

УДК 622.692.4

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ УПРУГО-ВЯЗКОПЛАСТИЧНОЙ ЖИДКОСТИ В ТРУБАХ

Т.Ш. САЛАВАТОВ¹⁺, М.А. ДАДАШ-ЗАДЕ¹

Многочисленные гидродинамические процессы связаны со свойствами жидкостей. Известно, что механические и физические свойства жидкостей можно описать различными моделями. Предложены модели, которые частично описывают процессы гидромеханики. Для описания замкнутой теории движения сплошной среды и, в частности, между напряжением и деформациями необходимо иметь механическую модель. Предложенные модели дают возможность качественно описать процессы деформации, возникающей в различных системах.

Из литературного анализа известно, что существуют простые модели: упругие, вязкие и пластичные. Необходимо, чтобы механическая модель частично показывала механическое состояние упругого тела в виде закона Гука. Практика показывает, что существуют более сложные жидкости, которые не подчиняются данному закону. Одним из таких жидкостей является упруго-вязкопластичная жидкость.

В данной работе предложена модель, которая описывает упруго-вязкопластичные свойства жидкостей и последовательно соединяет упругий и вязкопластичный элементы. Для такой среды полное напряжение будет складываться из напряжения, соответствующего упругой деформации, и напряжения, вызываемого вязкопластичным сопротивлением. На основе предложенной модели получено уравнение с учётом коэффициента объёмного упругого расширения, получено уравнение для определения скорости по сечению трубы и объёмного расхода для данной жидкости. Расчёты показали, что с увеличением сжимаемости расход жидкости частично увеличивается, что в некоторых практических случаях имеет положительный эффект.

Ключевые слова: упругость, вязкопластичность, упругое расширение, деформация, поверхностно-активные вещества.

Введение. Известно, что механические свойства различных жидкостей могут быть описаны различными моделями. Такие модели дают возможность качественно описать процесс деформации, возникающей в различных системах. Отметим, что для построения замкнутой теории движения среды должна быть известна связь между кинематическим и динамическим состояниями частицы и, в частности, между напряжениями и деформациями, выражаемая при помощи механической модели.

Отметим, что к простым моделям относятся упругие, вязкие, пластичные. При этом необходимо, чтобы механические уравнения состояния упругого тела выражались при помощи закона Гука. Однако существуют и более сложные жидкости. Одной из таких жидкостей является упруго-вязкопластичная жидкость. В ранних работах [1÷9] были приведены простейшие механические модели, иллюстрирующие механические уравнения состояния вязкого, упругого и пластичного тела. Комбинируя эти данные, а также простейшие модели, можно описать различные сложные среды. Так, упруго-вязкопластичную среду можно характеризовать моделью, в

¹ Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности
+ Salavatov Tulparkhan Sarabudin, E-mail: petrotech@asoju.az

которой последовательно соединены упругий и вязкопластичный элемент (рис.). Как видно из рисунка, при $\sigma_T = 0$ имеем модель Максвелла.

Для такой среды полное напряжение будет складываться из напряжения, соответствующего упругой деформации, и напряжения, вызываемого вязкопластичным сопротивлением.

Цель работы – выявление основных свойств упруго-вязкопластичной жидкости в трубах.

Реологическая модель. С ростом глубин нефтяных и газоконденсатных скважин значительно возрастают забойные температуры и давления, которые активно воздействуют на физико-химические свойства промывочных жидкостей, тампонажных цементов и неньютоновских нефтей.

Отметим, что применение различных жидкостей в Азербайджане, а также за рубежом показывает, что многие проблемы бурения и эксплуатации скважин могут быть успешно решены с использованием искусственных жидкостей. Эти жидкости получили применение для регулирования параметров промывочных и закачиваемых жидкостей. Для стабилизации и регулирования реологических свойств таких жидкостей применяются синтетические жидкости. При этом стабилизация и повышение термической стойкости таких жидкостей достигается путём добавления полимерных поверхностно-активных веществ.

Многочисленные исследования показали, что некоторые жидкости, относящиеся к упруго-вязкопластичным средам, не подчиняются закону Ньютона.

Деформационное поведение жидкостей с аномальными, упруго-вязкопластичными жидкостями наиболее полно характеризуются тремя параметрами: сжимаемостью, структурной вязкостью и предельным напряжением сдвига.

Для решения данной задачи рассмотрим прямолинейное стационарное движение упруго-вязкопластичной жидкости в круглой цилиндрической трубе. Отметим, что в данном случае при решении задач, а также при определении гидравлических сопротивлений влияние начального участка во внимание не принимается.

Согласно линейному закону движения сжимаемой жидкости при одномерном движении объёмная упругость расширения жидкости

$$\beta = -\frac{dV}{Vdp} \quad (1)$$

Однако
$$V = \frac{m}{\rho} \quad \text{или} \quad dV = -\frac{m dp}{\rho^2} \quad (2)$$

Решая совместно эти значения, имеем:

$$\beta = \frac{dp}{\rho dp} \quad (3)$$

Определим градиент давления:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{1}{\beta \rho} \frac{d\rho}{dx} \quad (4)$$

Известно, что уравнение Шведова-Бингама можно записать как

$$\tau = -\mu \frac{dv}{dr} + \tau_0 \quad (5)$$

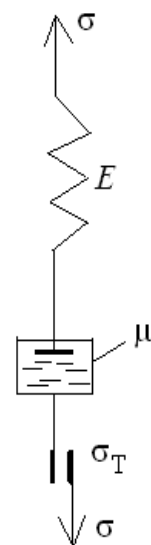


Рис. Механическая модель упруго-вязкопластичной жидкости

Учитывая вышеизложенное, запишем баланс сил, действующих на цилиндрический элемент жидкости:

$$\pi r^2 \Delta p = 2\pi r \tau dx \quad (6)$$

Решим конечное уравнение относительно градиента давления и уравнения Шведова-Бингама:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{2}{r} \left(\tau_0 - \mu \frac{dv}{dr} \right) \quad (7)$$

С учётом (4) находим:

$$\frac{1}{\beta \rho} \cdot \frac{dp}{dx} = \frac{2}{r} \left(\tau_0 - \mu \frac{dv}{dr} \right) \quad (8)$$

Для определения движения жидкости в трубе решим данное уравнение относительно скорости:

$$dv = -\frac{1}{\mu} \left(\frac{1}{2\beta} \cdot \frac{dp}{dx} r - \tau_0 \right) dr \quad (9)$$

Интегрируя данное уравнение в пределах от радиуса ядра (r) до радиуса трубы (R), получим следующее выражение:

$$v = \frac{1}{\mu} \left[\frac{1}{4\beta} \cdot \frac{dp}{dx} (R^2 - r^2) - \tau_0 (R - r) \right] \quad (10)$$

С учётом объёмного расхода ядра и кольцевого пространства, можно определить:

$$Q = Q_{\text{я}} + Q_{\text{к}} \quad (11)$$

Решая совместно, находим:

$$Q = \frac{\pi R^4}{2\mu} \left[\frac{1}{4\beta} \cdot \frac{\Delta p}{L} \left(1 - \frac{\Delta p_0^4}{\Delta p^4} \right) + \frac{2\Delta p_0}{3L} \left(\frac{\Delta p_0^3}{\Delta p^3} - 1 \right) \right] \quad (12)$$

Согласно работе профессора Щелкачёва [5] имеем:

$$\Delta p = p_{\text{н}} - p_{\text{к}} = \rho_0 \beta \Delta p (1 + \beta \bar{p}) \quad (13)$$

При этом

$$\bar{p} = \frac{p_{\text{н}} + p_{\text{к}}}{2}$$

Таким образом, уравнение упруго-вязкопластичной жидкости можно записать:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\mu L} \left[\left(1 - \frac{\Delta p_0^4}{\Delta p^4} \right) (1 + \beta \bar{p}) + \frac{4}{3} \frac{\Delta p_0}{\Delta p} \left(\frac{\Delta p_0^3}{\Delta p^3} - 1 \right) \right] \quad (14)$$

При случае, когда $\beta = 0$, имеем формулу Шведова-Бингама, а при случае, когда $\Delta p_0 = 0$, имеем формулу Пуазейля.

Предложенная расчётная модель даёт возможность определить многочисленные задачи практики, т.е. определить среднюю скорость, потери напора на трение, обобщённое число Рейнольдса.

Для упрощения данное уравнение можно записать как:

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8 \mu L} \left[(1 + \beta \bar{p}) - \frac{4 \Delta p_0}{3 \Delta p} \right] \quad (15)$$

Согласно работам академика *А.Х. Мирзаджанзаде* [9], величина коэффициента объёмной упругости заключается в пределах нефти $\beta_n = (7 \div 30) \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{ат}}$, а для воды

$$\beta_v = (2,7 \div 5) \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{ат}}.$$

Как видно, с увеличением коэффициента объёмного упругого расширения расход жидкости увеличивается. В зависимости от природы сжимаемой жидкости в некоторых условиях упругость более доминирует, чем вязкопластичность.

Заключение. Предложена модель для упруго-вязкопластичной жидкости с учётом коэффициента объёмного упругого расширения. Данная модель – одна из первых работ в области упруго-вязкопластичных жидкостей. Полученные результаты могут быть использованы также при рассмотрении ряда технологических процессов. Получено уравнение для определения распределения скорости по сечению трубы и объёмный расход для данной жидкости. С увеличением сжимаемости расход жидкости частично увеличивается, что в некоторых практических случаях имеет положительный эффект.

Обозначения:

β – коэффициент объёмного упругого расширения; m – масса рассматриваемой жидкости; ρ – плотность сжимаемой жидкости; V – объём сжимаемой жидкости; dp/dx – градиент давления; τ – касательное напряжение сдвига; τ_0 – начальное касательное напряжение сдвига; dv/dr – градиент скорости; Q – объёмный расход; Q_y – расход жидкости в ядре потока; Q_k – расход жидкости в кольцевом пространстве вокруг ядра; R – радиус трубы; Δp – перепад давления; μ – динамическая вязкость; Δp_0 – перепад давления, при котором данная жидкость в трубе с радиусом (R) начинает двигаться; L – длина трубы; p – среднее давление; p_n и p_k – начальное и конечное давление; ρ_n и ρ_k – соответственно плотность жидкости в начале и в конце трубы; ρ_0 – плотность жидкости при атмосферных условиях; v – скорость движения жидкости.

REFERENCES

1. **Mirzadzhanzade A.H., Shirinzade S.A.** Povyshenie jeffektivnosti i kachestva burenija glubokih skvazhin. M.: «Nedra», 1986. – 277 s.
2. **Vulis L.A., Kashkarov V.P.** Teorija struj vjazkoj zhidkosti. M.: «Izhevsk», 2007. – 439 s.
3. **Dmitriev N.M., Kadet V.V.** Gidravlika i neftegazovaja gidromehanika. M.: «Izhevsk», 2016. – 352 s.
4. **Lovkis Z.V.** Gidravlika. M.: «Izhevsk», 2012. – 439 s.
5. **Shhelkachjov V.N., Lapuk B.B.** Podzemnaja gidravlika. M.: «Izhevsk», 2001. – 763 s.
6. **Kelbaliev G.I., Rasulov S.R., Rzaev A.G., Mustafaeva G.R.** Reologija strukturirovannyh neftej // IFZh, tom 90, № 4, s. 1044-1050
7. **Salavatov T.Sh., Mustafaev A.A., Dadash-zade M.A., Mamedova E.V.** Issledovanie gazliftnyh skvazhin v processe ih puska // Vestnik Azerbajdzhanskoj inzhenernoj akademii, 2013, tom 5, № 1, str. 58-62.
8. **Barnes H.A.** A review of the rheology of filled viscoelastic // Rheol. Rev, 2003, № 2, Pp. 1÷21.
9. **Mirzadzhanzade A.H., Ametov I.M., Kovaljov A.G.** Fizika nefljanogo i gazovogo plasta. M.: «Izhevsk», 2005. – 267s.

ELASTİKİ-ÖZLÜPLASTİK MAYELƏRİN BORULARDA HƏRƏKƏTİNİN REOLOJİ TƏDQIQATLARI

T.Ş. SALAVATOV, M.Ə. DADAŞ-ZADƏ

Bir çox hidrodinamiki proseslər mayelərin xassələri ilə əlaqədardır. Bildiyimiz kimi, mayelərin mexaniki və fiziki xassələrini müxtəlif modellər ilə göstərmək olar. Sadə prosesləri hidromexaniki nöqtəyi-nəzərdən ifadə etmək üçün sadə modellər geniş istifadə olunur. Bu modellərin köməyi ilə müxtəlif sistemlərdə yaranan deformasiyanı tədqiq etmək olar. Qapalı sistemdə sərt mühitin hərəkət qanunlarına görə gərginlik ilə deformasiya arasında əlaqəni ifadə etmək üçün mexaniki modelin olması əsas məsələlərdən biridir.

Ədəbiyyatın analizi göstərir ki, bir çox sadə modellər, gərilməli, özlülüklü, plastik modellərdən geniş istifadə olunur. Onların bəziləri gərilmiş maddi cisim kimi baxılır və onlar Huk qanunu ilə ifadə olunurlar. Ancaq praktika göstərir ki, bu sadə modellərlə yanaşı mürəkkəb modellərində olması labüd şərtidir. Belə modellərdən biri elastiki-özlüplastik modeldir.

Baxılan məqalədə elastiki-özlüplastik mayelərin mexaniki modeli verilmişdir. Model əsasında bir çox hidromexaniki prosesləri ifadə etmək olar. Bu mühit üçün gərginlik elastiki deformasiya ilə, özlü-plastik müqavimətin cəmindən ibarətdir. Baxılan model əsasında həcmi elastiki genişlənmə parametri əsasında dairəvi boruda sürətin paylanması və həcmi sərfi hesablamaq üçün tənliklər alınmışdır. Hesabatlar göstərir ki, maye sıxıldıqca onun qismən həcmi hasilatı artır. Bu da öz növbəsində praktikada müsbət effektin yaranmasına səbəb ola bilər. Bu hesabat metodikası sənayenin müxtəlif sahələrində, o cümlədən, qazmada istismarda və layların işlənməsində geniş istifadə oluna bilər.

Açar sözlər: elastiki, özlü-plastiki, elastiki genişlənmə, deformasiya, səthi aktiv maddə.

RESEARCH OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF ELASTIC-VISCOPLASTIC LIQUID IN PIPES

T.Sh. SALAVATOV, M.A. DADASH-ZADE

Numerous hydrodynamic processes are associated with the properties of liquids. It is known that the mechanical and physical properties of liquids can be described by various models. Various models are proposed that partially describe hydro mechanical processes. The proposed model makes it possible to qualitatively describe the processes of deformation that occurs in various systems. To describe a closed theory of the motion of a continuous medium and, in particular, between stress and strain, it is necessary to have a mechanical model.

From literary analysis it is known that there are simple models, which include elastic, viscous and plastic. In this case, it is necessary that the mechanical model partially shows the mechanical state of the elastic body in the form of Hooke's law. Practice shows that there are more complex fluids that do not obey this law. One such fluid is a viscous-elastic fluid.

In this paper, a model was proposed that describes the elastic-viscous-plastic properties of liquids, which sequentially connects the elastic and viscous-plastic element. For such a medium, the total stress will be the sum of the stress corresponding to elastic deformation and the stress caused by the viscous-plastic resistance. Based on the proposed model, an equation is obtained taking into account the coefficient of volumetric elastic expansion, an equation is obtained for determining the velocity over the cross section of the pipe and the volumetric flow rate for a given liquid. The calculations showed that with an increase in compressibility, the fluid flow partially increases, which in some practical cases has a positive effect.

Key words: elasticity, visco-plasticity, elastic expansion, deformation, surfactants.

Поступило:	02.02.2020
После доработки:	23.11.2020
Принято к публикации:	01.12.2020