

Влияние колебаний давления на вязкость нефти, содержащей коллоидные частицы

В.И. Лесин^{1*}, С.В. Лесин²

1 – Институт проблем нефти и газа РАН

2 – РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина

e-mail: *vilesin@inbox.ru

Аннотация. В исследованиях изменений вязкости нефти под воздействием вибрационных колебаний давления эффект воздействия связывается с изменениями в размерах коллективных коллоидных структурных единиц.

На основе разработанной автором фрактальной теории вязкости проведен анализ воздействия вибрационной обработки на вязкость нефти, содержащей агрегаты коллоидных частиц фрактальной структуры. Получена формула для оценки влияния амплитуды и частоты вибрационных колебаний давления на вязкость нефти. Показано соответствие имеющихся экспериментальных данных по воздействию вибраций и предсказаний фрактальной теории вязкости.

Ключевые слова: вязкость, нефть, колебания давления, ультразвук, фрактальная теория вязкости нефти, скорость сдвига.

Для цитирования: Лесин В.И., Лесин С.В. Влияние колебаний давления на вязкость нефти, содержащей коллоидные частицы // Актуальные проблемы нефти и газа. 2019. Вып. 1(24). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-24.art11>

Введение

Добыча и транспортировка тяжелой нефти осложняется ее высокой вязкостью, снижающей производительность добывающих скважин и трубопроводов. Такая нефть является неньютоновской жидкостью, текущая вязкость которой зависит как от скорости сдвига – градиента скорости dV/dx , так и от истории температурного воздействия, скорости сдвига и других внешних воздействий [1, 2]. Это связано с возникновением отдельных коллоидных частиц и их коллективных структур, которые, как было показано в ряде работ [3, 4], имеют структуру физических фракталов (или фрактальных агрегатов – ФА) [5].

Физические свойства ФА и влияние на них внешних воздействий к настоящему времени достаточно подробно изучены методами спектроскопии рассеяния фотонов [6, 7].

В [2, 4, 8–11] на основе фрактальной модели вязкости предложена теория, в которой установлена зависимость вязкости коллоидных систем, в том числе нефти, от

концентрации и физических свойств ФА. Теория позволила предсказать зависимость вязкости от времени при изменении скорости сдвига [8], снижение вязкости после обработки нефти магнитным полем [4], аномальную вязкость [10], особенности зависимости вязкости от скорости сдвига в области малых значений скорости сдвига [11].

Особенностями фрактальных агрегатов являются зависимость массы M от инерциального радиуса R в форме $M = m(R/a)^D$ (где D – фрактальная размерность агрегата ($1 \leq D \leq 3$), m – масса коллоидной частицы, a – радиус коллоидной частицы). ФА характеризуются проницаемостью, зависимостью размерности D от скорости роста и разрушения под действием скорости сдвига и температуры, малая энергия связи между частицами в агрегате позволяет разрушать ФА слабыми внешними физическими воздействиями [5–7]. К таким воздействиям относится напряжение сдвига, возникающее благодаря градиенту скорости жидкости (скорости сдвига). Предложенная в [4, 8, 9] теория связывает вязкость η с радиусом R :

$$\eta = \eta_{\infty}(1 + Ka^3n(R/a)^{\lambda}), \quad (1)$$

где a – радиус коллоидной частицы, η_{∞} – вязкость при бесконечной скорости сдвига, K и λ – постоянные, зависящие от размерности ФА и истории внешнего воздействия, n – концентрация ФА.

Параметр (R/a) при данной температуре зависит, в том числе, от скорости сдвига G [5–7]:

$$R/a \sim (G_0/G)^h, \quad (2)$$

где G_0 и h – постоянные величины.

Используя (2) получаем [4, 10]:

$$\eta = \eta_{\infty}(1 + Ka^3n(G_0/G))^{\lambda h}. \quad (3)$$

Для снижения вязкости η используют колебания давления, создаваемые, как правило, пьезомагнитными источниками ультразвука, которые, в свою очередь, сопровождаются и колебаниями скорости сдвига (градиента скорости), из-за возвратно-поступательного движения частиц жидкости в ультразвуковой волне. Такие колебания при достаточно длительном воздействии могут снижать вязкость на десятки процентов (см., например, [12, 13]).

В данной работе рассмотрено воздействие колебаний давления в жидкости на вязкость нефти на основе фрактальной теории вязкости.

Теория

В работе [14] при исследовании фильтрации нефти, содержащей асфальтены и смолы, был сделан вывод о том, что коллоидные частицы асфальтенов образуют линейные структуры (что соответствует ФА с $1 < D < 2$). Адсорбированные на поверхности порового пространства линейные структуры разрываются под действием напряжения сдвига, возникающего при фильтрации нефти. Это приводит к нелинейной зависимости скорости фильтрации нефти Q от перепада давления ΔP вида $Q \sim (\Delta P)^\alpha$, где $\alpha \approx 2$ [14]. Согласно закону Дарси $Q \sim (\Delta P)/\eta$, где η – текущая вязкость, в соответствии с (3) $\eta \sim 1/G$. Поскольку при фильтрации $G \sim \Delta P$, то $\eta \sim 1/\Delta P$, тогда $Q \sim (\Delta P)^2$.

При изменении ΔP новое стационарное значение Q устанавливалось через несколько десятков минут, что связывалось с процессом разрушения асфальтовых надмолекулярных нитевидных структур [14]. Этот результат согласуется с результатами по исследованию релаксации вязкости нефти во времени при изменении скорости сдвига [8].

Из [14] следует, что для нефти, имеющей в своем составе коллоидные частицы, воздействие скорости сдвига может привести к значительному росту скорости фильтрации за счет снижения вязкости нефти в результате уменьшения R . Отметим, что минимизации свободной энергии коллоидной системы соответствует формирование ФА в виде плотно упакованного шара с размерностью $D = 3$, что и наблюдается как медленный рост величины D [6, 7] при постоянной температуре.

Гармонические колебания давления $P \sin(2\pi vt)$ связаны с колебаниями частиц среды и скоростью частиц среды соотношением:

$$P = 2\pi v \rho C A = 2\pi \rho C v, \quad (4)$$

где v – частота колебаний (s^{-1}), ρ – плотность среды, C – скорость звука (C в нефти – 1300 м/с), A – амплитуда колебаний частиц среды, v – амплитуда скорости колебаний частиц среды. Откуда

$$v = vA = P/2\pi\rho C. \quad (5)$$

Среднее за период колебаний значение модуля скорости $|\dot{v}| = (2/\pi)vA$, или $|\dot{v}| \approx 0,64vA$.

Поскольку ФА обладает большой массой, можно считать, что при колебаниях частиц окружающей жидкости ФА остается неподвижным. Тогда усредненный по

времени максимальный градиент скорости G_m на поверхности ФА (с учетом пористой структуры ФА [5, 6]) при колебаниях скорости жидкости составит:

$$G_m = 0,64vA/R_s = 0,64 P/2\pi r R_s C, \quad (6)$$

где R_s – характерный размер фрагмента структуры на поверхности ФА, $R_s \geq a$.

Эксперимент

Оценим величину G_m для некоторых значений частоты и амплитуды колебаний A . При ультразвуковом воздействии с $v = 10^4$ гц, при $R = 10^{-4}$ см, $A = 10^{-5}$ см, получаем оценку $G = 6,4 \cdot 10^2$ с⁻¹. Такая величина скорости сдвига за несколько минут непрерывного воздействия может вызвать значительное уменьшение радиуса ФА и, следовательно, снижение вязкости на десятки процентов до предельного значения, соответствующего данному значению скорости сдвига [8].

В работах [12, 15, 16] при исследованиях воздействия ультразвука на вязкость нефти, в том числе в пористой среде [15], наблюдалось как снижение [12], так и рост вязкости [16]. Время обработки для достижения предельных значений вязкости составляло величины от нескольких до десятков минут.

В работах [2, 8, 9] установлено, что при изменении G величина вязкости η меняется во времени постепенно и стационарное значение вязкости, соответствующее новому значению скорости сдвига, устанавливается через время от нескольких десятков секунд до нескольких часов, в зависимости от скорости сдвига и вязкости жидкости. Поэтому для оценки величины G_m (6), при которой можно достигнуть значительного изменения вязкости при воздействии колебаний давления, можно использовать зависимость $\eta(G)$, получаемую при исследовании зависимости вязкости от скорости сдвига с учетом возможной истории воздействия скорости сдвига.

На рис. 1 приведен пример зависимости $\eta(G)$ для образца нефти, которая в течение 30 мин подвергалась воздействию скорости сдвига 100 с⁻¹. После чего была измерена зависимость $\eta(G)$, приведенная на рис. 1.

Из рисунка видно, что для значительного снижения вязкости примерно в 10 раз и достижения предельно возможного значения вязкости достаточно скоростей сдвига порядка 0,01 с⁻¹. Такая зависимость соответствует ФА с высокой проницаемостью для жидкости. В этом случае величина R приближается к радиусу a отдельной коллоидной частицы, то есть к величине $R = 3 \cdot 10^{-6}$ см [4], поскольку жидкость протекает сквозь ФА.

При этом для значительно снижения вязкости достаточно амплитуды $A = 10^{-6}$ см, а амплитуды колебаний давления P – порядка $5 \cdot 10^{-3}$ дин/см². Для достижения значительного снижения вязкости в данном случае будет достаточно нескольких десятков минут [8, 9].

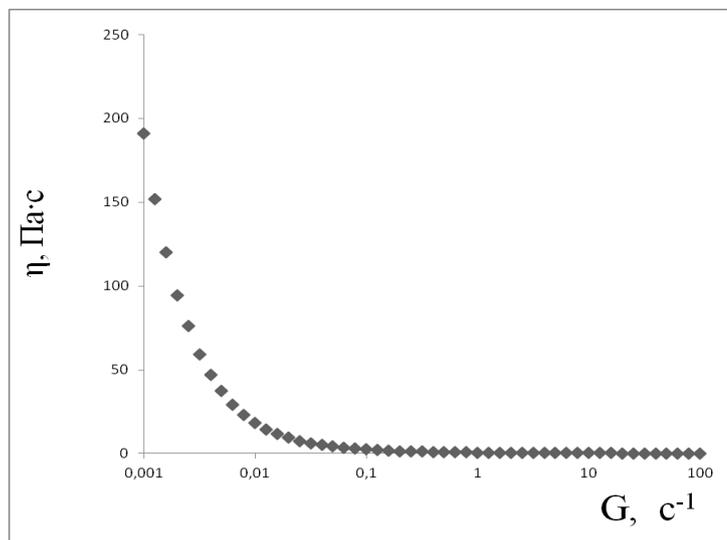


Рис. 1. Зависимость вязкости от скорости сдвига для тяжелой нефти при температуре 11 °С

Однако не во всех случаях зависимость $\eta(G)$ имеет вид, приведенный на рис. 1. Как следует из фрактальной теории, в некоторых случаях рост скорости сдвига в диапазоне нулевых значений может сопровождаться ростом вязкости [11] и, следовательно, воздействие колебаний давления может сопровождаться значительным ростом вязкости нефти.

На рис. 2 приведен пример такой зависимости $\eta(G)$, полученный для тяжелой нефти, хранившейся при температуре 20 °С, после охлаждения до температуры 5 °С. Измерения вязкости проводились сразу после достижения образцом температуры 5 °С после помещения образца на термостатируемую поверхность измерительной ячейки геометрии плита–конус. Понижение температуры сопровождается снижением вязкости нефти и изменением параметров ФА коллоидных частиц

Как видно из рис. 1, в диапазоне скоростей сдвига $0,001 \text{ с}^{-1} < G < 0,01 \text{ с}^{-1}$ вязкость возрастает почти в 10 раз, достигая величины 45 Па·с, при дальнейшем росте скорости сдвига вязкость падает до величины 1,4 Па·с при $G = 1 \text{ с}^{-1}$, достигая $\eta = 0,235 \text{ Па}\cdot\text{с}$ при $G = 100 \text{ с}^{-1}$.

Такой характер зависимости $\eta(G)$ может приводить к росту дебета, отсутствию реакции, падению дебета.

При лабораторных исследованиях наблюдались случаи увеличения вязкости под действием ультразвука на нефть. Например, в работе [16] обнаружен многократный рост вязкости по сравнению с исходной после воздействия ультразвука в течение первых нескольких минут. Продолжение воздействия сопровождалось падением примерно на 40% возросшей величины вязкости. Диапазон продолжительности воздействия составлял несколько десятков минут.

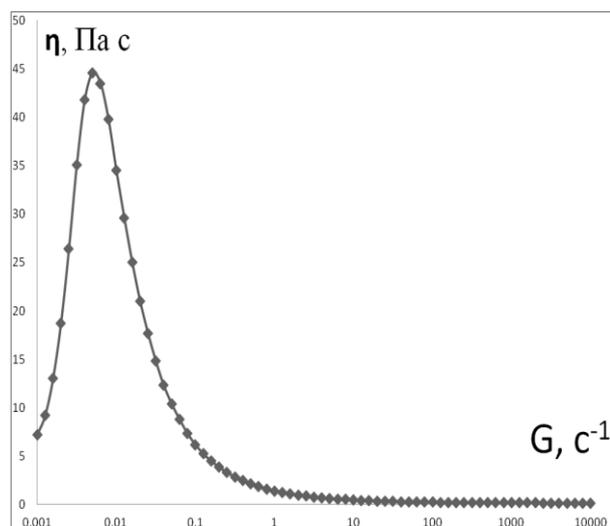


Рис. 2. Зависимость вязкости η , от скорости сдвига G для тяжелой нефти при температуре 5 °С

Приведенные примеры показывают, что результат воздействия колебаний давления сильно зависит от того, в каком состоянии находится дисперсная составляющая (а именно ФА) в нефти после воздействий температуры и скорости сдвига.

Благодаря сохранению «памяти» о внешнем воздействии [1] после обработки нефти колебаниями давления или скоростью сдвига более низкие значения вязкости нефти могут сохраняться в течение нескольких дней. Сохранение «памяти» вязкости нефти продемонстрировано в [8, 17]: после воздействия большой скоростью сдвига вязкость нефти при малой скорости сдвига монотонно растет в течение нескольких часов, но предельное значение вязкости остается значительно ниже, чем до воздействия.

Применимость формулы (3) при течении в капиллярах размером порядка 1 мкм показана в [18], что обосновывает применение фрактальной теории вязкости при протекании нефти через пористую среду.

Выводы

Анализ воздействия колебаний давления на вязкость, проведенный на основе фрактальной теории, показывает возможность значительного по величине изменения вязкости нефти, содержащей коллоидные частицы. Снижение вязкости может достигаться при воздействии малых значений амплитуды колебаний в течение достаточно длительного времени.

Статья написана в рамках выполнения государственного задания (тема «Исследование термодинамических свойств углеводородных смесей, моделирование гидротермодинамических, физико-химических и геомеханических процессов в геосредах с целью повышения эффективности разработки трудноизвлекаемых запасов нефти и газа», № АААА-А19-119030690057-5).

Литература

1. Евдокимов И.Н., Елисеев Н.Ю. Долгоживущие метастабильные состояния коллоидных структур нефтяных остатков // Химия и технология топлив и масел. 2005. № 3. С. 45–47.
2. Лесин В.И., Алексеева Ю.А. Эволюция структуры фрактальных агрегатов нефти под действием напряжения сдвига // Актуальные проблемы нефти и газа. 2018. Вып. 3(22). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art28>
3. Kane M., Djabourova M., Volle J.-L. Rheology and structure of waxy crude oils in quiescent and under shearing conditions // Fuel. 2004. Vol. 83. P. 1591–1605.
4. Lesin V.I., Koksharov Yu.A., Khomutov G.B. Viscosity of liquid suspensions with fractal aggregates: magnetic nanoparticles in petroleum colloidal structures // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2011. Vol. 392. P. 88–94.
5. Жюльен Р. Фрактальные агрегаты // Успехи физических наук. 1989. Т. 157, № 2. С. 339–357.
6. Sontag R.C., Russel W.B. Structure and breakup of flocs subjected to fluid stresses: I. Shear experiments // Journal of Colloid and Interface Science. 1986. Vol. 113, № 2. P. 399–413.
7. Ролдугин В.И. Свойства фрактальных систем // Успехи химии. 2003. Т. 72, № 11. С. 1027–1054.

8. *Лесин В.И.* Агрегация коллоидных частиц, регистрируемая по изменению вязкости // Актуальные проблемы нефти и газа. 2016. Вып. 2(14). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2016-14.art16>

9. *Лесин В.И., Клепиков И.А., Лесин С.В.* Использование сдвигового воздействия для снижения вязкости нефти // Георесурсы, геоэнергетика, геополитика. 2016. Вып. 1(13). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2016-13.art6>

10. *Лесин В.И., Клепиков И.А.* Применение фрактальной теории вязкости дисперсных систем к аномальной зависимости вязкости от скорости сдвига // Нефтяное хозяйство. 2015. № 2. С. 38–41.

11. *Лесин В.И., Лесин С.В.* Фрактальная теория и экспериментальные исследования вязкости коллоидных систем при скоростях сдвига, близких к нулю // Нефтяное хозяйство. 2013. № 7. С. 111–113.

12. *Лоскутова Ю.В., Прозорова И.В., Юдина Н.В., Рикконен С.В.* Изменение реологических свойств нефтяных дисперсных систем при вибрационной обработке // Коллоидный журнал. 2005. Т. 67, № 5. С. 663–667.

13. *Муллакаев М.С., Абрамов В.О., Печков А.А.* Ультразвуковое оборудование для восстановления продуктивности нефтяных скважин // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2009. № 3. С. 12–17.

14. *Гальцев В.Е., Аметов И.М., Дзюбенко Е.М., Кузнецов А.М., Ковалев А.Г., Сальников Д.И.* Влияние образования надмолекулярных структур на фильтрацию нефти в пористой среде // Коллоидный журнал. 1995. Т. 57, № 5. С. 660–665.

15. *Hamidi H., Mohammadian E., Junin R., Rafati R., Manan M., Azdarpour A., Junid M.A.* Technique for evaluating the oil/heavy-oil viscosity changes under ultrasound in a simulated porous medium // Ultrasonics. 2014. Vol. 54, Iss. 2. P. 655–662.

16. *Ануфриев Р.В., Волкова Г.И.* Влияние ультразвука на структурно-механические свойства нефтей и процесс осадкообразования // Известия Томского политехнического ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2016. Т. 327, № 10. С. 50–58.

17. *Лесин В.И., Еремин Н.А.* Природные и синтезированные наноразмерные окислы железа – нанороботы в процессах управления с помощью магнитного поля извлечением, транспортировкой, подготовкой и переработкой нефти // Нефть. Газ. Новации. 2018. № 1. С. 18–22.

18. *Шатагина Е.А., Шатагина А.А., Шатагин И.А.* Фрактальная структура ЭЖК слоев *n*-тетрадекана // Молодой ученый. 2011, Т. 1, № 8, С. 12–16.

Influence of pressure fluctuations on the viscosity of oil containing colloidal particles

V.I. Lesin^{1*}, S.V. Lesin²

1 – Oil and Gas Research Institute of the Russian Academy of Sciences

2 – Gubkin Oil and Gas University

e-mail: *vilesin@inbox.ru

Abstract. In studies of changes in oil viscosity under the effect of ultrasound treatment, the ultrasound effect is associated with changes in the size of collective colloidal structural units. In the article presented, on the basis of developed by the author of fractal theory of viscosity, the analysis of the impact of ultrasound vibration treatment on the viscosity of the oil containing aggregates of colloidal particles of a fractal structure. The formula for estimating the influence of the amplitude and frequency of vibration pressure fluctuations on the viscosity of oil is obtained. The correspondence of the available experimental data on the effects of vibrations and predictions of the fractal theory of viscosity is shown.

Keywords: viscosity, oil, pressure oscillation, ultrasound, fractal theory of oil viscosity, shear rate.

Citation: Lesin V.I., Lesin S.V. Influence of pressure fluctuations on the viscosity of oil containing colloidal particles // Actual Problems of Oil and Gas. 2019. Iss. 1(24). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2019-24.art11> (In Russ.).

References

1. *Evdokimov I.N., Eliseev N.Yu.* Colloidal structures of petroleum residues long-lived in metastable states // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. 2005. Vol. 41. No 3. P. 45–47.
2. *Lesin V.I., Alekseeva Yu.A.* Evolution of the structure of oil fractal aggregates under the action of shear stress // Actual Problems of Oil and Gas. 2018. Iss. 3(22). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2018-22.art28> (In Russ.).
3. *Kane M., Djabourova M., Volle J.-L.* Rheology and structure of waxy crude oils in quiescent and under shearing conditions // Fuel. 2004. Vol. 83. P. 1591–1605.
4. *Lesin V.I., Koksharov Yu.A., Khomutov G.B.* Viscosity of liquid suspensions with fractal aggregates: magnetic nanoparticles in petroleum colloidal structures // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2011. Vol. 392. P. 88–94.
5. *Jullien R.* Fractal Aggregates // Condensed Matter Physics. 1987. Vol. 13, No. 4. P. 339–357.
6. *Sontag R.C., Russel W.B.* Structure and breakup of flocs subjected to fluid stresses: I. Shear experiments // Journal of Colloid and Interface Science. 1986. Vol. 113, No. 2. P. 399–413.

7. *Roldugin V.I.* The characteristics of fractal disperse systems // Russian Chemical Reviews. 2003. Vol. 72, No. 11. P. 1027–1054.
8. *Lesin V.I.* Aggregation of colloidal particles registered by viscosity change measurements // Actual Problems of Oil and Gas. 2016. Iss. 2(14). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2016-14.art16> (In Russ.).
9. *Lesin V.I., Klepikov I.A., Lesin S.V.* Using a shear rate effect for oil viscosity reduction // Georesources, Geoenergetics, Geopolitics. 2016. Iss.1 (13). <https://doi.org/10.29222/ipng.2078-5712.2016-13.art6> (In Russ.).
10. *Lesin V.I., Klepikov I.A.* Fractal viscosity theory application to anomalous viscosity dependence on share rate// Oil Industry. 2015. No. 2. P. 38–41. (In Russ.).
11. *Lesin V.I., Lesin S.V.* Fractal theory and experimental research of colloidal systems viscosity at shear rates close to zero value // Oil Industry 2013. No. 7. P. 111–113. (In Russ.).
12. *Loskutava Yu.V., Prozorova I.V., Yudina N.V., Rikkonen S.V.* Change in the rheological properties of oil disperse systems upon a vibrational treatment // Colloid Journal. 2005. Vol. 67, No. 5. P. 663–667.
13. *Mullakaev M.S., Abramov O.V., Abramov V.O., Gradov O.M., Pechkov A.A.* An ultrasonic technology for productivity restoration in low-flow boreholes // Chemical and petroleum engineering. 2009. Vol. 45, No. 3-4. P. 203–210.
14. *Gal'tsev V.E., Ametov I.M., Dzyubenko E.M., Kuznetsov A.M., Kovalev A.G., Sal'nikov D.I.* Effect of supermolecular structure on the oil filtration in a porous medium // Colloid Journal. 1995. Vol. 57, No. 5. P. 621–626.
15. *Hamidi H., Mohammadian E., Junin R., Rafati R., Manan M., Azdarpour A., Junid M.A.* Technique for evaluating the oil/heavy-oil viscosity changes under ultrasound in a simulated porous medium // Ultrasonics. 2014. Vol. 54, Iss. 2. P. 655–662.
16. *Anufriev R.V., Volkova G.I.* Influence of ultrasonic treatment on structuralpmechanical properties of oil and sedimentation // Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering. 2016. Vol. 327, No. 10. P. 50–58. (In Russ.).
17. *Lesin V.I., Eremin N.A.* The natural and synthesized nanoscale iron oxides - nanobots in the control processes of the production, the transportation, the preparation and the refining of oil by using the magnetic field // Neft. Gaz. Novacii. 2018. No. 1. P. 18–22. (In Russ.).

18. *Shatagina E.A., Shatagina A.A., Shatagin I.A.* Fractal structure of epitropic liquid crystal layers of n-tetradecane // *Molodoy Uchenyi*. 2011, Vol. 1, No. 8. P. 12–16. (In Russ.).