УДК 622.654.12

https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-1-39-45

Простые стационарные фильтрационные потоки несжимаемой неньютоновской нефти в однородном пласте по общему нелинейному закону

Марал Гасан кызы АЛИЕВА[1]
Нияз Гадым оглы ВАЛИЕВ[2]

[1]Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, Баку, Азербайджан
[2]Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Аннотация

Актуальность работы. Решены три стационарно-гидродинамические теоретические задачи, в которых фильтрации подчиняются только общему нелинейному закону. В задачах рассматриваются простые потоки: плоско-параллельный, плоско-радиальный и полусферически-радиальный.

Методология. Все выведенные формулы – дебита нефти, скорости фильтрации, градиента давления и др. – нужно использовать для решения различных практических задач разработки указанных залежей и при составлении проекта разработки подобных залежей. Следует отметить, что плоско-параллельный простой фильтрационный поток нефти движется из полосообразной залежи к прямолинейной галерее. Кроме этого, такой простой фильтрационный поток жидкости также имеет место, когда разрабатываемое нефтяное месторождение имеет несколько параллельных прямолинейных рядов эксплуатационных добывающих скважин и в ряде случаев в залежи могут быть ряды нагнетательных водяных скважин. На площадях нефтеносности между параллельными соседними рядами фильтрация нефти является также плоско-параллельной.

Результаты. Отсюда становится ясным практическое значение решения первой задачи о плоско-параллельном потоке нефти в настоящей научной статье. Плоско-радиальный простой фильтрационный поток нефти движется из круговой горизонтальной залежи к центральной эксплуатационной добывающей скважине. Кроме того, такой простой фильтрационный поток жидкости также имеет место, когда разрабатываемое нефтяное полосообразное месторождение имеет несколько (обычно три или четыре) параллельных прямолинейных рядов эксплуатационных добывающих скважин. В дренажных зонах этих скважин также происходит простой плоско-радиальный фильтрационный поток.

Выводы. Из изложенного становится понятным практическое значение плоско-радиального потока нефти. Полусферически-радиальный простой фильтрационный поток нефти движется из полусферической залежи к центральной скважине с едва вскрытой залежью и полусферически вогнутым забоем. Анализируя эти расчетные формулы, можно выявить специфические особенности разработки залежей, разрабатывать и внедрять мероприятия по устранению нежелательных явлений.

***Ключевые слова*:** потоки фильтрации, неньютоновская нефть, нелинейный закон, несжимаемая нефть, однородный пласт, дебит, скорость фильтрации, продолжительность продвижения, дифференциальное уравнение.

Введение

Решены три стационарно-гидродинамические задачи, в которых процессы фильтрации подчиняются только общему нелинейному закону.

В *первой задаче* фильтрация нефти происходит с плоско-параллельным простым потоком.

На рис. 1 показана схема системы «прямолинейная галерея–полосообразная залежь», на которой представлены следующие условные обозначения: P – давление; $P_г$ – забойное давление галереи; P_k – текущее давление; x – пространственная координата (абсцисса); L_k – длина залежи; h – мощность (толщина) продуктивного пласта.

Общий нелинейный закон фильтрации в дифференциальной форме выражается в виде:

$$v = -C\left(\frac{dP}{dx}\right)^{1/n}, \tag{1}$$

где C – коэффициент фильтрации (подвижности); $1/n$ – показатель степени.

Площадь поверхности фильтрации:

$$F = Bh, \tag{2}$$

где B – ширина полосообразной залежи.

✉maral.aliyeva.5252@mail.ru
**niyaz.valiev@m.ursmu.ru
https://orcid.org/0000-0002-5556-2217

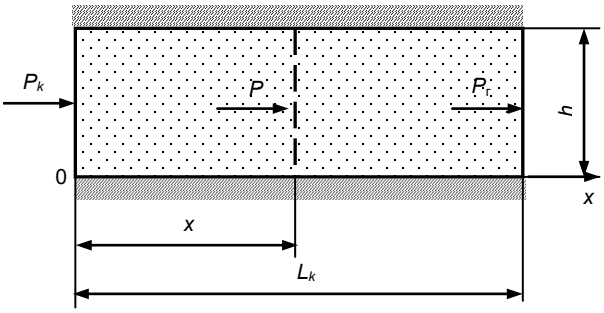

Рисунок 1. Схема системы «прямолинейная галерея–полосообразная залежь».
Figure 1. Scheme of the "straight line mine gallery – strip-like deposit" system.

Используя значения v и F в формулах (1) и (2), получаем следующее дифференциальное уравнение:

$$Q = vF = -BhC\left(\frac{dP}{dx}\right)^{1/n}, \tag{3}$$

где Q – дебит нефти галереи.

Разделяя на переменные уравнение (3) и интегрируя его в пределах по P от $P_п$ до $P_г$ и x от нуля до L_k, получаем следующую формулу для дебита галереи:

$$Q = \frac{BhC}{L_k^{1/n}}\left(P_k - P_г\right)^{1/n}. \tag{4}$$

Скорость фильтрации неньютоновской нефти:

$$v = \frac{C}{L_k^{1/n}}\left(P_k - P_г\right)^{1/n}. \tag{5}$$

Как видно из формулы (5), текущая скорость фильтрации не изменяется в зависимости от пространственной координаты, т. е. от абсциссы x, а остается постоянной.

А теперь интегрируем уравнение (3) в других пределах, т. е. по P от $P_п$ до P и по x от L_k до x:

$$\left(-\frac{Q}{BhC}\right)^n \int_{L_k}^{x} dx = \int_{P}^{P_k} dP,$$

$$\left(-\frac{Q}{BhC}\right)^n \left(x - L_k\right) = P_k - P. \tag{6}$$

Подставляя значение Q из формулы (4) в формулу (6), получаем следующее выражение для закона распределения текущего давления в данной полосообразной залежи:

$$P = P_k - \frac{L_k - x}{L_k^{1/n}}\left(P_k - P_г\right)^{1/n}. \tag{7}$$

Дифференцируя P по x в формуле (7), получаем следующее выражение для текущего градиента давления в данной залежи:

$$\frac{dP}{dx} = -\frac{1}{L_k^{1/n}}\left(P_k - P_г\right)^{1/n}. \tag{8}$$

Для определения значения частичной продолжительности продвижения нефти используем известную аналитическую связь:

$$\omega = \frac{v}{m} = \frac{dx}{dt}, \tag{9}$$

где ω – средняя истинная скорость движения нефти в поровых каналах пласта; m – коэффициент пористости пласта; t – время.

Подставляя значение v из формулы (5) в формулу (9), получаем:

$$\frac{C}{mL_k^{1/n}}\left(P_k - P_г\right)^{1/n} = \frac{dx}{dt}. \tag{10}$$

Отсюда имеем:

$$dt = \frac{mL_k^{1/n}}{C\left(P_k - P_г\right)^{1/n}}dx. \tag{11}$$

Интегрируя уравнение (11) в пределах по t от нуля до t и по x от x до L_k, получаем:

$$t = \frac{mL_k^{1/n}}{C\left(P_k - P_г\right)^{1/n}}\left(L_k - x\right). \tag{12}$$

По формуле (12) вычисляется значение частичной продолжительности продвижения несжимаемой неньютоновской нефти в однородной полосообразной залежи от текущего положения x до галереи.

При $x = 0$; $t = T$ имеем:

$$T = \frac{mL_k^{(1+n)/n}}{C\left(P_k - P_г\right)^{1/m}}. \tag{13}$$

По формуле (13) определяется значение полной продолжительности продвижения нефти в однородной полосообразной залежи неньютоновской нефти от контура питания до галереи.

Во *второй задаче* фильтрация несжимаемой неньютоновской нефти происходит с плоско-радиальным простым потоком.

На рис. 2 показана схема системы «скважина–круговая залежь», на которой представлены следующие условные обозначения: P – давление; $P_с$ – динамическое забойное давление скважины; P_k – текущее давление; $R_к$ – радиус контура питания; $r_с$ – радиус скважины; r – текущий радиус-вектор; h – мощность (толщина) продуктивного пласта.

Процесс фильтрации происходит по общему нелинейному закону, в виде:

$$v = C\left(\frac{dP}{dr}\right)^{1/n}. \tag{13}$$

Площадь текущей цилиндрической поверхности фильтрации, будет:

$$F = 2\pi rh. \tag{14}$$

Используя значения v и F из формул (13) и (14), составляем следующее дифференциальное уравнение:

$$Q = vF = 2\pi hcr\left(\frac{dP}{dr}\right)^{1/n}. \tag{15}$$

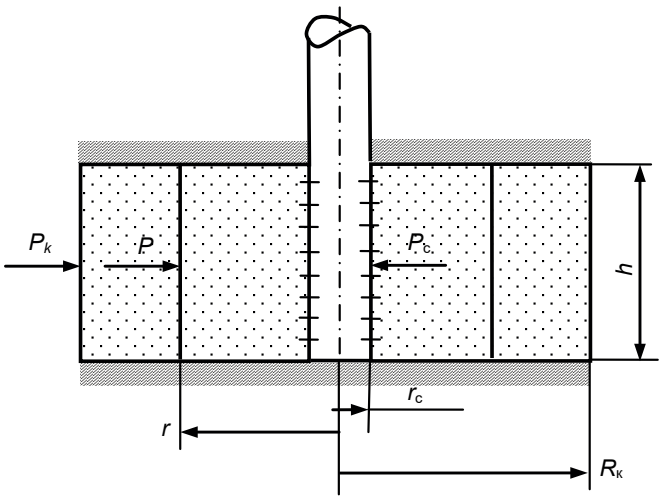

Рисунок 2. Схема системы «скважина–круговая залежь».
Figure 2. Scheme of the "well-circular reservoir" system.

Разделяя на переменные уравнение (15) и интегрируя его в пределах по P от $P_п$ до $P_с$ и по r от $R_к$ до $r_с$, выводим формулу для дебита скважины в виде:

$$Q = 2\pi hC\frac{(P_k - P_с)^{1/n}}{(R_к^{1-n} - r_с^{1-n})(1-n)}. \quad (16)$$

Текущая скорость фильтрации неньютоновской нефти:

$$v = C\frac{(P_k - P_с)^{1/n}}{(1-n)(R_к^{1-n} - r_с^{1-n})^{1/n}}\cdot\frac{1}{r}. \quad (17)$$

А теперь интегрируем дифференциальное уравнение (15) в других пределах по P от P_k до P и по r от $R_к$ до r

$$\left(\frac{Q}{2\pi hC}\right)^n \int_r^{R_к}\frac{dr}{r^n} = \int_P^{P_k} dP$$

и имеем:

$$\frac{1}{1-n}\left(\frac{Q}{2\pi hC}\right)^n = \left(R_к^{1-n} - r^{1-n}\right) = P_k - P. \quad (18)$$

Подставляя значение Q из формулы (16), получаем следующий закон распределение текущего давления P в дренажной зоне круговой однородной залежи:

$$P = P_k - \frac{(1-n)(P_k - P_с)}{(R_к^{1-n} - r_с^{1-n})^{1/n}}\left(R_к^{1-n} - r^{1-n}\right)^{1/n}. \quad (19)$$

Дифференцируя P по r в формуле (19), получаем следующее выражение для текущего градиента давления:

$$\frac{dP}{dr} = \frac{(1-n)(P_k - P_с)}{(R_к^{1-n} - r_с^{1-n})^{1/n}}\cdot\frac{1}{r^n}. \quad (20)$$

А теперь определим частичную продолжительность продвижения этой нефти от текущего положения r до скважины:

$$\frac{C}{m} = \frac{(P_k - P_с)^{1/n}}{(1-n)(R_к^{1-n} - r_с^{1-n})^{1/n}}\cdot\frac{1}{r^n} = \frac{dP}{dr}. \quad (21)$$

Разделяя на переменные дифференциальное уравнение (21) и решая его в пределах по t от нуля до t и по r от r до $r_с$, частичную продолжительность продвижения нефти получаем в виде:

$$t = \frac{m(1-n)(R_к^{1-n} - r_с^{1-n})^{1/n}}{C(P_k - P_с)^{1/n}}(r^2 - r_с^2). \quad (22)$$

.

При $r = R_к$; $t = T$ имеем:

$$T = \frac{m(1-n)(R_к^{1-n} - r_с^{1-n})^{1/n}}{C(P_k - P_с)^{1/n}}(R_к^2 - r_с^2). \quad (23)$$

По формуле (23) определяется полная продолжительность продвижения нефти от контура питания до скважины.

В *третьей задаче* фильтрация нефти происходит с полусферически-радиальным простым потоком в пласте с большой мощностью.

На рис. 3 представлена схема системы «скважина–полусферически-радиальная залежь», на которой даны следующие условные обозначения: $P_п$ – пластовое давление; $P_с$ – динамическое забойное давление скважины; P – текущее давление; $R_к$ – радиус контура питания; $r_с$ – радиус скважины; r – текущий радиус-вектор.

Нелинейный закон фильтрации для полусферического простого потока также выражается по формуле (13).

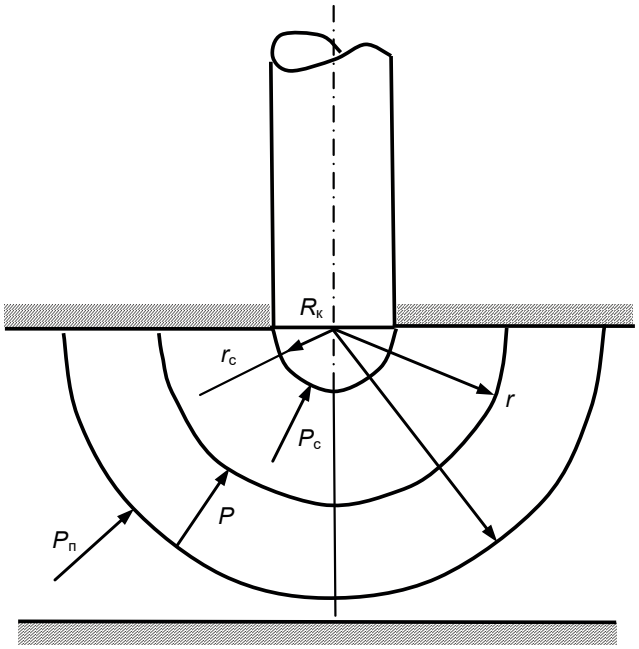

Рисунок 3. Схема системы «полусферическая залежь–скважина».
Figure 3. Scheme of the "hemispherical reservoir-well" system.

Площадь текущей полусферической поверхности фильтрации:

$$F = 2\pi r^2. \quad (24)$$

Используя значения v и F из формул (13) и (24), получаем следующее дифференциальное уравнение:

$$Q = vF = 2\pi r^2 C\left(\frac{dP}{dr}\right)^{1/n}. \quad (25)$$

Разделяя на переменные уравнение (25) и интегрируя в пределах по P от $P_п$ до $P_с$ и по r от $R_к$ до $r_с$, выводим формулы дебита нефти скважины в виде:

$$Q = 2\pi C\left(2n+1\right)^{1/n}\frac{\left(P_k - P_с\right)^{1/n}}{\left(R_к^{2n+1} - r_с^{2n+1}\right)^{1/n}}. \quad (26)$$

С учетом формул (24) и (26) получаем следующую формулу для текущей скорости фильтрации нефти в этой залежи:

$$v = C\frac{(2n+1)^{1/n}\left(P_k - P_с\right)^{1/n}}{\left(R_к^{2n+1} - r_с^{2n+1}\right)^{1/n}}\cdot\frac{1}{r^2}. \quad (27)$$

Интегрируя дифференциальное уравнение (25) в других пределах по r от $R_к$ до r и по P от $P_п$ до P:

$$\left(\frac{Q}{2\pi C}\right)^n\int_r^{R_к}\frac{dr}{r^{2n}} = \int_P^{P_k} dP, \quad (28)$$

получаем:

$$\frac{Q}{2\pi C(2n+1)^{1/n}}\left(R_к^{2n+1} - r^{2n+1}\right)^{1/n} = \left(P_k - P\right)^{1/n}. \quad (29)$$

Подставляя значение Q из формулы (26) в формуле (29), получаем следующий закон распределения текущего давления в дренажной зоне залежи:

$$P = P_k - \frac{P_k - P_с}{R_к^{2n+1} - r_с^{2n+1}}\left(R_к^{2n+1} - r^{2n+1}\right). \quad (30)$$

Дифференцируя P по r в формуле (30), получаем формулу текущего градиента давления:

$$\frac{dP}{dr} = \frac{\left(P_k - P_с\right)(2n+1)}{R_к^{2n+1} - r_с^{2n+1}}\cdot r^{2n}. \quad (31)$$

Частичная продолжительность продвижения нефти в пласте от текущего положения r до скважины найдена в виде:

$$t = \frac{m\left(R_к^{2n+1} - r_с^{2n+1}\right)^{1/n}}{3C(2n+1)^{1/n}\left(P_k - P_с\right)^{1/n}}\left(R_к^3 - r^3\right). \quad (32)$$

При $r = 0$; $t = T$ имеем:

$$T = \frac{m\left(R_к^{n-1} - r_с^{n-1}\right)^{1/n}}{3C(2n+1)^{1/n}\left(P_k - P_с\right)^{1/n}}R_к^2. \quad (33)$$

По формуле (33) определяется полная продолжительность продвижения нефти в дренажной зоне полусферически-радиальной залежи от контура питания до скважины.

Выводы и рекомендации

1. Решены три стационарно-гидростатические задачи, в которых процессы фильтрации подчиняются только общему нелинейному закону. В задачах рассматриваются простые потоки фильтрации: плоско-параллельный, плоско-радиальный и полусферически-радиальный.

2. Во всех задачах выведены все основные расчетные формулы, характеризующие процессы фильтрации: дебиты, скорости фильтрации, градиент давления и т. д.

3. Эти формулы можно использовать при решении различных практических задач разработки залежей неньютоновской нефти, а также при составлении проекта разработки нового разведанного месторождения.

4. Анализируя выведенные формулы, можно выявить специфические особенности разработки подобных залежей, разрабатывать и внедрять необходимые мероприятия по предупреждению и устранению нежелательных явлений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Novruzova S. H., Mustafayev S. D. Sıxılmayan qeyri-nyuton neftin bircins məsaməli mühitdə düzxətli kəhrizə yastı-paralel sadə süzülmə axını // ЭКО-ЕНЕРGETİKA. 2019. № 2. Səh. 36–38.
2. Mustafayev S. D., İsmayılov Q. S., Sadıqova N. S. Qeyri-bircins məsaməli mühitdə qeyri-nyuton mayenin yastı-radial stasionar süzülmə axını // Azərbaycan Elmi Beynəlxalq nəzəri jurnal. 2012. № 8-9. Səh. 91–96.
3. Мустафаев С. Д., Асадов А. Ш., Мустафаев Н. С., Садыгова Н. С. Несмешивающееся вытеснение одной несжимаемой неньютоновской жидкости другой в однородной пористой среде // Azərbaycan Elmi Beynəlxalq nəzəri jurnal. 2010. № 7-8. Səh. 42–45.
4. Mustafayev S. D., Şıxıyev M. N., Kazımov F. K., Hüseynova R. K., Mustafayev N. S. Sıxılmayan qeyri-nyuton mayelərin bircins məsaməli mühitdə yastı-radial süzülmə axınları // ANT. 2009. № 11. Səh. 35–37.
5. Пирвердян А. М. Нефтяная подземная гидравлика. Баку: Азнефтеиздат, 1956. 332 с.
6. Кристеа Н. Подземная гидравлика. М.: Гостоптехиздат, 1961. Т. I. 343 с.
7. Мустафаев С. Д., Кязимов Ф. К., Гусейнова Р. К. Полусферические стационарные движения несжимаемых нефтей в однородном пласте по различным законам фильтрации // Вектор ГеоНаук, 2020. Т. 3, № 2. С. 24–29. https://doi.org/10.24411/2619-0761-2020-10015
8. Мустафаев С. Д., Гасымова С. А. Плоскопараллельная стационарная фильтрация несжимаемой вязко-пластичной нефти с проявлением параллельного градиента давления // Технологии нефти и газа. 2018. № 2. С. 24–27.
9. Гаджиева Л. С. Сферически-радиальное движение вязко-пластичной несжимаемой нефти в однородном пласте по линейному закону фильтрации в водонапорном режиме // ЭКО-ЭНЕРГЕТИКА. 2019. № 3. С. 77–81.
10. Mustafayev S. D., Kazımov F. K., Xankişiyeva T. İ. Bircins zolaqvari yataqda sıxılmayan özlü-plastik neftin düzxətli kəhrizə su ilə sıxışdırılması // Вектор ГеоНаук. 2018. Т. 1, № 4. С. 28–31.
11. Мустафаев С. Д., Байрамов Ф. Г. Фильтрация несжимаемой вязко-пластичной нефти со свободной поверхностью в однородном пласте к прямолинейной галерее // ЭКО-ЭНЕРГЕТИКА. 2019. № 1. С. 60–63.

12. Mustafayev S. D., Safarov E. G., Aslanov D. N. Method of reducing of surface phenomena negative influence of oil recovery coefficient at expansion stage of layers // Engineering Computations. 2017. Vol. 31, № 8(3). P. 2808–2817.
13. Асланов Дж. Н., Мустафаев С. Д., Ибрагимов В. А., Алиева Р. Т. Криволинейное радиальное течение сжимаемой вязко-пластичной нефти со свободной текучестью в однородном пласте // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. «Машиностроение». 2019. № 3. С. 54–61.
14. Пыхачев Г. Б., Исаев Р. Г. Подземная гидравлика. М.: Недра, 1973. 360 с.
15. Алиева М. Г., Керимов В. М. Стационарные движения несжимаемых нефтей в однородной круговой залежи по различным законам фильтрации // Actual trends of modern scientific research: Abstracts of VII International Scientific and Practical Conference, February 14–16, Munich, Germany, 2021. P. 275–283.

Статья поступила в редакцию 5 февраля 2021 года

УДК 622.654.12 https://doi.org/10.21440/2307-2091-2021-1-39-45

Simple stationary filtering flows of incompressible non-newtonian oil in a homogeneous formation according to a general nonlinear law

Maral Gasan kyzy ALIEVA[1]
Niyaz Gadym ogly VALIEV[2]

[1]Azerbaijan State University of Oil and Industry, Baku, Azerbaijan
[2]Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Abstract

Three stationary hydrodynamic theoretical problems are solved, in which filtrations obey only the General nonlinear law. Simple flows occur in tasks: plane-parallel, plane-radial, and hemispherical-radial. All derived formulas – oil flow rate, filtration rate, pressure gradient, etc. – should be used to solve various practical problems of the development of these deposits and even when drawing up a project for the development of such deposits.

It should be noted that a plane-parallel simple filtration flow of oil originates from a strip-like reservoir to a straight gallery. In addition, such a simple filtration fluid flow also occurs when the oil field under development has several parallel rectilinear rows of production production wells and, in some cases, there may be rows of injection water wells in the reservoir. In oil-bearing areas between parallel adjacent rows, oil filtration is also plane-parallel. Hence, the practical significance of solving the first problem of a plane-parallel oil flow in this scientific article becomes clear. Planar-radial simple filtration flow of oil originates from a circular horizontal formation to a central production well. In addition, such a simple filtration fluid flow also occurs when a strip-like oil field being developed has several (usually three or four) parallel straight rows of production production wells. In the drainage zones of these wells, a simple flat-radial filtration flow also occurs. From the foregoing, the practical significance of a radial plane oil flow becomes clear. Hemispherical – a radial simple filtration flow of oil originates from a hemispherical reservoir to a central well, barely penetrated by the reservoir by its hemispherical concave bottom. By analyzing these calculation formulas, you can identify the specific features of the development of deposits, develop and implement measures to eliminate undesirable phenomena.

Keywords: filtration flows, non-newtonian oil, nonlinear law, incompressible oil, homogeneous reservoir, flow rate, filtration rate, duration of advance, differential equation.

REFERENCES

1. Novruzova S. H., Mustafayev S. D. 2019, Sıxılmayan qeyri-nyuton neftin bircins məsaməli mühitdə düzxətli kəhrizə yastı-paralel sadə süzülmə axını, no. 2, səh. 36–38.
2. Mustafayev S. D., İsmayılov Q. S., Sadıqova N. S. 2012, Qeyri-bircins məsaməli mühitdə qeyri-nyuton mayenin yastı-radial stasionar süzülmə axını. *Azərbaycan Elmi Beynəlxalq nəzəri jurnal*, no. 8-9, səh. 91–96.
3. Mustafayev S. D., Asadov A. Sh., Mustafaev N. S., Sadigova N. S. 2010, *Nesmeshivayushcheyesya vytesneniye odnoy neszhimayemoy nen'yutonovskoy zhidkosti drugoy v odnorodnoy poristoy srede* [Immiscible displacement of one incompressible non-Newtonian fluid by another in a homogeneous porous medium]. *Azərbaycan Elmi Beynəlxalq nəzəri jurnal*, no. 7-8, səh. 42–45.
4. Mustafayev S. D., Şıxıyev M. N., Kazımov F. K., Hüseynova R. K., Mustafayev N. S. 2009, Sıxılmayan qeyri-nyuton mayelərin bircins məsaməli mühitdə yastı-radial süzülmə axınlar. *ANT*, no. 11, səh. 35–37.
5. Pirverdyan A. M. 1956, *Neftyanaya podzemnaya gidravlika* [Oil underground hydraulics]. Baku, 332 p.
6. Kristea N. 1961, *Podzemnaya gidravlika* [Underground hydraulics]. Moscow, vol. I, 343 p.
7. Mustafayev S. D., Kyazimov F.K., Guseinova R.K. 2020, Hemispherical stationary movements of incompressible oils in a homogeneous reservoir according to various filtration laws. *Vektor GeoNauk* [Vector of GeoSciences], vol. 3, no. 2, pp. 24–29. (*In Russ.*) https://doi.org/10.24411/2619-0761-2020-10015
8. Mustafayev S. D., Gasymova S.A. 2018, Plane-parallel stationary filtration of incompressible viscous-plastic oil with the manifestation of a parallel pressure gradient. *Tekhnologii nefti i gaza* [Oil and gas technologies], no. 2, pp. 24–27. (*In Russ.*)
9. Gadzhieva L. S. 2019, *Sfericheski-radial'noye dvizheniye vyazko-plastichnoy neszhimayemoy nefti v odnorodnom plaste po li-neynomu zakonu fil'tratsii v vodonapornom rezhime* [Spherical-radial motion of viscous-plastic incompressible oil in a homogeneous reservoir according to the linear law of filtration in a water-driven regime], no. 3, pp. 77–81.
10. Mustafayev S. D., Kazımov F. K., Xankişiyeva T. İ. 2018, Bircins zolaqvari yataqda sıxılmayan özlü-plastik neftin düzxətli kəhrizə su ilə sıxışdırılması. *Vektor GeoNauk* [Vector of GeoSciences], vol. 1, no. 4, pp. 28–31.
11. Mustafayev S. D., Bayramov F. G. 2019, *Fil'tratsiya neszhimayemoy vyazko-plastichnoy nefti so svobodnoy poverkhnost'yu v odnorodnom plaste k pryamolineynoy galereye* [Filtration of incompressible viscous-plastic oil with a free surface in a homogeneous reservoir to a straight line mine gallery], no. 1, pp. 60–63.
12. Mustafayev S. D., Safarov E. G., Aslanov D. N. 2017, Method of reducing of surface phenomena negative influence of oil recovery coefficient at expansion stage of layers. *Engineering Computations*, vol. 31, no. 8(3), pp. 2808–2817.

✉maral.aliyeva.5252@mail.ru
**niyaz.valiev@m.ursmu.ru
https://orcid.org/0000-0002-5556-2217

13. Aslanov J. N., Mustafayev S. D., Ibragimov V. A., Alieva R. T. 2019, Curvilinear radial flow of compressible viscous-plastic oil with free fluidity in a homogeneous reservoir. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana* [Herald of the Bauman Moscow State Technical University]. Series Mechanical Engineering, no. 3, pp. 54–61. (*In Russ.*)
14. Pykhachev G. B., Isayev R. G. 1973, *Podzemnaya gidravlika* [Underground hydraulics]. Moscow, 360 p.
15. Aliyeva M. G., Kerimov V. M. 2021, *Statsionarnyye dvizheniya neszhimayemykh neftey v odnorodnoy krugovoy zalezhi po razlichnym zakonam fil'tratsii* [Steady movements of incompressible oils in a homogeneous circular reservoir according to various filtration laws]. Actual trends of modern scientific research: Abstracts of VII International Scientific and Practical Conference, February 14–16, Munich, Germany, pp. 275–283.

The article was received on February 5, 2021