

**ВЗАИМОСВЯЗЬ ИНЕРЦИОННЫХ И РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ПРИ ДВИЖЕНИИ КОРМОВЫХ МАСС ПО ТРУБАМ****Асадуллин Н.М.**

Реферат. В настоящее время широкое распространение получил напорный способ транспортирования различных кормовых масс по трубам в животноводстве. Производственный опыт и исследовательские работы показали, что такой способ транспортирования наиболее экономичен, отличается простотой и высокой надежностью конструктивных элементов и дает возможность автоматизировать процесс транспортирования. Большое влияние на характеристику смесей при движении по трубам оказывают их реологические свойства. Эти характеристики существенно изменяются под действием вибрации. Поэтому в последнее время наряду с классической реологией интенсивно развивается вибрационная реология, изучающая закономерности изменения деформации при периодическом приложении сил. Основное отличие вибрационной реологии от традиционной при движении кормовых масс по трубам состоит в том, что все реологические тела упругие, вязкие и пластичные, рассматриваются как носители двух свойств своего основного и инерционного. Необходимость дополнения реологических свойств инерционными при исследовании задач вибрационной реологии обуславливается тем, что при периодическом воздействии инерционные нагрузки могут значительно превышать действующие силы тяжести, становясь соизмеримыми, а иногда и преобладающими над упругими, вязкими и пластичными напряжениями. Поэтому в статье рассмотрена взаимная связь инерционных и реологических свойств, при движении кормовых масс по трубам, под действием определенного гармонического колебания. Были получены зависимости деформации при периодическом нагружении в упругом, упругоинерционном, вязком, вязкоинерционном и пластичноинерционном теле, которые позволяют в дальнейшем получать среднее значение скоростей по времени из условия выбранного для расчетов гармонического колебания давления, а также величин потерь напора определяющихся обычно по известной формуле Дарси-Вейсбаха.

Ключевые слова: реология, вибрация, вязкость, жидкость, труба.

Введение. На современном этапе развития сельскохозяйственного производства продукции животноводства широкое распространение получил напорный способ транспортирования кормовых масс неньютоновских жидкостей по трубам [1,2,3,4].

Исследовательские работы по изучению таких систем показал, что такой способ транспортирования наиболее экономичен; отличается высокой надежностью конструктивных элементов, дает возможность полностью автоматизировать процесс транспортирования [5,6].

При транспортировании простую жидкость, которая обычно относится к неньютоновским, принято рассматривать как нормальную, а жидкости с характеристиками с отклоняющимися от обычных как аномальными – неньютоновскими. Однако эти, так называемые, аномальные или неньютоновские жидкости, часто встречаются в природе. Они широко применяются в различных отраслях народного хозяйства, в том числе и в агропромышленном комплексе (различные сочетания кормовых масс), и в основе гидромеханики таких неньютоновских жидкостей лежат законы упруговязкопластических деформации и реологические свойства исследуемых сред [7,8].

Теоретические и экспериментальные исследования ряда авторов [9,10] показали, что

течение таких неньютоновских жидкостей, которыми являются большинство кормовых масс подчиняются закону, который достаточно точно описывается уравнением Шведова-Бингама.

Существует много различных подходов изучения таких неньютоновских жидкостей [10]. Например, определяют поведение жидкости, исходя из ее химических и физических свойств, созданием математической модели или используя количественные методы расчета, основывающиеся на реальных характеристиках жидкостей. Для решения инженерных задач гидромеханики, на наш взгляд, предпочтительным является второй метод изучения жидкостей. Следует отметить, что в настоящее время наиболее простые типы неньютоновских жидкостей поддаются такому рассмотрению.

Многообразие свойств смесей и сложный характер их движения не дают до настоящего времени создать общую универсальную теорию расчета ее параметров. В связи с этим для различных видов исследования свойств движения применяют отдельные модели однофазных, такие как вязкопластическая и степенная и многофазных смесей [10]. Одним из эффективных способов снижения затрат при транспортировании неньютоновских жидкостей является применение нестационарных

режимов движения, в частности, вибрации. Воздействие от вибрации, приводящие к разрушению структуры неньютоновских сред, уменьшению сил трения, создает условия движения жидкости при более низких параметров давления. В таких условиях наиболее эффективным, на наш взгляд, является применение пульсирующих режимов, создающих вибрацию самой жидкости. Поэтому в последнее время наряду с классической реологией интенсивно развивается вибрационная реология, изучающая закономерности изменения деформации при периодическом приложении сил [10,11,12]. Рассмотрим ее основные отличия.

Анализ и обсуждение результатов исследования. Основное отличие вибрационной реологии от реологии традиционной при движении кормовых масс по трубам состоит в том, что все реологические тела – упругие, вязкие и пластичные рассматриваются как носители двух свойств своего основного и инерционного. Например, не просто упругое тело, а упругоинерционное, не вязкое, а вязкоинерционное.

Необходимость дополнения реологических свойств инерционными при исследовании задач вибрационной реологии обуславливается тем, что при периодическом воздействии инерционные нагрузки в некоторых случаях могут значительно превышать действующие силы тяжести, становясь соизмеримыми, а иногда и преобладающими над упругими, вязкими и пластичными напряжениями.

Неньютоновская жидкость представляет собой сложное тело, обладающее упругими, пластичными и вязкими свойствами. Математическое описание такого сложного сочетания затруднительно. Поэтому для начального решения вопроса рассмотрим неньютоновские жидкости, обладающие как бы отдельными свойствами: упругими, вязкими и пластичными, пока не влияющими друг на друга и представляющие соответственно фундаментальные тела Гука(1), Ньютона(2) и Сен-Венана(3) [5].

$$F = kx, \quad (1)$$

где F – деформирующая сила;
 k – жесткость деформации;
 x – длина деформации.

$$F = \mu V, \quad (2)$$

где μ – коэффициент вязкости;
 V – скорость деформации.

$$F = F_n + kx, \quad (3)$$

где F_n – первоначальная деформирующая сила.

Рассмотрим реологические характеристики инерционных тел в условиях периодических нагружений.

При деформировании упругоинерционного тела периодической силой, меняющейся по гармоническому закону, сопротивления деформированию будут оказывать не только упругие силы, но и силы инерции. У упругого тела характеристикой является его жесткость, а у упругоинерционного тела – соотношение жесткости и массы. Это соотношение определяет частота собственных колебаний упругоинерционного тела. На собственной частоте упругоинерционное тело деформируется наиболее «охотно». Деформирование такого тела с другой частотой, большей или меньшей, всегда встречает определенное сопротивление.

В упругом теле соотношение между деформацией X , жесткостью K и деформирующей силой $F \sin \omega t$ при периодическом гармоническом нагружении определяется зависимостью:

$$x = F/k \sin \omega t, \quad (4)$$

где: ω – частота периодического нагружения.

В упругоинерционном теле, собственная частота колебаний которого ρ , деформация определяется $1/(1 - \omega^2 / \rho^2)$, так называемым коэффициентом усиления и равна:

$$x = [F/k(1 - \omega^2 / \rho^2)] \sin(\omega t - \varphi). \quad (5)$$

Деформация упругоинерционного тела смещена на угол по отношению к деформирующей силе. Физический смысл коэффициента усиления в том, что он показывает, во сколько раз изменяется величина деформации упругоинерционного тела по сравнению с упругим при деформировании равными по величине силами.

При деформировании вязкоинерционного тела периодической силой, меняющейся по гармоническому закону, сопротивление деформации будет складываться из вязкой силы и силы инерции. В вязком реологическом теле соотношение между скоростью деформации V , приведенном коэффициентом вязкости μ и единичной деформирующей силой $F \sin \omega t$, определяются зависимостью:

$$V = F/\mu \sin \omega t, \quad (6)$$

то есть скорость деформации пропорциональна величине деформирующей силы, обратно пропорциональна коэффициенту вязкости и не зависит от частоты нагружения и находится в одной фазе с нагружающей силой.

В вязкоинерционном теле скорость деформации зависит также от частоты ω , приложения деформирующей нагрузки и равна:

$$V = \left(\frac{1}{\sqrt{\omega^2 + \mu^2}} F \cos(\omega t + \varphi) \right). \quad (7)$$

Угол $\varphi = \arctg(\mu/\omega)$ показывает смещение скорости деформации по отношению к деформирующей силе.

Сравнивая закономерности деформации вязкого и вязкоинерционного тела, можно отметить, что скорость деформации вязкоинерционного тела меньше в $\mu / \sqrt{\omega^2 + \mu^2}$ раз.

Разница в скоростях возрастает с уменьшением вязких сопротивлений и повышением частоты приложения деформирующей нагрузки.

При деформировании пластичноинерционного тела сопротивления деформации складываются из силы сопротивления сдвигу и силы инерции. В пластичноинерционном теле, характеризующемся сопротивлением пластическому сдвигу F_n , соотношение между деформацией и деформирующей нагрузкой дается следующим приближенным выражением:

$$x = \frac{1}{\omega} \sqrt{1 - \left(\frac{4 F_n}{\pi F} \right)^2} F \sin(\omega t + \varphi). \quad (8)$$

Литература

1. Асадуллин Н.М. Разработка технологии и обоснование параметров пульсирующего транспортирования влажных высоковязких кормосмесей по трубам в животноводстве: Дис... канд.техн.наук.-Казань,1995.-164с.
2. Патент №130037 РФ, МПК F 17 D 1/16 Трубопровод для транспортирования вязких полужидких кормовых смесей/ Асадуллин Л.Н., Маркин О.Ю., Асадуллин Н.М., Маркин Ю.С.// Заявлено 14.12.2012; опубл. 10.07 2013. Бюл. №19.
3. Патент №143992 РФ, МПК F 17 D 1/16 Трубопровод для транспортирования кормовых сред / Асадуллин Н.М., Асадуллин Л.Н.// Заявлено 21.02.2014; опубл. 10.08. 2014. Бюл. №22.
4. Патент №153891 РФ,МПК F17D1/16. Трубопровод для транспортирования кормовых смесей/ Асадуллин Н.М., Асадуллин Л.Н.// Заявлено 06.10.2014; опубл. 10.08.2015. Бюл. №22.
5. Асадуллин Н.М., Асадуллин Л.Н. Нестационарное транспортирование вязких несжимаемых полужидких смесей по трубам // Вестник Казанского ГАУ.– 2014.–№4. –С.72-77.
6. Асадуллин Л.Н., Маркин О.Ю., Асадуллин Н.М. Обоснование параметров движения кормовых масс по трубам.// Аграрная наука 21 века. Актуальные исследования и перспективы/ материалы международной научно-практической конференции. – Казань: Издательство Казанского ГАУ, 2015.-С.31-34.
7. Рудаков А.И., Асадуллин Н.М. Классификация кормовых и навозных полужидких сред применительно к гидромеханике неньютоновских жидкостей.-М.,1991.-12с.-Деп. в ВНИИТЭИАгропром, 09.02.91. №494.
8. Рудаков А.И., Асадуллин Н.М., Сулейманов Р.З. Классификация и анализ способов транспортирования полужидких кормовых и навозных масс по трубам. - М.,1990.-10 с.- Деп. в ВНИИТЭИАгропром 01.09.90 №262.
9. Уилкинсон У.П. Неньютоновские жидкости. Гидромеханика, перемешивание и теплообмен: Пер с англ. – М.: Мир, 1964. – 110 с.
10. Рудаков А.И., Асадуллин Н.М. Пульсирующее транспортирование псевдопластических жидкостей по трубам в животноводстве // Вестник Казанского ГАУ.-2006.-№4.- С.62-67.
11. Патент №2097606 МПК F04F5/04. Пульсирующий эжектор / А.И.Рудаков, Н.М. Асадуллин // Заявлено 15.03.1994. Опубл 27.11.1997.
12. Патент №135273 РФ, МПК В 02 С 2/02 Устройство для испытания трубопроводов с полужидкими кормами / Асадуллин Л.Н., Маркин О.Ю., Асадуллин Н.М., Маркин Ю.С.// Заявлено 12.03.2013; опубл. 10.12 2013. Бюл. №34.

Сведения об авторе:

Асадуллин Наиль Марсирович – кандидат технических наук, доцент, e-mail: slonopotam1963@yandex.ru
ФГБОУ ВО «Казанский государственный аграрный университет» г. Казань, Россия.

Деформация смещена относительно деформирующей нагрузки на угол

$$\varphi = \arcsin(4F_n/\pi F).$$

Из приведенных зависимостей видно, что для обеспечения деформации пластичноинерционного тела периодической силой необходимо, чтобы амплитудное значение этой силы превышало силу сопротивления пластическому сдвигу. Для получения более или менее значительных деформации необходимо, чтобы это превышение было существенным.

Выводы. Полученные уравнения деформации при периодическом нагружении в упругом, упругоинерционном, вязком, вязкоинерционным и пластичноинерционным теле позволяют в дальнейшем получать среднее значение скоростей по времени из условия выбранного для расчетов гармонического колебания давления, а также величины потерь напора, которые потом будут находится обычно по известной формуле Дарси-Вейсбаха.

INTERRELATION OF INERTIAL AND RHEOLOGICAL PROPERTIES AT MOVEMENT OF FODDER MASSES ON PIPES

Asadullin N.M.

Abstract. Nowadays, the pressure transporting method of various feed masses through pipes in animal husbandry has become widespread. Production experience and research work showed that this transportation mean is the most economical, is characterized by simplicity and high reliability of structural elements and makes it possible to automate the transportation process. Their great rheological properties exert a great influence on the characteristics of mixtures, when moving through pipes. These characteristics change significantly under the influence of vibration. That's why, in recent years, along with classical rheology, the vibrational rheology has been intensively developing, which study the patterns of change in deformation under periodic application of forces. The main difference between vibrational rheology and traditional when moving feed masses through pipes is that all rheological bodies are elastic, viscous and plastic, and treated as carriers of two properties of their basic and inertial. The necessity to complement the rheological properties by inertial ones in the study of problems of vibrational rheology is due to the fact that during periodic action the inertial loads can significantly exceed the acting forces of gravity, becoming commensurable, and sometimes prevailing over elastic, viscous and plastic stresses. Therefore, the article discusses the mutual relationship of inertial and rheological properties, when the feed masses move through pipes, under the influence of a certain harmonic oscillation. Dependences of deformation were obtained for periodic loading in an elastic, elastic inertial, viscous, viscous inertial and plastic inertial body, which allow to obtain the average velocity values in the future from the term of the harmonic pressure fluctuation chosen for calculations, as well as the loss values, usually determined by the formula of Darcy-Weisbach.

Key words: rheology, vibration, viscosity, liquid, pipe.

References

1. Asadullin N.M. *Razrabotka tekhnologii i obosnovanie parametrov pulsiruyushego transportirovaniya vlazhnykh vysokovyazkikh kormosmesey po trubam v zhivotnovodstve: Dis... kand.tekhn.nauk.* (Development of technology and justification of the parameters of pulsating transportation of wet high-viscosity feed mixtures by pipes in animal husbandry: Ph.D. of Technical sciences thesis). - Kazan, 1995. - P. 164.
2. Patent №130037 RF, MPK F 17 D 1/16 *Truboprovod dlya transportirovaniya vyazkikh poluzhidkikh kormovykh smesey.* / Asadullin L.N., Markin O.Yu., Asadullin N.M., Markin Yu.S. // *Zayavleno 14.12.2012; opubl. 10.07.2013. Byul. №19.* (Patent №130037 RF, IPC F 17 D 1/16 Pipeline for transportation of viscous semi-liquid fodder mixtures. // Declared 14.12.2012; Publ. 10.07.2013. Bul. №19).
3. Patent №143992 RF, MPK F 17 D 1/16 *Truboprovod dlya transportirovaniya kormovykh sred* / Asadullin N.M., Asadullin L.N. // *Zayavleno 21.02.2014; opubl. 10.08.2014. Byul. №22.* (Patent №143992 RF, IPC F 17 D 1/16 Pipeline for transportation of feed medium. // Declared 21.02.2014; Publ. 10.08.2014. Bul. №22).
4. Patent №153891 RF, MPK F 17 D 1/16. *Truboprovod dlya transportirovaniya kormovykh smesey.* / Asadullin N.M., Asadullin L.N. // *Zayavleno 06.10.2014; opubl. 10.08.2015. Byul. №22.* (Patent №153891 of the Russian Federation, IPC F 17 D 1/16. Pipeline for transportation of feed mixtures. // Declared 06.10.2014; Publ. 08/10/2015. Bul. №22).
5. Asadullin N.M., Asadullin L.N. Non-stationary transportation of viscous incompressible semi-liquid mixtures through pipes. [Nestatsionarnoe transportirovanie vyazkikh neszhimayemykh poluzhidkikh smesey po trubam]. // *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – The Herald of Kazan State Agrarian University.*-2014.-№4. P. 72-77
6. Asadullin L.N., Markin O.Yu., Asadullin N.M. *Obosnovanie parametrov dvizheniya kormovykh mass po trubam. // Agrarnaya nauka 21 veka. Aktualnoe issledovaniya i perspektivy. / Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii.* (Substantiation of the parameters of the movement of feed masses through pipes. // Agrarian science of the 21st century. Actual research and prospects. / Proceedings of International scientific and practical conference). – Kazan: Izdatelstvo Kazanskogo GAU, 2015. - P. 31-34.
7. Rudakov A.I., Asadullin N.M. *Klassifikatsiya kormovykh i navoznykh poluzhidkikh sred primenitelno k gidromekhanike nenyutonovskikh zhidkostey.* [Classification of fodder and manure semiliquid media with respect to hydromechanics of non-Newtonian fluids]. M., 1991. – P. 12. - Dep. v VNIITEI Agroprom, 09.02.91. №494.
8. Rudakov A.I., Asadullin N.M., Suleymanov R.Z. *Klassifikatsiya i analiz sposobov transportirovaniya poluzhidkikh kormovykh i navoznykh mass po trubam.* [Classification and analysis of semi-liquid fodder and manure masses transporting methods through pipes]. - M., 1990. –P. 10. - Dep. v VNIITEI Agroprom 01.09.90 №262.
9. Uilkinson U.P. *Nenyutonovskie zhidkosti. Gidromekhanika, peremeshivanie i teploobmen: Per s angl.* [Non-Newtonian fluids. Hydromechanics, mixing and heat exchange: translated from English]. – M.: Mir, 1964. – P. 110.
10. Rudakov A.I., Asadullin N.M. Pulsating transportation of pseudoplastic liquids through pipes in animal husbandry. [Pulsiruyushee transportirovanie psevdoplasticheskikh zhidkostey po trubam v zhivotnovodstve]. // *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. – The Herald of Kazan State Agrarian University.* - 2006. - №4. - P. 62-67.
11. Patent №2097606 MPK F 04F5/04. *Pulsiruyuschiy ezhektor.* / A.I. Rudakov, N.M. Asadullin // *Zayavleno 15.03.1994. Opubl 27.11.1997.* (Patent №2097606 of the IPC F 04F5/04. Pulsating ejector. // Declared 15.03.1994. Published 27.11.1997)
12. Patent №135273 RF, MPK B 02 C 2/02 *Ustroystvo dlya ispytaniya truboprovodov s poluzhidkimi kormami.* / Asadullin L.N., Markin O.Yu., Asadullin N.M., Markin Yu.S. // *Zayavleno 12.03.2013; opubl. 10.12.2013. Byul. №34.* (Patent №135273 of the Russian Federation, IPC B 02 C 2/02 Apparatus for testing pipelines with semi-liquid feeds. // Declared 12.03.2013; Publ. 10.12.2013. Bul. №34).

Authors:

Asadullin N.M. – Ph.D. of Technical Sciences, Associate Professor, e-mail: slonopotam1963@yandex.ru
Kazan State Agrarian University, Kazan, Russia.