная ошибка вычислений составляет:

$$A_{\text{отн}} = \frac{(0,564 - 0,530) \cdot 10^{-6} \cdot 100}{0,564 \cdot 10^{-6}} \cong 6,02\% \text{отн.} \quad (16)$$

Поэтому дальнейшие расчеты не имеют практического значения и прекращаются.

Выводы

1. С целью получения устойчивой микросуспензии монтмориллонитовой глины в воде, которая бы не седиментировала в течение 10 часов в автопоилках птицефабрик, необходимо обеспечить диспергирование (измельчение) данной глины до частиц порядка $10^{-6} - 10^{-5}$ м.

2. При этом скорость седиментации (осаждения) частичек глины под действием гравитации при условии свободного осаждения составит $0,56 \cdot 10^{-6}$ м/с или 2 см за 10 часов. Однако, в реальных условиях стесненного осаждения, с учетом величины объемной доли жидкости в суспензии (ε) и отклонения геометрии частичек глины от шарообразной формы, скорость осаждения будет значительно меньше, чем в условиях свободного осаждения и, следовательно, суспензия будет более устойчивой.

Список литературы

1. Королькова С.В., Везенцев А.И. Сорбционные свойства природной и модифицированных монтмориллонит содержащих глин по отношению к ионам хрома (III) и хрома (VI) // Нано- и супрамолекулярная химия в сорбционных ионообменных процессах: материалы Всероссийской конференции с элементами научной школы для молодежи (Белгород, 14-17 сентября 2010 года). - Белгород: Изд-во БелГУ, 2010. - С.85-88.
2. Голдовская-Перистая Л.Ф., Воловичева Н.А., Везенцев А.И., Перистый В.А. Изотерма сорбции ионов стронция монтмориллонит-гидроослюдистыми глинами. // Сорбционные и хроматографические процессы. - 2011. - Т.11, вып.2. - С.165-171.
3. Везенцев А.И., Воловичева Н.А. Вещественный состав и сорбционные характеристики монтмориллонитсодержащих глин // Сорбционные и хроматографические процессы. - 2007. - Т.7, вып.4. - С.639-643.
4. Везенцев А.И., Голодовская Л.Ф., Кормош Е.В. [и др.] Сорбция ионов тяжелых металлов нативными, обогаченными и модифицированными формами монтмориллонитовых глин. // Сорбционные и хроматографические процессы. - 2006. - Т.6, вып.6, Ч.4. - С.1327-1330.
5. Везенцев А.И., Голдовская-Перистая Л.Ф., Трубицын М.А. [и др.] Сравнительная оценка способности нативных монтмориллонитовых глин Белгородской области и угля сорбировать ионы свинца. // Сорбенты как фактор качества жизни и здоровья: Материалы III Международной научной конференции (Белгород, 22-24 сентября 2008г.). - Белгород: Изд-во БелГУ, 2008. - С.84-87.
6. Щукин Е.Д., Перцев А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия: Учебник для университетов и химико-технологических ВУЗов. - М.: Высшая школа, 2004. - 445с.

HYDRODYNAMIC AND MATHEMATICAL ASPECTS OF OBTAINING OF STABLE MICROSUSPENSIONS OF MONTMORILLONITE NANOSTRUCTURAL CLAYS FOR POULTRY BREEDING

**V.A. Peristy, A.I. Vezentsev,
L.F. Bukhanov, E.V. Dobrodomova,
V.N. Bogdanov,
A.A. Shaposhnikov, G.V. Frolov**

*Belgorod State National Research
University, Pobedy St., Belgorod,
308015, Russia*

E-mail: zenino@bk.ru

Hydrodynamic calculations have shown that a stable clay suspension corresponds to particle sizes $10^{-6} - 10^{-5}$ m, the rate of free sedimentation being less than $0,56 \cdot 10^{-6}$ m/s/

Keywords: hydrodynamics, clay, hydraulic resistance, gravitation force, flow regime, Newton equation