

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
ПИИИ (Russia) = 0.126
ESJI (KZ) = 8.997
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

SOI: [1.1/TAS](#) DOI: [10.15863/TAS](#)

International Scientific Journal Theoretical & Applied Science

p-ISSN: 2308-4944 (print) e-ISSN: 2409-0085 (online)

Year: 2020 Issue: 10 Volume: 90

Published: 10.10.2020 <http://T-Science.org>

QR – Issue



QR – Article



Jaxon Akilov

Samarkand State Institute of Architecture and Civil Engineering
Professor of the Department of Higher Mathematics,
jaxon.akilov@mail.ru

Mamasoli Sadikovich Jhabbarov

Samarkand State Institute of Architecture and Civil Engineering
Associate Professor of the Department of Higher Mathematics,
m.s.jabbarov1954@mail.ru

Yuldosh Shermanovich Gaybulov

Samarkand State Institute of Architecture and Civil Engineering
Scientific researcher of the Department of Higher Mathematics,
ygaybulov@mail.ru

STRESS MODELLING ON THE PLUNGER AT OPERATION OF THE HOLES MINING N-NEWTON OIL

Abstract: In paper mathematical modelling of pressure on a plunger is considered at operation of oil wells with deep pumps. By numerical experiments study influence of viscoelastic properties, viscosities and an oil denseness on a total pressure variation on a plunger.

Key words: pressure on a plunger, a viscoelastic and viscous liquid, a pre-image and a Laplace transform.

Language: Russian

Citation: Akilov, J., Jhabbarov, M. S., & Gaybulov, Y. S. (2020). Stress modelling on the plunger at operation of the holes mining n-Newton oil. *ISJ Theoretical & Applied Science*, 10 (90), 118-123.

Soi: <http://s-o-i.org/1.1/TAS-10-90-24> **Doi:**  <https://dx.doi.org/10.15863/TAS.2020.10.90.24>

Scopus ASCC: 2200.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДАВЛЕНИЯ НА ПЛУНЖЕР ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СКВАЖИН, ДОБЫВАЮЩИХ НЕНЬЮТОНОВСКИЕ НЕФТИ

Аннотация: В статье рассматривается математическое моделирование давления на плунжер при эксплуатации нефтяных скважин с глубинными насосами. Численными экспериментами изучено влияние вязкоупругих свойств, нефти и плотности нефти на изменение полного давления на плунжер.

Ключевые слова: давление на плунжер, вязкоупругая и вязкая жидкость, оригинал и изображение.

Введение

Эксплуатация нефтяных скважин штанговыми глубинными насосами является самым распространенным способом механизированной добычи нефти. При работе глубинного насоса плунжер испытывает давление, создаваемое силой тяжести столба жидкости в подъемных трубах. В настоящей работе предлагается теоретический способ определения полного давления на плунжер с учетом

вязкоупругих свойств добываемой нефти [1-3]. Рассмотрено влияние релаксационных свойств жидкости на изменение давления на плунжер.

Постановка задачи.

Рассмотрим задачу определения полного давления на плунжер при ходе его вверх в подъемной трубе, при эксплуатации нефтяных скважин плунжерным лифтом. Для математического моделирования процесса

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 0.126
ESJI (KZ) = 8.997
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

принимая общепринятые допущения относительно движения жидкости (нефти) в кольцевом пространстве между двумя цилиндрическими трубами, одна из которых движется относительно другой. Схема распределения скоростей жидкости в кольцевом пространстве между колонной труб и штанг относительно неподвижной системы показана на рис. 1.

Изменение давления на плунжер обусловлено инерцией жидкости, а полное давление на плунжер $p(t)$ будет [4]

$$p(t) = \Delta p(t) + (L - h)\rho g + p_0, \quad (1)$$

где t – время; $\Delta p(t)$ – потери давления при нестационарном движении жидкости в подъемной трубе кольцевого сечения; p_0 – давление на устье; L – высота поднимаемого столба жидкости; h – глубина погружения глубинного насоса; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения. Следуя работе [4], скорость движения плунжера $v_p(t)$ в период одного цикла T его движения принимается в виде

$$v_p(t) = \frac{24v_0}{\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n}{n^3} \sin \frac{2\pi n t}{T}, \quad (2)$$

где v_0 – средняя скорость движения точки подвески штанг. Графики зависимости от времени скорости и ускорения плунжера для $T = 20$ с, $v_0 = 0.60$ м/с приведен на рис. 2.

Нефти некоторых месторождений Узбекистана (Кошгар, Лялмикар, Амударья, Кокайти и др.) относятся к неньютоновским средам. Структурно-механические свойства этих нефтей, в основном, обусловлено высоким содержанием асфальтено-смолистых и парафинистых веществ. К настоящему времени накоплен достаточно обширный экспериментальный материал по исследованию релаксационных свойств таких нефтей [1-3, 5-7]. Для описания неравновесного и релаксационного поведения этих нефтей наиболее часто используют феноменологические релаксационные модели. В данной работе реологическое уравнение состояния нефти принимается в виде

$$\left(1 + \lambda \frac{\partial}{\partial t}\right) \tau(r, t) = \mu \frac{\partial v}{\partial r}, \quad (3)$$

где r – радиальная координата; v – скорость жидкости; μ – динамическая вязкость; τ – касательное напряжение; λ – время релаксации. Уравнение (3) при $\lambda = 0$ выражает закон вязкого трения Ньютона, а при $\lambda > 0$ – модель вязкоупругой среды Максвелла.

С учетом уравнения движения

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\Delta p}{L} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\tau),$$

получим дифференциальное уравнение

$$\rho \left(1 + \lambda \frac{\partial}{\partial t}\right) \frac{\partial v}{\partial t} = \mu \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial v}{\partial r}\right) + \left(1 + \lambda \frac{\partial}{\partial t}\right) \frac{\Delta p}{L}, \quad (r_2 < r < R), \quad (4)$$

где r_2 – радиус штанга, R – радиус подъемной трубы.

Для определения потери давления в подъемной трубе $\Delta p(t)$ при нестационарном ламинарном движении жидкости используется уравнение баланса

$$Q = \pi(r_1^2 - r_2^2)v_p(t) = 2\pi \int_{r_2}^R rv(r, t) dr, \quad (5)$$

где r_1 – радиус плунжера, Q – расход жидкости. Начальные и граничные условия для уравнения (4) имеет вид

$$v(r, 0) = 0, \quad \frac{\partial v(r, 0)}{\partial t} = 0, \quad (r_2 \leq r \leq R); \quad (6)$$

$$v(r_2, t) = v_p(t), \quad v(R, t) = 0, \quad (t > 0). \quad (7)$$

В практике эксплуатации нефтяных скважин глубинными насосами в большинстве случаев радиальный зазор между трубой и колонной штанг можно рассматривать как плоскую трубу [8-9]. Для такого случая уравнение (4), соотношение (5) и краевые условия (6) - (7) можно написать в следующем виде:

$$\rho \left(1 + \lambda \frac{\partial}{\partial t}\right) \frac{\partial v}{\partial t} = \mu \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \left(1 + \lambda \frac{\partial}{\partial t}\right) q(t), \quad (8)$$

$$Q = \pi(r_1^2 - r_2^2)v_p(t) = 2\pi \int_0^l (y + r_2)v(y, t) dy, \quad (9)$$

$$v(y, 0) = 0, \quad v(0, t) = v_0(t), \quad v(l, t) = 0, \quad (10)$$

где $l = R - r_2$, $q(t) = \Delta p(t) / L$. Уравнение (8) и соотношения (9), (10) выражают математическую модель рассматриваемого процесса.

Решение задачи. Отметим, что данная задача для случая вязкой жидкости ($\lambda = 0$), приближенным методом Слезкина-Тарга решена в [4], точное решение дано в работе [10]. Рассмотрим решение задачи для вязкоупругой жидкости (нефти).

Введем следующие безразмерные величины:

$$t' = \frac{\mu}{\rho l^2} t, \quad x = \frac{y}{l}, \quad T' = \frac{\mu}{\rho l^2} T,$$

$$\lambda' = \frac{\mu}{\rho l^2} \lambda, \quad \bar{v} = \frac{v}{v_0}, \quad \bar{v}_p = \frac{v_p}{v_0}, \quad \bar{q} = \frac{l^2}{\mu v_0} q. \quad (11)$$

С учетом (11) в безразмерных переменных получим уравнение

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971
 ISI (Dubai, UAE) = 0.829
 GIF (Australia) = 0.564
 JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
 ПИИЦ (Russia) = 0.126
 ESJI (KZ) = 8.997
 SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
 PIF (India) = 1.940
 IBI (India) = 4.260
 OAJI (USA) = 0.350

$$\left(1 + \lambda' \frac{\partial}{\partial t'}\right) \frac{\partial \bar{v}}{\partial t'} = \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \left(1 + \lambda' \frac{\partial}{\partial t'}\right) \bar{q}(t'), \quad (12)$$

с начальными и граничными условиями

$$\bar{v}(x, 0) = 0, \quad \bar{v}'_t(x, 0) = 0, \quad (0 \leq x \leq l); \quad (13)$$

$$\bar{v}(0, t') = \bar{v}_p(t'), \quad \bar{v}(l, t') = 0. \quad (14)$$

Соотношение (9) в безразмерных переменных принимает следующий вид:

$$\frac{r_1^2 - r_2^2}{2l^2} \bar{v}_p(t') = \int_0^1 \left(x + \frac{r_2}{l}\right) \bar{v}(x, t') dx. \quad (15)$$

Для решения уравнения (12) с краевыми условиями (13)-(14) применим интегральное преобразование Лапласа [11]:

$$\tilde{v}(x, s) = \int_0^{+\infty} e^{-st'} \bar{v}(x, t') dt',$$

$$\tilde{v}_p(s) = \int_0^{+\infty} e^{-st'} \bar{v}_p(t') dt', \quad \tilde{q}(s) = \int_0^{+\infty} e^{-st'} \bar{q}(t') dt'$$

Тогда получим дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 \tilde{v}}{dx^2} - s(1 + \lambda' s) \tilde{v}(x, s) = -(1 + \lambda' s) \tilde{q}(s),$$

с граничными условиями

$$\tilde{v}(0, s) = \tilde{v}_p(s), \quad \tilde{v}(l, s) = 0.$$

Решение его имеет вид

$$\tilde{v}(x, s) = \tilde{v}_p(s) \frac{shw(1-x)}{shw} + \frac{\tilde{q}(s)}{s} \left(1 - \frac{shw(1-x)}{shw} - \frac{shwx}{shw}\right), \quad (16)$$

где $w = \sqrt{s(1 + \lambda' s)}$. Подставляя (16) в изображение соотношения (15):

$$\frac{r_1^2 - r_2^2}{2l^2} \tilde{v}_p(s) = \int_0^1 \left(x + \frac{r_2}{l}\right) \tilde{v}(x, s) dx,$$

и вычисляя интегралы, для $\tilde{q}(s)$ получим формулу

$$\tilde{q}(s) = \frac{l}{l + 2r_2} \cdot s \tilde{v}_p(s) \cdot f(w), \quad (17)$$

где

$$f(w) = \frac{\varphi(w)}{\psi(w)}, \quad \psi(w) = 1 - chw + \frac{w}{2} shw,$$

$$\varphi(w) = 1 - \frac{shw}{w} + \frac{r_2}{l} (1 - chw) + \frac{r_1^2 - r_2^2}{2l^2} w shw.$$

С целью перехода в оригинал в (17), разложим функцию $f(w)$ в ряд, используя теорему Коши о разложении мероморфной функции на простые дроби [12]:

$$f(w) = \frac{4f_0}{w^2} + 4 \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{1}{w^2 + a_k^2} + \frac{w_k \varphi_k}{\psi_k (w^2 + w_k^2)} \right] =$$

$$= \frac{4f_0}{s(1 + \lambda' s)} + 4 \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{1}{s(1 + \lambda' s) + a_k^2} + \frac{w_k \varphi_k}{\psi_k (s(1 + \lambda' s) + w_k^2)} \right],$$

где $f_0 = \frac{3}{l^2} (r_1^2 - r_2^2 - r_2 l) - 1$; $a_k = 2k\pi$;

$$\varphi_k = 1 - \frac{\sin w_k}{w_k} + \frac{r_2}{l} (1 - \cos w_k) + \frac{r_1^2 - r_2^2}{2l^2} w_k \sin w_k;$$

$$\psi_k = w_k \cos w_k - \sin w_k.$$

$w_k = 2z_k$, ($k = 1, 2, \dots$) - положительные корни уравнения $\psi(w) = 0$; z_k - положительные корни уравнения $tgz = z$.

Нетрудно показать, что оригинал $F(t')$, соответствующий к изображению $f(w)$ имеет вид

$$F(t') = 4f_0 (1 - e^{-2at'}) + 8e^{-at'} \sum_{k=1}^{\infty} \left[\frac{\sin a\beta_k t'}{\beta_k} + \frac{w_k \varphi_k}{\psi_k} \cdot \frac{\sin ag_k t'}{g_k} \right] \quad (18)$$

где

$$a = \frac{1}{2\lambda'}, \quad \beta_k = \sqrt{4\lambda' a_k^2 - 1}, \quad g_k = \sqrt{4\lambda' w_k^2 - 1}.$$

Используя теорему о композиции операционного исчисления, из (17) найдем $\bar{q}(t')$:

$$\bar{q}(t') = \frac{4l}{l + 2r_2} \cdot \left\{ f_0 \bar{v}_p(t') - 4f_0 \int_0^{t'} e^{-2az} \bar{v}_p(t'-z) dz + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \int_0^{t'} \left(\frac{\sin a\beta_k z}{\beta_k} + \frac{\varphi_k w_k}{\psi_k} \frac{\sin ag_k z}{g_k} \right) e^{-az} \bar{v}_p(t'-z) dz \right\}. \quad (19)$$

где

$$\bar{v}_p(t') = \frac{24}{\pi^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n}{n^3} \sin \frac{2\pi n t'}{T'},$$

$$\bar{v}'_p(t') = \frac{d\bar{v}_p(t')}{dt'} = \frac{48}{\pi^2 T'} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - (-1)^n}{n^2} \cos \frac{2\pi n t'}{T'}.$$

Формула (19), с учетом соотношения

$$\Delta p(t) = \frac{\mu v_c L}{l^2} \bar{q}(t'),$$

позволяет, при известной скорости движения плунжера найти полное давление на плунжер.

Результаты расчетов и выводы.

С помощью полученных формул проведены численные эксперименты по расчету полного

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
РИИЦ (Russia) = 0.126
ESJI (KZ) = 8.997
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

давления и скорости жидкости, используя следующие исходные данные:

$$L = 1000 \text{ m}, h = 100 \text{ m}, v_0 = 0.60 \text{ m/s},$$

$$p_0 = 10^5 \text{ Pa}, T = 20 \text{ s}, R = 0,030 \text{ m}, r_1 = 0.02988 \text{ m},$$

$$r_2 = 0.010 \text{ m}, \lambda = 0.5; 1 \text{ s}.$$

На рис. 3 представлен графики зависимости от времени полного давления на плунжер при его подъеме вверх. Графики соответствуют следующим значениям времени релаксации: 1 - $\lambda = 0.5 \text{ s}$; 2 - $\lambda = 1 \text{ s}$; 3 - $\lambda = 0$ (ньютоновская вязкая жидкость).

В расчетах, для значений плотности и вязкости нефти использованы данные, приведенные в [9, 10] для легкой нефти месторождения Варик и тяжелой нефти месторождения Коштар Узбекистана, при температуре 20^0 :

$$\text{a. } \rho = 750 \text{ kg/m}^3; \mu = 0.047 \text{ Pa}\cdot\text{s};$$

$$\text{b. } \rho = 930 \text{ kg/m}^3; \mu = 5.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}.$$

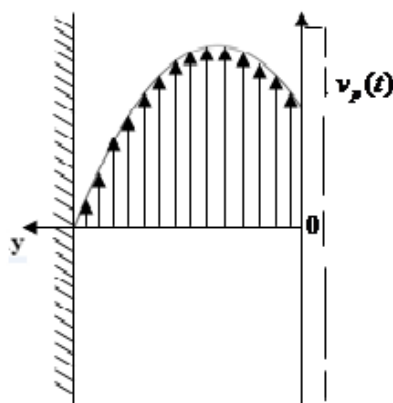


Рис. 1. Распределение скоростей жидкости в кольцевом пространстве между колонной труб и штанг относительно неподвижной системы.

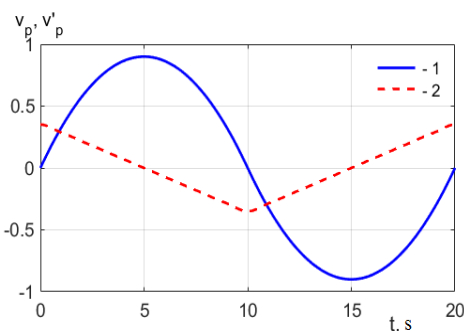


Рис. 2. Графики зависимости от времени скорости и ускорения плунжера. 1 - $v_p(t)$; 2 - $v_p''(t)$.

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971	SIS (USA) = 0.912	ICV (Poland) = 6.630
ISI (Dubai, UAE) = 0.829	ПИИЦ (Russia) = 0.126	PIF (India) = 1.940
GIF (Australia) = 0.564	ESJI (KZ) = 8.997	IBI (India) = 4.260
JIF = 1.500	SJIF (Morocco) = 5.667	OAJI (USA) = 0.350

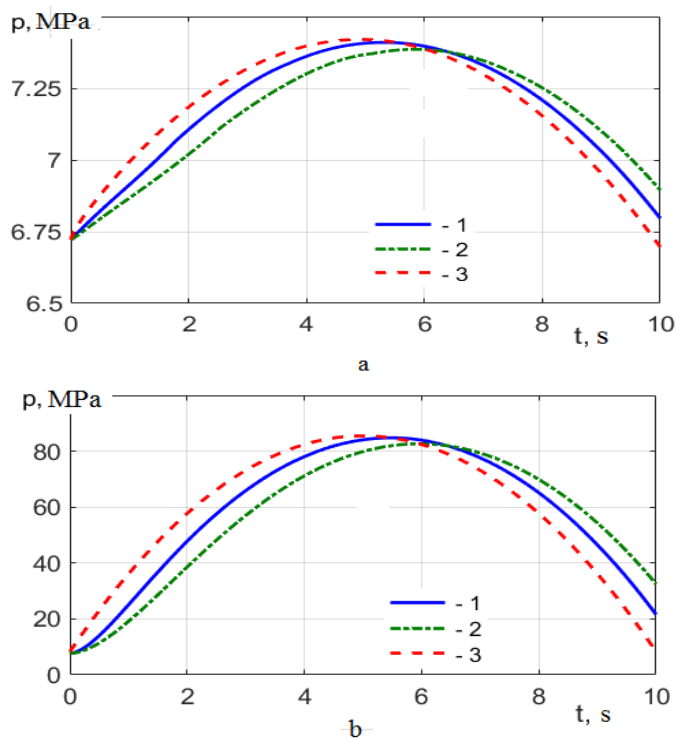


Рис. 3. Графики зависимости от времени полного давления на плунжер при его подъеме для: а - легкой нефти (месторождение Варик), б - тяжелой нефти (месторождение Коштар) при температуре 20° .

1 - $\lambda = 0.5$ s; 2 - $\lambda = 1$ s; 3 - $\lambda = 0$. а. $\rho = 750$ kg/m³; $\mu = 0.047$ Pa·s; б. $\rho = 930$ kg/m³; $\mu = 5.2$ Pa·s.

Как следует из рис. 3, в начале хода плунжера вверх давление повышается и по мере его движения давление уменьшается. Повышение давления обусловлено влиянием инерционных сил, возникающих в системе штанга-труба-жидкость в процессе работе глубинного насоса. Вязкоупругие свойства нефти в процессе разгона приводит к отставанию значений полного давления относительно вязкой жидкости, а при замедлении подъема и в момент торможения спуска – наоборот, к опережению. С усилением вязкоупругих свойств разница между профилями давления вязкой и вязкоупругой жидкости возрастает, максимум давления смещается вправо по оси времени (рис. 3,а).

Для тяжелой нефти Коштар (рис. 3,б), где вязкость более сто раз больше, чем вязкость легкой нефти Варик, полное давление возрастает больше десяти раз. Вид профилей давления сохраняется. Характер влияния вязкоупругих свойств также сохраняется, но степень его влияния возрастает. Это особенно заметно в начале и конце процесса подъема плунжера.

Выводы.

На основе приведенных выше рассуждений можно заключить, что в расчетах полного давления на плунжер, при эксплуатации нефтяных скважин, особенно, продуцирующих тяжелые нефти, необходимо учитывать вязкоупругие свойства нефти.

References:

1. Akilov, Zh. (1982). *Nestatsionarnyye dvizheniya vyazkoupругikh zhidkostey* (p.104). Tashkent: Fan.
2. Akilov, Zh. & An, V. V. (1974). *Uprugo-vyazko-plastichnyye svoystva neftey nekotorykh mestorozhdeniy Uzbekistan. Geologiya i razrabotka neftyanykh mestorozhdeniy Sredney Azii. Moskva: VNIIOENG.* pp.52-56.
3. Akilov, Zh., Irmatov, Ye. K., & Khudzhayerov, B., & Mamatkulov, M. (1977). *Analiz vliyaniya*

Impact Factor:

ISRA (India) = 4.971
ISI (Dubai, UAE) = 0.829
GIF (Australia) = 0.564
JIF = 1.500

SIS (USA) = 0.912
PIHII (Russia) = 0.126
ESJI (KZ) = 8.997
SJIF (Morocco) = 5.667

ICV (Poland) = 6.630
PIF (India) = 1.940
IBI (India) = 4.260
OAJI (USA) = 0.350

- tehnologicheskikh parametrov na rabotu glubinnykh nasosnykh skvazhin na dobychu n'yu-yorkskoy i n'yutonskoy nefti. «*Geologiya i razrabotka neftyanykh mestorozhdeniy Sredney Azii*». *Trudy SredAzNIPIneft. Vyp.4, Groznyy*. pp.63-69.
- Mirzadzhanzade, A. Kh., et al. (1968). *Teoriya i praktika primeneniya glubinnykh nasosov s gidravlicheskim zatvorom* (p.158). Moscow: Nedra.
 - Ametov, K. M., Baydukov, Yu. N., Ruzin, L. M., & Spiridonov, Yu. A. (1985). *Dobycha tyazheliks i vysokovyazkis neftey* (p.205). Moscow: Nedra.
 - Mirzadzhanzade, A. Kh., Khasanov, R. N., & Bakhtizin, R. N. (1999). *Etyudy o modelirovanii slozhnykh sistem neftedobychi. Nelineynost, neravnovesnost, neodnorodnost*. (p.464). Ufa: Gilem.
 - Khudzhayorov, B. Kh. (2000). *Reologicheskiye svoystva smesey*. (p.216). Samarkand.
 - Gurbanov, R. S., & Kasimov, A. F. (1962). Nestatsionnoye dvizheniye zhidkosti v zazore meydu plunzherom i tsilindrom glubinnogo nosa. *DAN Azerb. SSR. T. 18. № 7*, pp.21-26.
 - Kasimov, A. F. (1962). Rassmotreniye radial'nogo zazora kak ploskoy trubyy. - *Izv. AN Azerb. SSR, № 1*.
 - Akilov, Zh., Jabbarov, M. S., & Mardonov, B. A. (2020). Matematicheskoye modelirovaniye davleniya na plunzher pri ekspluatatsii neftyanykh skvazhin s glubinnymi nasosami. *Problemy arkhitektury i stroitel'stva (nauchno-tekhnicheskiiy zhurnal), № 2*, Samarkand, pp.152-154.
 - Ditkin, V. A., & Prudnikov, A. P. (1975). *Operatsionnoye ischisleniye*. (p.256). Moscow: Nauka.
 - Lavrent'yev, M. A., & Shabat, B. V. (1987). *Metody teorii slozhnogo peremennogo funktsii* (p.688). Moscow: Nauka.