

УДК 622.323(574); <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2022-5.07>  
<https://orcid.org/0000-0001-7331-1633>  
<https://orcid.org/0000-0002-0182-4330>  
<https://orcid.org/0000-0002-4857-8720>  
<https://orcid.org/0000-0002-9263-3010>  
<https://orcid.org/0000-0003-0766-4961>

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫТЕСНЕНИЯ ВЫСОКОСМОЛИСТЫХ НЕФТЕЙ ПОЛИМЕРНЫМИ РАСТВОРАМИ



**Г.Ж. МОЛДАБАЕВА<sup>1</sup>**,  
доктор технических наук,  
профессор,  
[g.moldabayeva@satbayev.university](mailto:g.moldabayeva@satbayev.university)



**А.Х. СЫЗДЫКОВ<sup>1</sup>**,  
Ph.D, профессор,  
[a.syzdykov@satbayev.university](mailto:a.syzdykov@satbayev.university)



**А.А. ЗАКИРОВ<sup>2</sup>**,  
доктор технических наук,  
профессор,  
[zakirov\\_azamjon@mail.ru](mailto:zakirov_azamjon@mail.ru)



**А.Х. КАРШИЕВ<sup>2</sup>**,  
доктор технических наук,  
[suyunov95ramiz@gmail.com](mailto:suyunov95ramiz@gmail.com)



**С.Ж. АБИЛЕВА<sup>1</sup>**,  
магистр технических  
наук, докторант PhD,  
[saulezh007@gmail.com](mailto:saulezh007@gmail.com)



**Л.З. ИГАМБЕРДИЕВА<sup>3</sup>**,  
PhD по техническим наукам,  
[lobar6266@gmail.com](mailto:lobar6266@gmail.com)

<sup>1</sup>SATBAYEV UNIVERSITY,  
Республика Казахстан, 050013, г. Алматы, ул. Сатпаева, 22-а

<sup>2</sup>ТАШКЕНТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМ. ИСЛАМА КАРИМОВА,  
Республика Узбекистан, 100095, г. Ташкент, ул. Университетская, 2-а

<sup>3</sup>АО «O'ZLITINEFTGAZ»,  
Республика Узбекистан, 100095, г. Ташкент, ул. Т. Шевченко, 2

Приведены результаты экспериментальных исследований по изучению фильтрационных свойств нефтей месторождений с высоким содержанием асфальтено-смолистых веществ. Экспериментальными исследованиями процесса фильтрации месторождений с высоким содержанием асфальтено-смолистых веществ установлено, что в низкопроницаемых, в отличие от высокопроницаемых коллекторов, начало фильтрации протекает по нелинейному закону, а с повышением градиента давления нелинейность переходит в прямую линию, соответствующую закону Дарси.

Кроме этого, приведены результаты экспериментальных исследований по вытеснению нефти месторождений с высоким содержанием асфальтено-смолистых веществ полимерными растворами на искусственно созданных моделях пласта для определения концентрации полимерного раствора и размера оторочки с целью увеличения нефтеотдачи пластов. Экспериментальные исследования по вытеснению нефти полимерными растворами проведены на моделях пласта, наполненных кварцевым песком, анализируемые же месторождения представлены карбонатными породами-известняками.

Полученные результаты по вытеснению нефти полимерными растворами на моделях пласта с терригенными коллекторами считаются возможными для использования на объектах с карбонатными коллекторами при качественном обосновании внедрения в них метода полимерного заводнения.

Экспериментальными исследованиями по вытеснению нефти месторождений с высоким содержанием асфальтено-смолистых веществ с оторочкой загущенной воды установлено, что данный метод дает наибольшее увеличение безводной и конечной нефтеотдачи пластов в пределах изменения концентрации полимерного раствора 0,2–0,4%, при размере оторочки более 70% нефтенасыщенного объема пласта.

Исследованиями по вытеснению высоковязких нефтей полимерными растворами показано, что применение данного метода повышения коэффициента извлечения нефти на практике не всегда экономически целесообразно из-за необходимости обеспечения высоких давлений нагнетания и большой концентрации дорогостоящего полимерного раствора.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пласт, нефть, вязкость, фильтрация, давление, градиент, установка, нефтеотдача, полимер, раствор.

## ЖОҒАРЫ ШАЙЫРЛЫ МҰНАЙДЫ ПОЛИМЕРЛІ ЕРІТІНДІЛЕРМЕН ЫҒЫСТЫРУ АРҚЫЛЫ ТИІМДІЛІКТІ АРТТЫРУ

Г.Ж. МОЛДАБАЕВА<sup>1</sup>, техника ғылымдарының докторы, профессор,  
[g.moldabayeva@satbayev.university](mailto:g.moldabayeva@satbayev.university)

А.Х. СЫЗДЫҚОВ<sup>1</sup>, Ph.D, профессор, [a.syzdykov@satbayev.university](mailto:a.syzdykov@satbayev.university)

А.А. ЗАКИРОВ<sup>2</sup>, техника ғылымдарының докторы, профессор, [zakirov\\_azamjon@mail.ru](mailto:zakirov_azamjon@mail.ru)

А.Х. КАРШИЕВ<sup>2</sup>, техника ғылымдарының докторы, [suyunov95ramiz@gmail.com](mailto:suyunov95ramiz@gmail.com)

С.Ж. АБИЛЕВА<sup>1</sup>, PhD, [saulezh007@gmail.com](mailto:saulezh007@gmail.com)

Л.З. ИГАМБЕРДИЕВА<sup>3</sup>, техника ғылымдарының докторы, [lobar6266@gmail.com](mailto:lobar6266@gmail.com)

<sup>1</sup>SATBAYEV UNIVERSITY,  
Қазақстан Республикасы, 050013, Алматы қ., Сәтпаев к-сі 22-а

<sup>2</sup>ИСЛАМ КӨРИМОВ АТЫНДАҒЫ ТАШКЕНТ МЕМЛЕКЕТТІК ТЕХНИКАЛЫҚ УНИВЕРСИТЕТИ,  
Өзбекстан Республикасы, 100095, Ташкент қаласы, Университетская көшесі, 2-а

<sup>3</sup>«O'ZLITINEFTGAZ» АКЦИОНЕРЛІК ҚОҒАМЫ,  
Өзбекстан Республикасы, 100095, Ташкент қаласы, Т. Шевченко көшесі, 2

Мақалада асфальтенді-шайырлы заттардың мөлшері жоғары кен орындарындағы мұнайлардың фильтрациялық қасиеттерін зерттеу бойынша тәжірибелік зерттеулердің нәтижелері берілген. Құрамында асфальтенді-шайырлы заттардың жоғары мөлшері бар мұнайларды сүзу процесінің эксперименттік зерттеулері көрсеткендей, төмен өткізгіштікте, жоғары өткізгіштігі бар қабаттардан айырмашылығы, фильтрацияның басталуы сызықты емес заң бойынша жүреді, ал қысым градиентінің жоғарылауымен Дарси заңына сәйкес түзу сызыққа айналады.

Сонымен қатар, полимер ерітіндісінің концентрациясын және жиек өлшемін анықтау үшін жасанды түрде жасалған қабат үлгілері бойынша полимер ерітінділерімен асфальтенді-шайырлы заттар көп кен орындарынан мұнайды ығыстыру бойынша қабаттардан мұнай беруді арттыру үшін эксперименталды зерттеулердің нәтижелері ұсынылған. Полимер ерітіндісімен мұнайды ығыстыру эксперименталды зерттеулері кварц құмына толы қабаттарда, ал талданған кен орындары карбонатты әктас жыныстармен ұсынылған.

Терригенді қабаттары бар қабат үлгілерінде мұнайды полимер ерітінділерімен ығыстыру бойынша алынған нәтижелер оларда полимерлік су басу әдісін енгізудің сапалы негіздемесі бар карбонатты қабаттары бар объектілерде пайдалану үшін мүмкін деп саналады.

Жоғары шайырлы мұнайды полимерлік ерітінділермен ығыстырудың тәжірибелерінің нәтижелері бойынша сусыз және соңғы мұнайбергіштіктің ең үлкен ұлғаюына оның концентрациясы 0,2–0,4% болғанда және қабаттың мұнаймен қаныққан көлемінің 70%-дан асатын жиек жасағанда қол жеткізілетіні анықталды.

Тұтқырлығы жоғары мұнайларды полимерлі ерітінділермен ығыстыру жөніндегі зерттеулер көрсеткендей, жоғары қысымды және қымбат полимерлі ерітіндінің үлкен концентрациясын қамтамасыз ету қажеттілігіне байланысты мұнай алу коэффициентін арттырудың осы әдісін іс жүзінде қолдану әрдайым экономикалық тұрғыдан тиімді бола бермейді.

Жоғары шайырлы мұнайды сүзу процесінің зерттеулері көрсеткендей, өткізгіштігі төмен қабаттарда сүзудің басталуы сызықты емес заң бойынша жүреді, ал қысым градиенті жоғарылағанда ол сызықтық заңға айналады. Жоғары шайырлы мұнайды полимерлік ерітінділермен ығыстырудың тәжірибелерінің нәтижелері бойынша сусыз және соңғы мұнайбергіштіктің ең үлкен ұлғаюына оның концентрациясы 0,2–0,4% болғанда және қабаттың мұнаймен қаныққан көлемінің 70 %- дан асатын жиек жасағанда қол жеткізілетіні анықталды.

**ТҮЙІН СӨЗДЕР:** қабат, мұнай, тұтқырлық, сүзу, қысым, градиент, қондырғы, мұнайбергіштік, полимер, ерітінді.

## INCREASING EFFICIENCY OF THE DISPLACEMENT OF HIGHLY RESINOUS OILS BY POLYMER SOLUTIONS

G.ZH. MOLDABAEVA<sup>1</sup>, Doctor of Technical Sciences, professor,  
g.moldabayeva@satbayev.university

A.KH. SYZDYKOV<sup>1</sup>, Ph.D, Professor, a.syzdykov@satbayev.university

A.A. ZAKIROV<sup>2</sup>, Doctor of Technical Sciences, professor, zakirov\_azamjon@mail.ru

A.H. KARSHIEV<sup>2</sup>, Doctor of Technical Sciences, suyunov95ramiz@gmail.com

S.ZH. ABILEVA<sup>1</sup>, PhD doctoral student, saulezh007@gmail.com

L.Z. IGAMBERDIEVA<sup>3</sup>, Doctor of Technical Sciences, lobar6266@gmail.com

<sup>1</sup>SATBAYEV UNIVERSITY,  
22/5, Satpayev str., Almaty, 050000, Republic of Kazakhstan

<sup>2</sup>ISLAM KARIMOV TASHKENT STATE TECHNICAL UNIVERSITY,  
2-a, Universitetskaya Street, Tashkent, 100095, Republic of Uzbekistan

<sup>3</sup>JSC «O'ZLITINEFTGAZ»,  
2T, Shevchenko str., Tashkent, 100095, Republic of Uzbekistan

*The article presents the experimental results of studies of the filtration properties of oils from fields with a high content of asphaltene-resinous substances. Experimental studies of the filtration process of deposits with a high content of asphaltene-resinous substances have established that in low-permeability, unlike high-permeability reservoirs, the beginning of filtration proceeds according to a nonlinear law, and with an increase in the pressure gradient, the nonlinearity turns into a straight line corresponding to the Darcy law.*

*In addition, the results of experimental studies on the displacement of oil from fields with a high content of asphaltene-resinous substances by polymer solutions on artificially created reservoir models are presented to determine the concentration of the polymer solution and the size of the slug to increase oil recovery from reservoirs. Experimental research on oil displacement by polymeric solutions were carried out on reservoir models filled with quartz sand, while the analyzed deposits are represented by carbonate limestone rocks.*

*The results obtained on the oil displacement by polymer solutions on reservoir models with terrigenous reservoirs are considered possible for use on objects with carbonate reservoirs with a qualitative justification for the introduction of the polymer flooding method.*

*Experimental studies on the oil displacement from fields with a high content of asphaltene-resinous substances with a thickened water rim have established that this method gives the greatest increase in anhydrous and ultimate oil recovery, within a change in the concentration of the polymer solution of 0.2-0.4%, with a rim size of more than 70% of the oil-saturated reservoir volume.*

*Studies on the displacement of high-viscosity oils with polymer solutions have shown that the use of this method of increasing the oil recovery factor in practice is not always economically feasible, due to the need to provide high injection pressures and a high concentration of an expensive polymer solution.*

**KEY WORDS:** reservoir, oil, viscosity, filtration, pressure, gradient, device, oil recovery, polymer, solution.

**В**ведение. В последние годы во многих нефтегазоносных регионах мира открываются нефтяные месторождения со сложным геологическим строением. Для этих месторождений характерна небольшая нефтенасыщенная толщина пластов, низкие фильтрационно-емкостные свойства коллекторов, высокая вязкость пластовой нефти и неоднородность продуктивных горизонтов и т.п. Помимо этого, растут глубины залегания перспективных структур и затраты на геолого-разведочные работы.

В этих условиях одним из путей увеличения добычи нефти является повышение коэффициента извлечения геологических запасов нефти (КИН), оставшихся на разрабатываемых месторождениях. Данная задача особенно актуальна для месторождений с высоковязкими нефтями, т.к. достигнутые величины КИН на таких объектах в два и более раза ниже, чем на месторождениях с маловязкими нефтями.

Учитывая, что в настоящее время основная технология разработки нефтяных залежей связана с вытеснением нефти водой, актуальным является повышение эффективности данного процесса путем применения различных растворов.

*Состояние изученности.* Опыт многолетней разработки нефтяных месторождений Узбекистана, а также исследования за рубежом показывают, что возникающие осложнения в процессе нефтедобычи и значительные потери нефти в пласте во многом связаны со свойствами добываемых нефтей.

Неньютоновский характер нефтей, обусловленный наличием в системе парафина-асфальтено-смолистых веществ, приобретает особое значение в процессе их извлечения и применении методов повышения коэффициента извлечения нефти.

В настоящее время накоплен большой теоретический и экспериментальный материал по исследованию структурно-механических свойств и особенностей течения неньютоновских нефтей [1–10, 14, 17–20]. Исследования показали, что при освоении скважин, вскрывших залежи тяжелых высоковязких нефтей, возникают осложнения, связанные с трудностью подъема нефти на поверхность. Большое содержание асфальтено-смолистых веществ обуславливает проявление при фильтрации начальных градиентов давления и релаксационных процессов в системе нефть-коллектор, большие потери давления в устьевых коммуникациях и дебитов нефти [12, 13] приводит к значительному уменьшению нефтеотдачи пластов.

Значительный вклад в развитие исследований структурно-механических свойств, неньютоновских систем, разработки месторождений, содержащих высоковязкие и тяжелые нефти, эксплуатации скважин, добывающих такие нефти, внесли А.Х. Мирзажанзаде, Г.И. Баренблатт, Ю.П. Желтов, Р.С. Гурбанов, А.Т. Горбунов, В.М. Санатир, Ш.А. Абайдулин, Ю.Н. Байдюков, В.Е. Губин и др.

Основные принципы разработки месторождений высоковязких нефтей изложены в работах [8, 9, 15, 16].

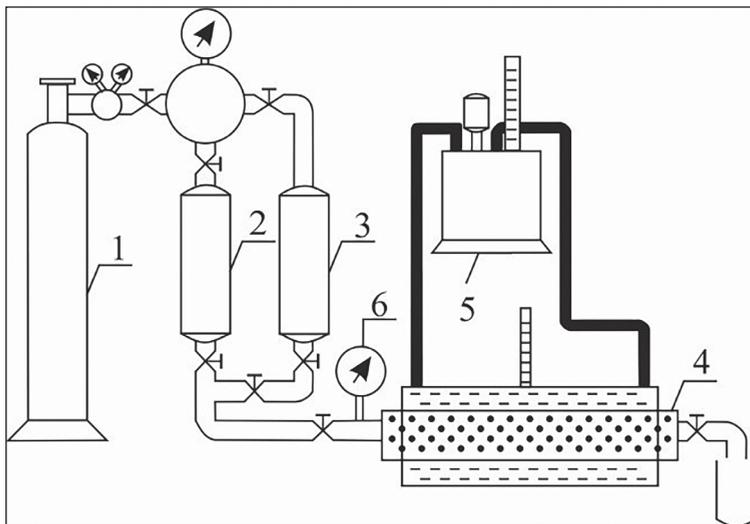
Характерной особенностью эксплуатации скважин, продуцирующих тяжелые нефти, также является резкий рост обводненности на начальном этапе разработки. Совместное движение высоковязкой нефти и воды в призабойной зоне пласта, по стволу скважины и системе сбора приводит к их смешиванию с образованием стойких и тяжелых эмульсий. Вышеуказанные характерные особенности тяжелых высоковязких нефтей приводят к резкому снижению эффективности разработки месторождений и оставлению в продуктивных пластах значительной части (до 80–90 %) их геологических запасов.

Вследствие этого текущее состояние разработки залежей с высоковязкими нефтями характеризуется низким значением достигнутой нефтеотдачи при высокой обводненности добываемой продукции скважин. Однако пути совершенствования реализованных систем разработки с целью повышения КИН в условиях высокой обводненности продукции скважин, т.е. в поздней стадии эксплуатации требует дальнейших исследований.

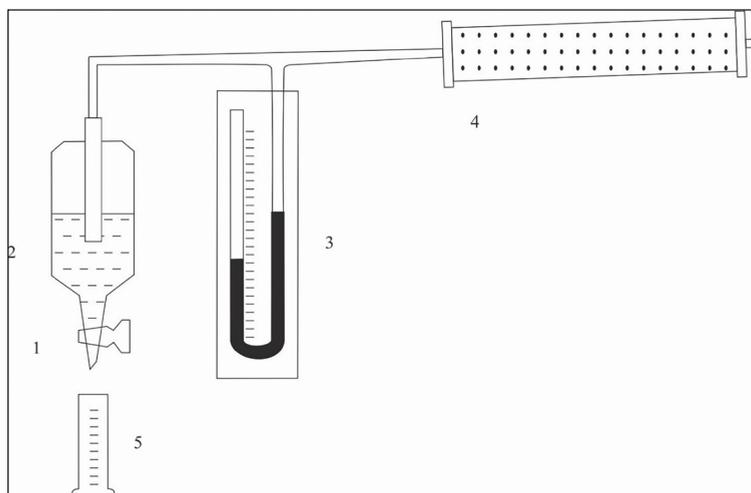
**Материалы и методы исследований.** Для изучения процесса фильтрации была использована специальная установка, которая приведена на *рисунке 1*.

Ее основными элементами являются колонна (кернодержатель) с водяной рубашкой, емкость для нефти, термостат и воздушный баллон высокого давления. Кернодержатель с водяной рубашкой позволяет вести исследования при изотермических условиях. Термостатирующаяся жидкость циркулировала по схеме термостат-водяная рубашка-термостат. Перепад давления в кернодержателе создавали воздухом из баллона.

Однородная пористая среда моделирована кварцевым песком определенной фракции. Для создания малопроницаемых сред кварцевый песок пропускался через барабанную мельницу, где происходил его разлом. Размельченный песок фракционировали на ситах на отдельные фракции. Коэффициент проницаемости изменялся в зависимости от диаметров зерен фракции. Чем меньше диаметр частиц, тем меньше проницаемость.



**Рисунок 1 – Принципиальная схема экспериментальной установки: 1 – баллон высокого давления (воздух); 2 – емкость для загущенной воды; 3 – емкость для нефти; 4 – образец пласта (искусственный); 5 – термостат; 6 – образцовый манометр**



**Рисунок 2 – Установка для определения воздухопроницаемости пористой среды: 1 – кран; 2 – емкость с водой; 3 – U-образный водяной манометр; 4 – колонка с пористой средой; 5 – мерный цилиндр**

Промытым и высушенным песком заполнялся кернодержатель и утрамбовывался до определенного значения пористости. Определение воздухопроницаемости производилось на установке, показанной на *рисунке 2*. Вначале установка проверялась на герметичность. При открывании краника 1 из сосуда 2 вытекала вода. Причем объем вытекающей воды из сосуда 2 равнялся объему воздуха, прошедшего через пористую среду. Вытекший объем воды фиксировался во времени, т.е. определяли расход. Различным положениям краника 2 регулировался расход воздуха. Перепад давления фиксировался на U-образном водяном манометре.

Для вычисления коэффициента проницаемости среднее значение  $Q/\Delta P$  подставляется по формуле:

$$k = \frac{\eta \Delta l}{F} \frac{Q}{\Delta P},$$

где:  $Q$  – фильтрационный расход;  $\eta$  – вязкость;  $F$  – поперечное сечение пористой среды;  $\Delta l$  – длина;  $\Delta P$  – перепад давления.

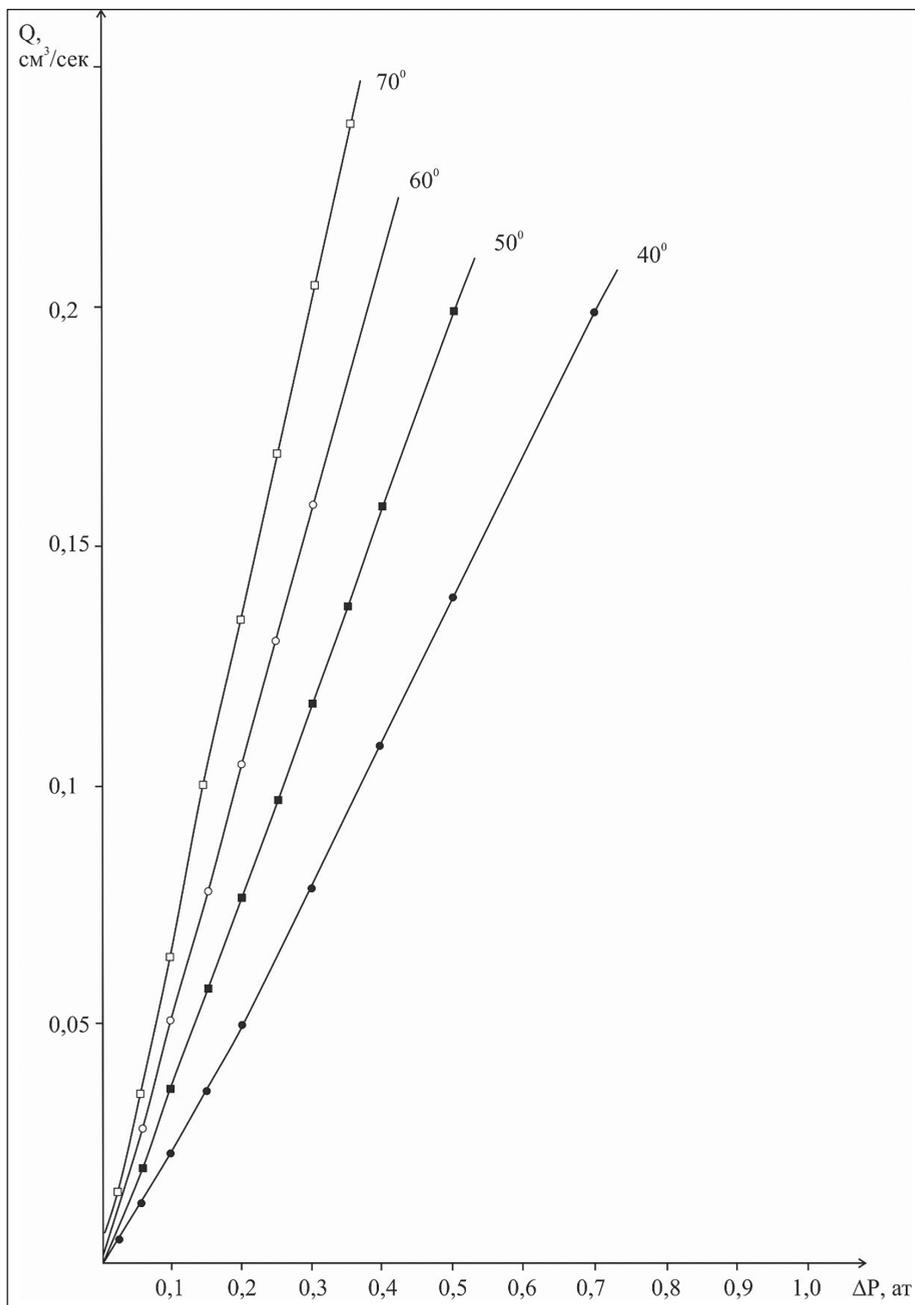
После определения проницаемости колонка насыщалась нефтью. Для насыщения колонка ставилась в вертикальное положение, и процесс насыщения велся при высокой температуре и малой скорости фильтрации. Эти условия необходимы для более полного насыщения пористой среды. После циркуляции нефти в количестве, равном трехкратному объему пор, колонка была готова к экспериментам. Эксперимент заключался в снятии зависимости между расходом и перепадом давления при течении нефти через пористую среду. Практически фильтрация осуществлялась следующим образом. Постоянная температура нефти и колонки поддерживалась термостатом. В колонку нефть поступала из емкости 3 при помощи сжатого воздуха. Расход жидкости регулировали регулятором расхода, а давление на входе в колонку регистрировалось образцовым манометром. По истечении некоторого времени движение нефти стабилизировалось. Затем брали нефть за определенный промежуток времени. Зная количество вытекшей жидкости, ее плотность и время истечения, находили объемный расход.

**Результаты и обсуждение.** Изучение фильтрации нефти проводилось в пористой среде различной проницаемости и при различных температурах. На *рисунке 3* показана экспериментально снятая зависимость расхода нефти месторождения X от перепада давления при различных температурах. Нефти месторождения X содержат 20,4% смолы, 4,6% парафина, 24,9% асфальтена.

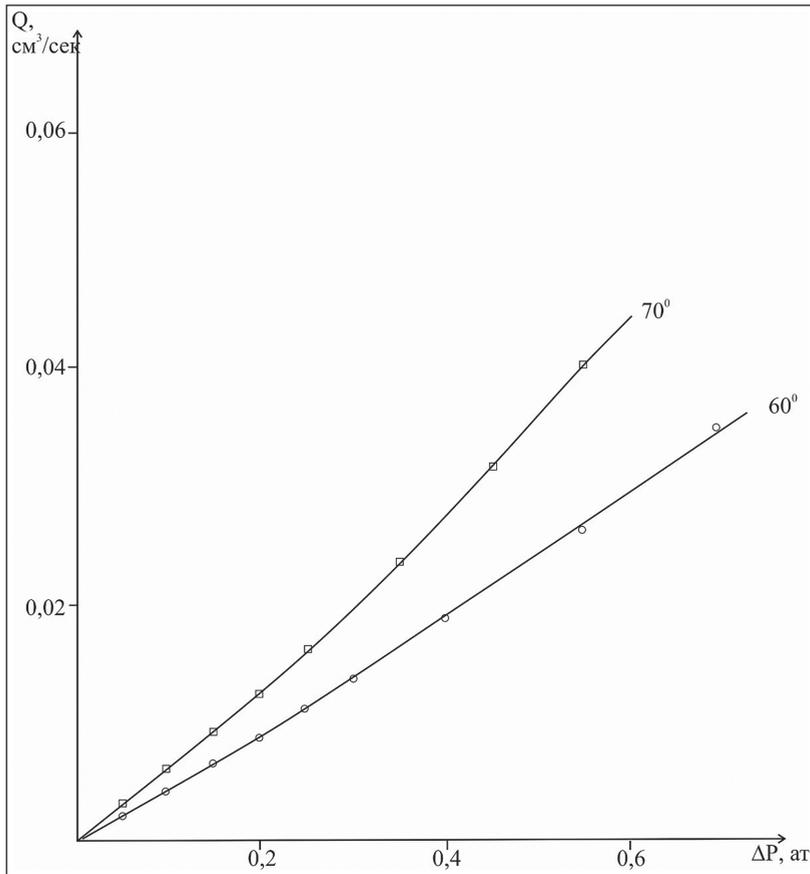
Проницаемость пористой среды по воздуху составляла 0,0409 мкм<sup>2</sup>. Из *рисунка 3* видно, что кривые фильтрации нефти месторождения X прямолинейны и исходят из начала координат. Это говорит о том, что фильтрация происходит в области линейного закона Дарси. С ростом температуры происходит увеличение фильтрационного расхода нефти. Это связано с повышением подвижности нефти, т.е. коэффициента фильтрации за счет снижения вязкости нефти.

Фильтрация нефти месторождения X в малопроницаемых пористых средах показана на *рисунке 4*. Воздухопроницаемость пористой среды равна 0,006 мкм<sup>2</sup>. Анализ кривых показывает, что вначале фильтрация идет по нелинейному закону. Далее с повышением градиента давления нелинейность переходит в прямую линию. Указанная нелинейность указывает на то, что при малых значениях градиента давления фильтрация происходит с нарушением закона Дарси.

Анализируя кривые фильтрации нефти месторождения X при различных проницаемостях пористой среды, представленные на *рисунках 3, 4*, можно заметить, что с уменьшением проницаемости начинает проявляться нелинейность, которая исчезает с увеличением градиента давления.



**Рисунок 3 – Зависимость расхода от перепада давления для нефти месторождения X при фильтрации в пористой среде с проницаемостью 0,0409 мкм²**



**Рисунок 4 – Зависимость расхода нефти от перепада давления для нефти месторождения X при фильтрации в пористой среде с проницаемостью 0,006 мкм<sup>2</sup>**

Большое содержание асфальтено-смолистых веществ и парафинов обуславливает аномальные свойства, такие как неравновесные и релаксационные свойства, проявление начальных градиентов давления добываемых нефтей. Знание этих особенностей имеет важное значение для установления величины пластовых давлений, гидродинамических параметров пласта и коэффициента нефтеизвлечения.

К настоящему времени влияние вязкоупругих свойств нефти на фильтрацию полностью не изучено. При фильтрации однородной жидкости равновесное состояние между скоростью фильтрации и градиентом давления достигается мгновенно. При фильтрации вязкоупругих нефтей такое предположение не имеет места.

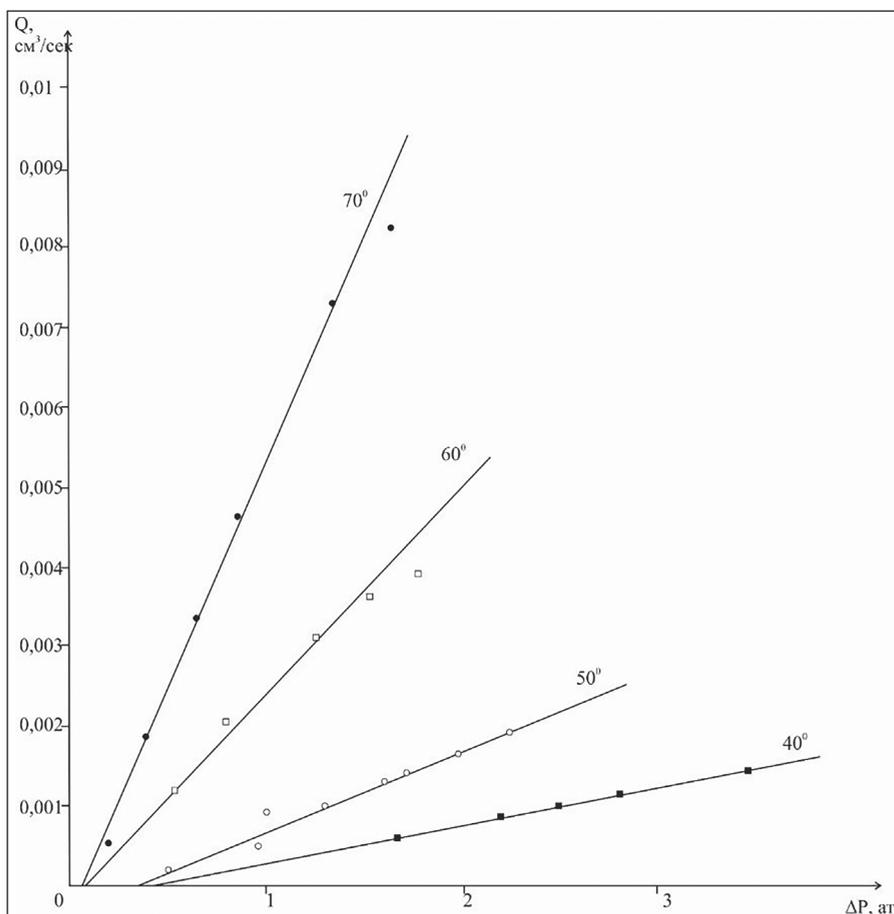
Для изучения особенности фильтрации высоковязких нефтей в пористой среде были проведены экспериментальные исследования по фильтрации нефтей месторождения Y. Нефти месторождения Y содержат 72,4% смол, 4,5% парафины, 4,9% асфальтены.

Экспериментальные исследования были проведены на колонке, где пористая среда готовилась из кварцевого песка проницаемостью 27,3 дарси.

В начальный момент создавался перепад давления, который затем поддерживался постоянным. В ходе опыта измерялся фильтрационный расход, который

постепенно уменьшался в ходе опыта, пока не достигал некоторого стационарного значения. После установления расхода давление снимали нескольких часов. Далее, повторно прикладывали тот же перепад давления, восстанавливая поток. В этом случае фильтрационный расход после перепадов оказывался большим, чем до перекрытия потока, потом поток достигал стационарного значения. Это объясняется релаксацией частиц нефти.

Результаты измерения зависимости  $Q = Q(\Delta p)$  приведены на *рисунке 5*, где снятая зависимость  $Q = Q(\Delta p)$  указывает на нелинейный характер фильтрации, что необходимо учитывать при разработке месторождений. Большое содержание асфальтено-смолистых веществ в нефти месторождения *У* обуславливает аномальные свойства и особенно проявление начальных градиентов давления. Из *рисунка 5* видно, что фильтрация нефти происходит после достижения определенного значения перепада давления  $\Delta p$ . Значение  $\Delta p$ , отнесенное на единицу длины пористой среды, называется начальным градиентом давления. В *таблице 1* представлено значение начального градиента давления  $\Delta p/l$ , при различных температурах фильтрации.



**Рисунок 5 – Зависимость расхода от перепада давления при фильтрации нефти месторождения *У* при фильтрации в пористой среде с проницаемостью 27,3 Дарси**

Таблица 1 – Значения начального градиента давления при различных температурах фильтрации

Температура фильтрации, °С	40	50	60	70
Начальный градиент давления, МПа/м	1,16	0,79	0,34	0,12

Из-за большого содержания в нефти смолы эти нефти могут обладать, кроме вязкости и пластичности, также упругостью. При понижении температуры вязкость и предельное напряжение сдвига (градиента давления) быстро увеличиваются, что затрудняет фильтрацию этих нефтей в коллекторах и перекачку по нефтепроводу.

Для описания одномерной фильтрации с начальным градиентом давления А.Х. Мирзажанзаде ввел обобщенный закон Дарси:

$$Q = \frac{k}{\mu} \left( \frac{\Delta p}{l} - \frac{\Delta p_0}{l} \right) S,$$

где  $Q$  – фильтрационный расход;  $\mu$  – вязкость;  $k, l, S$  – соответственно проницаемость, длина и поперечное сечение пористой среды.

Существование начального градиента давления приводит к образованию внутри пласта застойных зон и целиков, что сильно влияет на коэффициент извлечения нефти. Кроме того, наличие релаксационных свойств делает необходимым рассмотреть вопрос об оптимальном отборе с точки зрения минимального снижения пластового давления.

Отметим, что при движении вязкоупругой нефти через пористую среду возникает упругое напряжение, приводящее к увеличению эффективной вязкости в пористой среде по сравнению с движением в трубе. С повышением температуры релаксационные свойства нефти ослабляются. Поэтому различие в вязкостях нефти в пористой среде с увеличением температуры будет уменьшаться.

Следует сделать вывод, что экспериментальные исследования проведены на моделях пласта в пределах изменения проницаемости от 6 до 40,9 дарси. Проницаемость же анализированных продуктивных пластов изменяется от 150 до 450 милли дарси. Насколько экспериментальные условия отражают условия реальных продуктивных пластов. При использовании установленных зависимостей в диапазонах изменения ниже или выше, чем при экспериментальных условиях, можно воспользоваться значениями параметров, полученных аппроксимацией зависимостей.

Как видно из результатов вышеприведенных экспериментальных исследований по изучению фильтрационных свойств вязких и высоковязких нефтей через пористую среду, с малопроницаемыми и высокопроницаемыми моделями пласта, возникает вопрос о выборе оптимальной концентрации и объема полимерного раствора для вытеснения нефти.

В связи с этим, были проведены экспериментальные исследования по определению оптимального объема и концентрации полимерного раствора.

На месторождениях с высоковязкими нефтями для повышения нефтеотдачи пластов широкое применение находят высокомолекулярные полимеры. В нефтедобыче полимеры применяются в качестве загустителя закачиваемой воды при вытеснении нефти из пластов.

Цель применения загущенной воды заключается в том, что вытеснение нефти будет производиться жидкостью более высокой вязкости, тем самым создавая стабильный фронт вытеснения. Из физической сущности вытеснения несмешивающихся жидкостей явствует, что чем больше вязкость вытесняющей жидкости, тем лучше полнота вытеснения. Утверждаемое выше объясняется в основном тем, что при вытеснении нефти более вязкой жидкостью предотвращается локальное продвижение воды, опережающее основной фронт вытеснения. В практике же в основном руководствуются выравниванием вязкостей вытесняемой и вытесняющей жидкостей, т.е. отношение вязкостей  $\mu_{ар}/\mu_{н} \approx 1$ .

Несмотря на то, что полимеры, применяемые для загущения воды, получают из отходов производства, расходы, связанные с закачкой загущенной воды, могут достигать значительной суммы, в виду необходимости закачать в пласт огромное количество разбавленного полимера при непрерывной закачке.

В связи с этим возникает необходимость определения возможности заменить процесс непрерывной закачки. Закачкой некоторой оторочки той же загущенной воды, которая могла бы обеспечить почти такие же результаты коэффициента нефтеотдачи пластов. С этой целью проведены экспериментальные исследования на искусственных моделях пласта по определению вытесняющей способности «оторочки загущенной воды», в которых размеры «оторочек загущенной воды» составляли 10 – 75 % от объема пор.

При этом введены следующие обозначения:  $\Delta P$  – перепад давления;  $Q_n$  – расход нефти;  $Q_{ар}$  – расход вытесняющего агента;  $Q_{общ}$  – общий расход;  $V_{от}$  – объем оторочки;  $K_v$  – воздухопроницаемость;  $V_{в.н.}$  – объем вытесняемой нефти;  $a_k, a_б$  – соответственно, конечный и безводный коэффициенты нефтеотдачи;  $K_n$  – фазовая проницаемость нефти;  $K_{ар}$  – фазовая проницаемость по вытесняющему агенту.

В процессе проведения опытов по фильтрации некоторых вязкоупругих жидкостей (высоковязких нефтей, растворов полимеров) в пористой среде при постоянном перепаде давления было установлено, что фильтрационный расход в ходе опыта не оставался постоянным, а постепенно уменьшался, пока не достигал некоторого установившегося значения. При этом, время стабилизации фильтрационного расхода составляло порядка нескольких часов.

После стабилизации расхода на некоторое время фильтрация прекращалась. Затем прикладывался тот же перепад давления, и снова возникало фильтрационное течение. Однако, расход после прорыва оказывался большим, чем до перекрытия потока. Постепенно расход снова уменьшался и спустя некоторое время достигал стационарного значения.

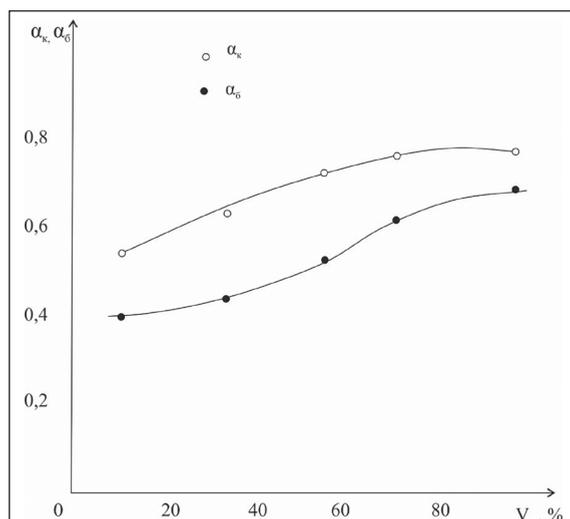
По описанной схеме были проведены серии опытов с растворами полимера К-9. Полимерный раствор К-9 является местным сырьем, разработанный Институтом химии и физики полимеров Академии наук Республики Узбекистан. Кроме этого, совершенствованный тип реагента К-4, является высокомолекулярным. Широко применяется в нефтегазовой отрасли (в бурении, добыче). Ранее, в работах не были исследованы фильтрационные характеристики реагента К-9, а фильтрационные характеристики реагента К-4 были исследованы в работах [18]. В этой связи был выбран реагент К-9.

По результатам экспериментальных данных, составлена сводная *таблица 2*, в которой приведена кривая характеризующая прирост нефтеотдачи в зависимости от объема загущенной воды.

По результатам экспериментов были построены кривые зависимости безводной и конечной нефтеотдачи от объема создаваемой оторочки. На *рисунке 6* отражена динамика роста безводной и конечной нефтеотдачи, в зависимости от объема оторочки загущенной воды при концентрации 0,4% полимера К-9. Такие же кривые зависимости приведены на *рисунке 7*, при концентрации полимера К-9 в воде равной 0,2%. По результатам опытов, а также по характеру кривых зависимостей можно сделать заключение – вытеснение методом оторочки приводит к желаемым результатам лишь при достижении размера оторочки более 70% от объема поровой нефти.

**Таблица 2 – Сводные данные результатов экспериментов при вытеснении нефти**

Воздухо-проницаемость, дарси	Концентрация К-9, %	$V_{от}$ , см <sup>3</sup>	$V_{в.н.}$ , см <sup>3</sup>	$\frac{V_n}{V_{вн}} \cdot 100\%$	$V_{ар}$	Нефтеотдача	
						$a_b$ , безводная	$a_k$ , конечная
26,5	0,2	Сплошная	18,0	100	76	0,46	0,70
19	-	4,9	17,9	29	73	0,31	0,48
20,25	-	2	18,1	11	60	0,29	0,46
18,71	-	13,3	17,8	75	78	0,44	0,65
27,3	Вода	0	19,8	0	0	0,35	-
					39	-	0,42
					90	-	0,56
					140	-	0,61
					190	-	0,65
					240	-	0,67
25,04	0,4	Сплошная	18,5	100	60	0,68	0,77
17,2	-	1,93	18,0	10,7	103	0,40	0,54
28,5	-	6,4	18,3	35,0	68	0,44	0,63
22,4	-	10,2	18,1	56,5	71	0,52	0,72
27,8	-	13,3	18,3	73,0	66	0,60	0,76



**Рисунок 6 – Зависимость при  $\alpha_k, \alpha_b = f(V_{от})$  0,4% К-9**

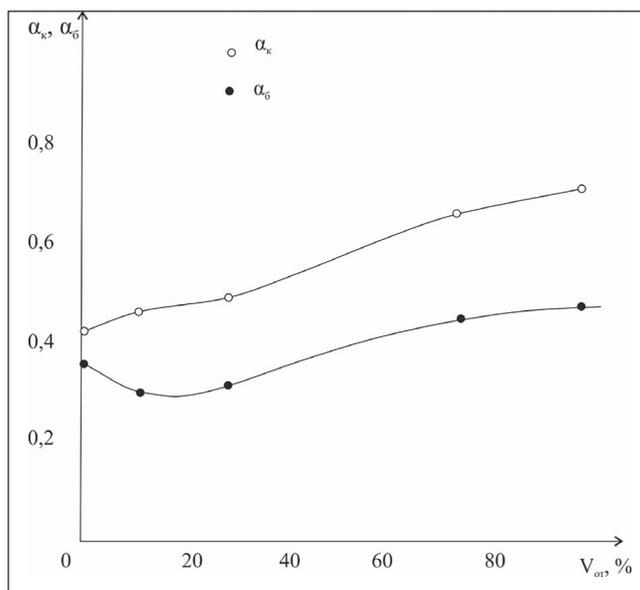


Рисунок 7 – Зависимость при  $a_k, a_c = f(V_{от})$  0,2% К-9

**Выводы.** Экспериментальными исследованиями процесса месторождения X с высоким содержанием асфальтено-смолистых веществ установлена зависимость расхода нефти от перепада давления. Показано, что в низкопроницаемых в отличие от высокопроницаемых коллекторов начало фильтрации протекает по нелинейному закону, а с повышением градиента давления нелинейность переходит в прямую линию, соответствующую закону Дарси.

При использовании установленных зависимостей в диапазонах изменения ниже или выше чем при экспериментальных условиях, можно воспользоваться значениями параметров полученных аппроксимацией зависимостей.

Экспериментальные исследования по вытеснению нефти полимерными растворами проведены на моделях пласта наполненные кварцевым песком, анализируемые же месторождения представлены карбонатными породами-известняками. На наш взгляд полученные результаты по вытеснению нефти полимерными растворами на моделях пласта с терригенными коллекторами, считаются возможными для использования на объектах с карбонатными коллекторами при качественном обосновании внедрения в них метода полимерного заводнения.

Экспериментальными исследованиями по вытеснению нефти месторождения X оторочкой загущенной воды установлено, что данный метод даёт наибольшее увеличение безводной и конечной нефтеотдачи пластов, в пределах изменения концентрации полимерного раствора 0,2-0,4%, при размере оторочки более 70% нефтенасыщенного объема пласта.

Полученные результаты по вытеснению нефти полимерными растворами на моделях пласта с терригенными коллекторами, считаются возможным для использования на объектах с карбонатными коллекторами при качественном обосновании метода полимерного заводнения.

Исследованиями по вытеснению высоковязких нефтей полимерными растворами показано, что применение данного метода повышения коэффициента извлечения нефти на практике не всегда экономически целесообразно, из-за необходимости обеспечения высоких давлений нагнетания и большой концентрации дорогостоящего полимерного раствора. 

## ЛИТЕРАТУРА

- 1 Абайдулин Ш.А. Исследование реологических свойств Мангышлакских и Чухрайских нефтей. Тезисы докладов на Всесоюзном совещании по применению неньютоновских систем в нефтедобыче. – М., 1977. – С. 30-32. [Abajdulin Sh.A. Issledovanie reologicheskikh svojstv Mangy`shlaskikh i Chukhrajkskikh neftej. Tezisy` dokladov na Vsesoyuznom soveshhanii po primeneniyu nen`yutonovskikh sistem v neftedoby`che. – М., 1977. – S. 30-32.]
- 2 Акилов Ж.А. К определению релаксационных параметров неравновесной фильтрации // Известия АН УзССР. Серия технических наук. – 1985. – №5. – С. 50-54. [Akilov Zh.A. K opredeleniyu relaksaczionny`kh parametrov neravnovesnoj fil`traczii // Izvestiya AN UzSSR. Seriya tekhnicheskikh nauk. – 1985. – №5. – S. 50-54]
- 3 Акилов Ж.А. Нестационарные движения вязкоупругих жидкостей. –Ташкент: Фан, 1982. – 104 с.[Akilov Zh.A. Nestaczionarny`e dvizheniya vyzkouprugikh zhidkostej. – Tashkent: Fan, 1982. – 104 s.]
- 4 Акилов Ж.А. О гидродинамическом методе определения релаксационных характеристик неравновесной фильтрации // Доклады Академии наук УзССР. – 1989. – № 4. – С. 20-29. [Akilov Zh.A. O gidrodinamicheskom metode opredeleniya relaksaczionny`kh kharakteristik neravnovesnoj fil`traczii // Doklady` Akademii nauk UzSSR. – 1989. – № 4. – S. 20-29.]
- 5 Акилов Ж.А., Хужаёров Б.Х. Гидродинамические методы оценки релаксационных характеристик неньютоновских нефтей на основе нестационарных исследований и на модели пласта. – Ташкент, 2019. – 12с. [Akilov Zh.A., Khuzhayorov B.Kh. Hidrodinamicheskie metody` ocenki relaksaczionny`kh kharakteristik nen`yutonovskikh neftej na osnove nestaczionarny`kh issledovaniy i na modeli plasta. – Tashkent, 2019. – 12 s.]
- 6 Губин В.Е., Степанюгин В.И., Скрипников Ю.А. Структурно-механические свойства Мангышлакской нефти // Применение неньютоновских систем в нефтедобыче. Материалы симпозиума. – 1974. – С. 134-138. [Gubin V.E., Stepanyugin V.I., Skripnikov Yu.A. Strukturno-mekhanicheskie svojstva Mangy`shlaskoj nefti // Primenenie nen`yutonovskikh sistem v neftedoby`che. Materialy` simpoziuma. – 1974. – S. 134-138.]
- 7 Дытюк Л.Т. Исследование реологических характеристик нефтей с эмульсий некоторых месторождений Пермской области // Применение неньютоновских систем в нефтедобыче. – М., 1974. – С. 61-72. [Dy`tyuk L.T. Issledovanie reologicheskikh kharakteristik neftej s e`mul`sij некотory`kh mestorozhdenij Permskoj oblasti // Primenenie nen`yutonovskikh sistem v neftedoby`che. –М., 1974. – S. 61-72.]
- 8 Кулаков П.И. Оптимизация технологии подготовки нефтей с применением деэмульгаторов // Нефтяное хозяйство.–1993. – № 8. – С. 46-47. [Kulakov P.I. Optimizaczija tekhnologii podgotovki neftej s primeneniem dee`mul`gatorov // Neftyanoe khozyajstvo.–1993. – № 8. – S. 46-47.]
- 9 Леонов Е.Г., Исаев В.И. Гидроэромеханика в бурении. –М.: Недра, 1987. – 304 с.[Leonov E.G., Isaev V.I. Gidroeromekhanika v bureanii. –М.: Nedra, 1987. – 304 s.]
- 10 Мирзаджанзаде А.Х. Вопросы гидродинамики вязко-пластичных и вязких жидкостей в нефтедобыче. – Баку: Азернефнешр, 1959. – 410с.[Mirzadzhanzade A.Kh.

- Voprosy` gidrodinamiki vyazko-plastichny`kh i vyazkikh zhidkostej v neftedoby`che. – Baku: Azerneftshetr, 1959. – 410s.]
- 11 Мирзаджанзаде А.Х., Аметов И.М., Боксерман А.А., Филиппов В.П. Новые перспективные направления исследований в нефтегазодобычи // Нефтяное хозяйство.–1992. –№ 11. – С. 14-16. [Mirzadzhanzade A.Kh., Ametov I.M., Bokserman A.A., Filippov V.P. Novy`e perspektivny`e napravleniya issledovaniy v neftegazodoby`chi // Neftyanoe khozyajstvo.–1992. – № 11. – S. 14-16.]
  - 12 Мирзаджанзаде А.Х., Степанова Г.С. Математическая теория эксперимента в добыче нефти и газа. – М.: Недра, 1977. – 229 с. [Mirzadzhanzade A.Kh., Stepanova G.S. Matematicheskaya teoriya e`ksperimenta v doby`che nefti i gaza. –M.: Nedra, 1977. – 229 s.]
  - 13 Мирзаджанзаде А.Х., Ковалев А.Г., Зайцев Ю.В. Особенности эксплуатации месторождений аномальных нефтей. – М.: Недра, 1972. – 200 с. [Mirzadzhanzade A.Kh., Kovalev A.G., Zajczev Yu.V. Osobennosti e`kspluataczii mestorozhdenij anomal`ny`kh neftej. – М.: Nedra, 1972. – 200 s.]
  - 14 Мукук К.В. Элементы гидравлики релаксирующих аномальных систем. – Ташкент: Фан, 1980. – 115с.[Mukuk K.V. E`lementy` gidravliki relaksiruyushhikh anomal`ny`kh sistem. –Tashkent: Fan, 1980. – 115s.]
  - 15 Панченко Г.М., Папко В.В, Степаненко А.Н., Цабек Л.К. Влияние турбулизации потока эмульсии в электрическом поле на качество ее обезвоживания // Нефтепромышленное дело. –1979. –№ 6. – С. 53-55. [Panchenko G.M., Papko V.V, Stepanenko A.N., Czabek L.K. Vliyanie turbulizaczii potoka e`mul`sii v e`lektricheskom pole na kachestvo ee obezvozhivaniya // Neftpromy`slovoe delo. –1979. – № 6. – S. 53-55.]
  - 16 Сыртланов А.Ш., Валеев М.Д. Предупреждение эмульгирования нефти в скважинах // Нефтяное хозяйство. –1986. –№ 6. – С. 43-46.
  - 17 Уилькинсон У.Л. Неньютоновские жидкости. – М.: Мир, 1964. – 216 с. [Uil`kinson U.L. Nen`yutonovskie zhidkosti. –M.: Mir, 1964. – 216 s.]
  - 18 Хужаёров Б.Х. Реологические свойства смесей. –Самарканд, Согдиана, 2000. – 192с.[Khuzhayorov B.Kh. Reologicheskie svojstva smesej. –Samarkand, Sogdiana, 2000. – 192 s.]
  - 19 Шульман З.П. Конвективный теплоперенос реологический сложных жидкостей. – М.: Энергия, 1975. – 351с. [Shul`man Z.P. Konvektivny`j tepломassoperenos reologicheskij slozhny`kh zhidkostej. –M.: E`nergiya, 1975. – 351s.]
  - 20 Oldroyd J.G. The elastic and viscous properties of emulsions and suspensions // Proc. Roy. Soc. (London). – 1953. – A218. –P.122-132.