

УДК 622.276.32

Статья / Article

© ПНИПУ / PNRPU, 2022

Исследование устойчивости песчаных горных пород**М.А. Попов, Д.Г. Петраков**

Санкт-Петербургский горный университет (Россия, 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия Васильевского острова, 2)

Research of the Sandy Rocks Stability**Maksim A. Popov, Dmitry G. Petrakov**

Saint Petersburg Mining University (2 21st line, Vasilyevsky island, Saint Petersburg, 199106, Russian Federation)

Получена / Received: 14.07.2021. Принята / Accepted: 19.11.2021. Опубликовано / Published: 31.01.2022

Ключевые слова:

моделирование, песчаные породы, пескопроявления, призабойная зона, причины пескопроявлений, устойчивость горных пород, физическая модель, прогнозирование пескопроявлений, геологические свойства, механические свойства, фильтрационные свойства, прочность, входные параметры, искусственный керн, естественный керн.

Keywords:

modeling, sand formations, sanding, bottomhole zone, sanding causes, rock stability, physical model, sanding prediction, geological properties, mechanical properties, filtration properties, strength, input parameters, artificial core, natural core.

Выявлены факторы, влияющие на устойчивость горных пород с учетом изменения насыщенности и физико-механических свойств коллектора. Рассматриваются существующие методы моделирования песчаных горных пород: эмпирический, численный и аналитический методы, а также лабораторное моделирование. Сделан вывод о том, что для получения наиболее точного прогноза разрушения призабойной зоны пласта с последующим выносом механических частиц необходимо использовать совокупность методов, так как ни один из них в отдельности не позволяет получить исчерпывающие данные для прогноза.

Рассматриваются входные параметры для моделирования песчаных горных пород. Модель должна учитывать совокупность геологических, физико-механических и фильтрационных методов, что позволит составить наиболее точную модель песчаных пластов-коллекторов. Физическую модель песчаника можно представить в виде совокупности четырех компонентов: зерен песка, цементирующего глинистого вещества, воды и трещин.

В рамках данной работы анализируются геологические свойства: структура, текстура, минералогический состав и тип пустотного пространства. Анализ данных свойств позволяет найти и определить зависимости между свойствами пород и их прочностными характеристиками.

Рассматриваются механические свойства горных пород. К ним относятся прочностные, деформационные и реологические свойства. Для определения деформационных свойств горной породы строятся диаграммы деформирования, учитывающие допредельные, предельные и запредельные состояния. Способность массива сопротивляться разрушению при длительной нагрузке зависит от реологических свойств породы. К таковым относятся: длительная прочность, ползучесть, релаксация напряжений.

В рамках данной работы представлены предпосылки и причины пескопроявлений в скважинах. К основным можно отнести: неконсолидированность пород, превышение компрессионных сил и миграцию мелких частиц. Важную роль в процессе пескопроявления играет способ заканчивания скважин. Были выявлены критерии формирования исследований на естественных и искусственных кернах.

Полученные результаты могут быть применены для повышения эффективности эксплуатации скважин в песчаных породах и прогнозирования их безаварийной работы.

Factors influencing the stability of rocks were identified, taking into account changes in saturation and physical and mechanical properties of the reservoir. Existing methods for modeling sandy rocks were considered: empirical, numerical and analytical methods, as well as laboratory modeling. It was concluded that in order to obtain the most accurate prediction of the destruction of the bottomhole formation zone with the subsequent removal of mechanical particles, it was necessary to use a combination of methods, since none of them separately allowed obtaining comprehensive data for the prediction.

The input parameters for modeling sandy rocks were considered. The model should take into account a combination of geological, physical-mechanical and filtration methods, which would make it possible to create the most accurate model of sand reservoirs. The physical model of sandstone can be represented as a set of four components: sand grains, cementing clay substance, water and cracks. Within the framework of this work, geological properties were analyzed: structure, texture, mineralogical composition and type of void space. The analysis of these properties made it possible to find and determine the relationship between the properties of rocks and their strength characteristics.

The mechanical properties of rocks were considered. These included strength, deformation and rheological properties. To determine the deformation properties of the rock, deformation diagrams were constructed that took into account pre-limit, limit, and beyond limits. The ability of the massif to resist destruction under long-term loading depended on the rheological properties of the rock. These included: long-term strength, creep, stress relaxation.

Within the framework of this work, the prerequisites and causes of sand manifestations in wells were presented. The main ones included: non-consolidation of rocks, excess of compression forces and migration of small particles. An important role in the sanding process was played by the well completion method.

Criteria for the formation of studies on natural and artificial cores were identified.

The results obtained can be used to improve the efficiency of exploitation of wells in sandy rocks and predict their trouble-free operation.

Попов Максим Анатольевич – аспирант кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений (тел.: +007 812 328 84 20, e-mail: maksim_anatolyevich@mail.ru). Контактное лицо для переписки.

Петраков Дмитрий Геннадьевич – проректор по образовательной деятельности, кандидат технических наук, доцент кафедры разработки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений (тел.: +007 812 328 84 20, e-mail: Petrakov_DG@pers.spmi.ru).

Maksim A. Popov – PhD student at the Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields (tel.: +007 812 328 84 20, e-mail: maksim_anatolyevich@mail.ru). The contact person for correspondence.

Dmitry G. Petrakov (Author ID in Scopus: 57015158900) – Vice-Rector for Educational Activities, PhD in Engineering, Associate Professor at the Department of Development and Operation of Oil and Gas Fields (tel.: +007 812 328 84 20, e-mail: Petrakov_DG@pers.spmi.ru).

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:

Попов М.А., Петраков Д.Г. Исследование устойчивости песчаных горных пород // Недропользование. – 2022. – Т.22, №1. – С.31–36. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.1.5

Please cite this article in English as:

Popov M.A., Petrakov D.G. Research of the Sandy Rocks Stability. *Perm Journal of Petroleum and Mining Engineering*, 2022, vol.22, no.1, pp.31-36. DOI: 10.15593/2712-8008/2022.1.5

Введение

Для понимания процессов разрушения призабойной зоны пласта (ПЗП), сопровождающихся выносом песчаных частиц в ствол скважины, необходимо учитывать причины разрушения, прочностные и другие геомеханические свойства пород. Сегодня существует необходимость прогнозирования возникновения данного негативного процесса, так как подбор оптимальной технологии крепления ПЗП позволит минимизировать пескопроявления в скважинах, снизить эксплуатационные затраты и увеличить добычу углеводородов на месторождении.

Модели прогнозирования выноса песчаных частиц создаются на этапе проектирования или в начале разработки месторождения и являются основой для выбора оптимального заканчивания скважины, конструкции скважины, режима ее эксплуатации и компоновки наземного оборудования.

Для создания оптимальной модели песчаных пластов необходимо учитывать ряд факторов, нарушающих устойчивость горных пород.

Цель работы – выявление факторов, влияющих на устойчивость горных пород с учетом изменения насыщенности и физико-механических свойств коллектора.

Анализ существующих методов моделирования песчаных горных пород

Сегодня в качестве основных методов моделирования песчаных пород выделяют:

1. Эмпирический метод, опирающийся на промысловые данные. Суть эмпирического метода заключается в прогнозировании зависимости скважинных данных, получаемых при добыче песка, от промысловых данных коллектора. Учитываются различные факторы, влияющие на устойчивость горной породы: фильтрационно-емкостные свойства пород; параметры, связанные со скоростью фильтрации флюида; упругие и прочностные свойства пород и т.д. [1].

2. Лабораторное моделирование. Данный метод основан на воссоздании пластовых условий в лаборатории и определении предпосылок для выноса песчаных частиц. В качестве объекта исследований используются пластовые керны или насыпные модели. Следует отметить, что данный подход находится в сильной зависимости от экспериментального оборудования, качества и количества ядерного материала и сопряжен с большими временными затратами [2].

3. Численный метод. Суть метода заключается в определении зависимости поведения пород под воздействием упругих и пластических деформаций. Метод охватывает большое количество входных параметров, вследствие чего характеризуется высокой точностью и

достоверностью, с одной стороны, и большими затратами времени – с другой [3].

4. Аналитический метод. Метод основан на математических вычислениях и учете структурных неоднородностей и напряжений и их влиянии на стабильность и прочностные характеристики песчаных горных пород [4, 5].

С целью получения наиболее точного прогноза разрушения призабойной зоны пласта с последующим выносом механических частиц используется совокупность этих методов, так как ни один из них в отдельности не позволяет получить исчерпывающие данные для прогноза, кроме того, этот процесс в целом сложно предсказать и требует в некотором роде творческого подхода [6, 7].

Входные параметры для моделирования песчаных горных пород

Все породы-коллекторы можно представить в виде совокупности геологических, физико-механических и фильтрационных характеристик [1, 8]. На них также оказывают влияние различные геологические условия, условия освоения и эксплуатации скважин (рис. 1) [9, 10].

Основными физико-механическими свойствами горных пород являются: пластичность, плотность, упругость, прочность, твердость, абразивность, хрупкость, водопроницаемость и т.д. [11, 12]. Они определяются методами механики деформируемого твердого тела на основе теорий упругости, пластичности и ползучести [13, 14].

Такие геологические свойства, как структура, текстура, минералогический состав и тип порового пространства являются определяющими. Например, Г.Г. Литвинский в своем труде [13] делает вывод о том, что процесс рассмотрения прочностных характеристик пород невозможен без учета структурных неоднородностей. Основным дефектом, влияющим на прочность породы, по его мнению, являются трещины. Имея размеры от долей миллиметра до нескольких метров, они оказывают существенное влияние на механические свойства пород и фильтрацию флюидов.

В работе Л.Л. Бачурина [15] на основе проведения экспериментов для определения трещиностойкости песчаников был сделан вывод, что трещины есть практически во всех горных породах. А.К. Носач в своем исследовании [16] определил, что трещины в песчаных породах образуются из-за взаимопроникновения частиц цемента и кварца, различия пластических свойств компонентов породы, а также возникают внутри самих частиц из-за сдавливания горной породы.

Для моделирования пескопроявлений также необходимо учитывать фильтрационные характеристики горных пород [17]. В гидромеханике рассматривается фильтрация одно- и многофазных систем в различных по однородности средах [18].



Рис. 1. Факторы, влияющие на устойчивость горных пород [9]

Процессы водо- и пескопроявления – взаимосвязаны. Заключительная стадия разработки месторождения очень часто характеризуется высокой обводненностью продукции вследствие прорыва воды к забою скважины. Этот процесс является одним из главных причин выноса песка. А.Г. Латыпов в своей работе объясняет разрушение скелета породы при прорыве воды вымыванием цементирующего вещества и падением коэффициента внутреннего трения покоя породы [19]. Кроме того, вода, взаимодействуя с твердой породой, вызывает возникновение разности давления, что способствует фильтрации жидкости через каналы пласта. Таким образом, вода является катализатором появления новых дефектов в пласте-коллекторе, что может привести к ее разрушению.

А.Т. Карманский [20] в своей работе проводит анализ прочности различных горных пород от влажности (рис. 2). Установлено, что прочность породы на сжатие и прочность при других напряженных состояниях находится в обратной зависимости от количества влаги в пласте. Иными словами, при увеличении содержания воды в породе уменьшается ее прочность, возрастает вероятность разрушения пласта-коллектора [21].

При моделировании песчаных породы необходимо рассматривать прочность коллектора как совокупность различных дефектов и несовершенств, имеющих различное происхождение и оказывающих различное влияние на породу.

Модель должна учитывать совокупность геологических, физико-механических и фильтрационных методов. Все это позволит составить наиболее точную модель пласта для прогнозирования пескопроявлений из песчаных пластов-коллекторов.

Таким образом, физическую модель песчаника можно представить в виде совокупности четырех компонентов: зерен песка, цементирующего глинистого вещества, воды и трещин. Песчаная порода характеризуется более прочными зёрнами песка и связывающим их значительно менее прочным цементирующим веществом. Трещины в совокупности с вымывающей цементирующее вещество водой приводят к снижению прочности породы, вплоть до критических значений [22, 23].

Геологические свойства песчаных пород

Геологические свойства горных пород определяются на основе анализа зерна. Главной целью изучения зерна, добытого из скважин, является получение информации о геологическом строении пласта, расположении зон нефтегазоводонасыщенности, положении покровов и коллекторов.

Специфичность метода изучения зерна заключается в том, что данные о строении пласта достоверно можно получить только в вертикальном направлении в пределах самого зерна (толщина пласта, его строение). Данные в горизонтальном направлении рассчитывают теоретически, принимая во внимание керны скважин из района с похожим геологическим строением. Выборочный характер отбора зерна также обуславливает сложность исследований [25].

В качестве основных характеристик осадочных горных пород можно выделить: структуру, текстуру, состав, наличие и тип пустотного пространства.

Структура горных пород характеризует соотношение зерен пород, их размер и морфологию. Ее определяют макроскопически или с использованием трафаретов (рис. 3).

Гранулометрический состав является базовым параметром для классификации осадочных пород. Популярная классификация разделяет обломочные частицы на группы по размерам 0,01–0,1; 0,1–1; 1–10 мм и так далее.

В процессе анализа зерна необходимо учитывать еще одну важную характеристику породы, а именно текстуру. Она определяет расположение слоев пород относительно друг друга и породы в целом и, как и структура, позволяет оценить фильтрационные свойства породы-коллектора.

Процесс описания текстуры зерна делится на два этапа:

1. Сначала определяется первичная текстура породы (седиментационная), показывающая распределение слоев в процессе осадконакопления.

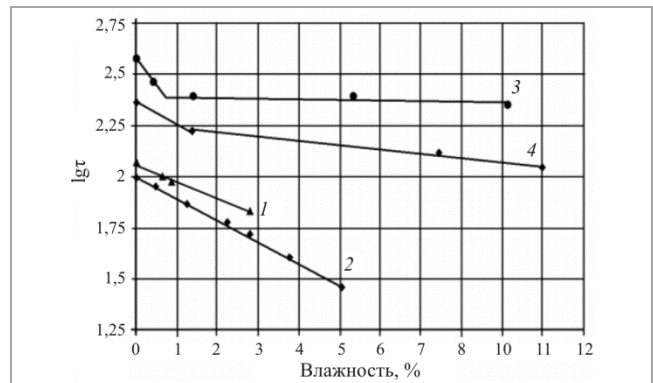


Рис. 2. График зависимости логарифма касательного напряжения от влажности породы [21]: lgt – логарифм касательного напряжения; 1 – среднезернистый песчаник; 2 – каинитовая порода; 3 – кварцевый песчаник; 4 – горючий сланец

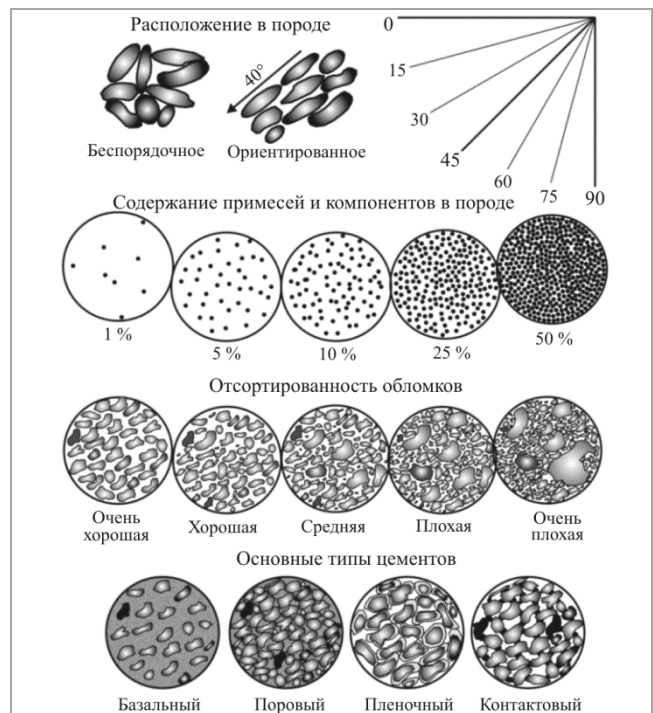


Рис. 3. Трафарет для описания терригенных пород [26]

2. Принимаются во внимание вторичные процессы, которые оказывали влияние на молодую породу в процессе ее формирования и погружения вглубь Земли. На основе этого определяется вторичная (наложенная) текстура породы.

В качестве первичных текстур выделяют: неслоистые (однородные либо с вкраплениями), слоистые (горизонтально-, косо- и волнисто-слоистые) и слоеватые (слои неявно выраженные).

После макроскопического анализа пород такая характеристика, как состав терригенной породы, уточняется на микроскопическом уровне.

Цементирующее вещество чаще всего представлено глинистым (каолинит, хлорит), кремнистым (кварц), карбонатным (сидерит, кальцит, доломит) и железистым (гематит, гидроксиды железа) составом, реже глауконитом и пиритом. От состава цемента зависит характер и степень разрушения породы под воздействием внешних сил.

Из работы [27] можно сделать вывод, что наличие глинистого материала в качестве связующего компонента является негативным фактором для фильтрационных свойств пласта [28]. От состава глин зависят коллекторские свойства, а также характер и степень разрушения породы под воздействием внешних сил [29, 30].



Рис. 4. Классификация поровых каналов по их размерам [26]

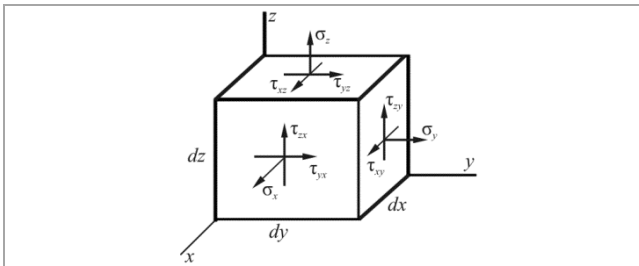


Рис. 5. Компоненты напряжений, действующих на горную породу [31]

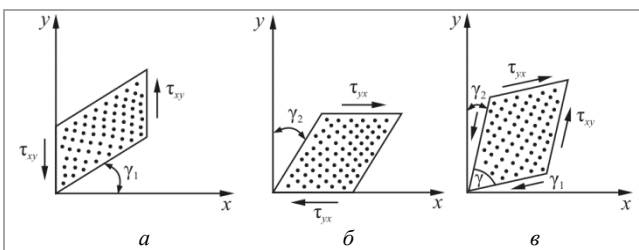


Рис. 6. Деформация сдвига (а-в) под действием касательных компонент напряжений [31]

Пустотное пространство горных пород представлено тремя основными видами.

1. Поры. Весьма распространенный вид в терригенных породах. Пустоты расположены в свободном пространстве между зернами.

2. Каверны. Встречаются в основном в карбонатных либо в терригенных породах с высокой карбонатностью. Представляют собой относительно крупные пустоты, образованные в результате выщелачивания породы.

3. Трещины. Данный тип пустотного пространства представлен во всех горных породах и является результатом тектонической деятельности. Оказывает основное влияние на движение флюидов.

Горная порода является, как правило, совокупностью представленных видов пустот.

Пустоты классифицируются на первичные (образовавшиеся во время седименто- и диagenеза) и вторичные (результат последующих процессов разрушения, перекристаллизации, растворения и прочего).

Главными характеристиками пустотного пространства, которые влияют на коллекторские свойства горных пород, являются размеры поровых каналов (рис. 4), их степень сообщаемости и пространственное распределение. На основе анализа этих показателей определяется тип коллектора по пустотно-поровому пространству.

Таким образом, в качестве входных параметров для моделирования песчаных горных пород можно выделить следующие геологические свойства: структуру, текстуру, минералогический состав и тип пустотного пространства. Грамотный анализ позволит найти и определить зависимости между свойствами пород и их прочностными характеристиками.

Механические свойства горных пород

Горная порода, испытывая давление вышележащих толщ, находится в постоянном напряженном состоянии. Различные тектонические силы и физико-химические реакции также оказывают воздействие на породу-коллектор.

Для определения физико-химических свойств горной породы ее можно представить в виде элементарного объема

(рис. 5). На каждую грань объема воздействуют нормальные (σ) и касательные (τ) компоненты напряжения. Нормальные компоненты напряжения действуют по оси, перпендикулярной граням, а касательные лежат на плоскости этих граней.

Совокупность указанных напряжений называют тензором напряжения и представляют в виде:

$$T = \begin{Bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{Bmatrix}.$$

За счет воздействия нормальных компонент напряжений σ порода испытывает растяжение и сжатие. Касательные составляющие тензора напряжений отвечают за сдвиговую деформацию (рис. 6).

К числу основных механических свойств горных пород относят прочностные, деформационные и реологические.

Прочностные характеристики горных пород рассматривают исходя из масштаба разрушений. Выделяют несколько уровней [32]:

1. Мегаскопический. Проявляется при открытых разработках массива пород, при обвалах и т.д. На этом уровне основными критериями прочности выступают трещины и крупные нарушения.

2. Макроскопический. Этот уровень разрушений характерен для разрушения пород различными механическими инструментами. Прочность в таком случае зависит от пористости, трещиноватости породы, контакта различных слоев.

3. Микроскопический. Возникает при истирании горных пород. На этом уровне прочность характеризуется наличием в породе микроскопических дефектов и нарушений, так как нарушается взаимосвязь отдельных зерен, слагающих массив.

Так как отдельно взятый образец породы не способен в полной мере отразить геологические нарушения во всем массиве, вводится критерий структурного ослабления, учитывающий разницу прочностных характеристик на различных уровнях.

$$R_{сж} = K_c \cdot \sigma_{сж},$$

где $R_{сж}$ – прочность на сжатие всего массива; K_c – коэффициент структурного ослабления; $\sigma_{сж}$ – прочность на сжатие отдельного образца.

Для определения деформационных свойств горной породы строятся диаграммы деформирования, учитывающие допредельные, предельные и запредельные состояния [33, 34].

Допредельное состояние породы – состояние горного массива, при котором под воздействием нагрузок еще не возникает разрушение. Оно характеризуется модулем деформации E_d , который всегда меньше модуля упругости E .

Характеристикой запредельного состояния является модуль спада M . При увеличении этого параметра нарушается деформационно-пространственная устойчивость породы, изменяются ее прочностные характеристики, возрастает вероятность хрупкого разрушения.

Способность массива сопротивляться разрушению при длительной нагрузке зависит от реологических свойств породы. К таковым относятся: длительная прочность, ползучесть, релаксация напряжений [35, 36].

Причины пескопроявлений в скважинах

Пространственная стабильность песчаных пород-коллекторов зависит от целого ряда причин. В качестве основных факторов, оказывающих влияние на пескопроявления в скважинах, можно выделить [37, 38]:

1. Степень цементированности песчаного коллектора.
2. Вязкость пластового флюида.
3. Депрессию на пласт.
4. Скорость движения флюида в пласте.
5. Напряжения в призабойной зоне пласта.
6. Загрязненность призабойной зоны.

Можно систематизировать причины образования свободных частиц песка в пласте-коллекторе и разделить их на три главные группы: неконсолидированные породы, превышение компрессионных сил, миграция мелких частиц (рис. 7) [39].

Важную роль в процессе пескопроявления играет способ заканчивания скважин [40]. В случае, если скважина оборудована открытым забоем, устойчивость породы призабойной зоны главным образом зависит от напряжений, включающих горное давление и фильтрационные напряжения. В обсаженной скважине, помимо этого, вступают в силу напряжения системы «труба – цемент – порода» [27, 41].

Критерии формирования исследований на естественных и искусственных кернах

Прогнозирование механических характеристик с использованием современных методов моделирования связано главным образом с определением взаимосвязи между различными физическими параметрами [42].

Прогнозировать поведение породы и вынос из нее механических частиц можно на основе физического моделирования. Существует два типа физических моделей фильтрации пластовых флюидов – лабораторные модели с искусственной пористой средой (песок, стеклянные шарики и т.д.) или естественные образцы пород (керны) [43, 44].

Искусственный керн представляет собой приближенную модель слабцементированного коллектора. Его создают из смеси песка, цемента и воды с использованием набивки или пресса [45]. Естественный керн – образец реальной геологической среды. Он представляет собой полное подобие коллектора.

Определение зависимостей для естественных или искусственных кернов позволит создать релевантную модель поведения пласта-коллектора для оперативного прогнозирования вероятности пескопроявления с учетом изменения режима и условий эксплуатации.

Заключение

Определены основные входные параметры, которые необходимо учитывать при экспериментальных исследованиях для создания математической или физической модели песчаных пород.

Библиографический список

1. Sand Production Prediction Review: Developing an Integrated Approach / C.A.M. Veeken, D.R. Davies, C.J. Kenter, A.P. Kooijman // Paper SPE 22792 presented at 66th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers. – Dallas, 1991. DOI: 10.2118/22792-MS
2. Practical approach to accuracy in sanding prediction / K. Qui, J.R. Marsden, J. Alexander, A. Retnanto, O.A. Abdelkarim // Paper SPE 100944 presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition. – Adelaide, Australia, 2006. DOI: 10.2523/100944-MS
3. Aborisade O.M. Practical approach to effective sand prediction, control and management // A thesis presented to the Department of Petroleum Engineering. – African University of science and Technology, Nigeria, 2011. – 94 p.
4. Moore W.R. Sand Production Prediction // J Petrol Technol: 955. SPE 29331-PA. – 1994. DOI: 10.2118/29331-PA
5. Analytical prediction model of sand production integrating geomechanics for open hole and cased-perforated wells / E.F. Araujo-Guerrero, G.A. Alzate, A. Arbelaez-Londono, S. Pena, A. Cardona, A. Naranjo // SPE heavy and extra heavy oil conference, Society of Petroleum Engineers (SPE). – 2014. DOI: 10.2118/171107-MS
6. Тананыхин Д.С., Максютин А.В., Султанова Д.А. Анализ моделей прогнозирования пескопроявления при эксплуатации слабцементированных коллекторов // Современные проблемы науки и образования. – 2015. – № 1. – С. 334-338.
7. Молчанов А.А., Агеев П.Г. Внедрение новых технологий – надежный путь извлечения остаточных запасов месторождений углеводородов // Записки Горного института. – 2017. – Т. 227. – С. 530-539. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.530
8. Тананыхин Д.С. Обоснование технологии крепления слабцементированных песчаников в призабойной зоне нефтяных и газовых скважин химическим способом: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2013.
9. Химические методы предупреждения пескопроявления и крепления слабцементированных коллекторов при разработке нефтяных и газовых месторождений / Д.С. Тананыхин, А.В. Петухов, О.Б. Сюзев // Нефтегазовое дело. – 2012. – Вып. 10, № 1. – С. 16-22.
10. Goshdashti K., Elyasi A., Naeimipour A. Numerical assessment of the mechanical stability in vertical, directional and horizontal wellbores // International Journal of Mining Science and Technology. – 2013. – Vol. 23 (6). – P. 937-942. DOI: 10.1016/j.ijmst.2013.11.010
11. Абатуров В.Г. Физико-механические свойства горных пород и породоразрушающий буровой инструмент. – Тюмень: Изд-во «Нефтегазовый университет», 2007. – 238 с.
12. Dardis O., McCloskey J. Permeability porosity relationships from numerical simulations of fluid flow // Geophys Res Lett. – 1998. – Vol. 25 (9). – P. 1471-1474. DOI: 10.1029/98GL01061
13. Литвинский Г.Г. Аналитическая теория прочности горных пород и массивов: моногр. / ДонГТУ. – Донецк: Норд-Пресс, 2008. – 207 с.
14. Порцевский А.К., Катков Г.А. Основы физики горных пород, геомеханики и управления состоянием массива. – М.: Изд-во Моск. гос. открытого ун-та, 2004. – 120 с.
15. Бачурин Л.Л., Ревва В.Н. Обоснование параметров начальной микротрещины для определения трещиностойкости песчаников способом разрыва дисковых образцов // Геотехническая механика. – 2012. – Вып. 098.
16. Носач А.К., Рязанцева Н.А., Бачурин Л.Л. Характер распространения трещин в слоистых осадочных горных породах // Сб. науч. тр. Национальной горной академии Украины. – 2002. – Т. 2, № 13.
17. Kristinof R., Ranjith P., Choi S. Finite element simulation of fluid flow in fractured rock media // Environ Earth Sci. – 2010. – Vol. 60 (4). – P. 765-773. DOI: 10.1007/s12665-009-0214-2
18. Оценка влияния градиентов водонасыщенности и капиллярного давления на формирование размера зоны двухфазной фильтрации в сжимаемом низкопроницаемом коллекторе / В.А. Коротенко, С.И. Грачев, Н.П. Кушакова, С.Ф. Мулявин // Записки Горного института. – 2020. – Т. 245. – С. 569-581. DOI:10.31897/PMI.2020.5.9
19. Лапынов А.Г. Геотехнологические особенности эксплуатации газовых скважин в слабцементированных пластах-коллекторах // Нефтегазовое дело. – 2004. – Т. 2. – С. 83-89.
20. Карманский А.Т. Экспериментальное обоснование прочности и разрушения насыщенных осадочных горных пород: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 2010. – 275 с.
21. Бондарев Э.А., Рожин И.И., Аргунова К.К. Влагосодержание природного газа в призабойной зоне пласта // Записки Горного института. – 2018. – Т. 233. – С. 492-497. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.492
22. Особенности учета анизотропии проницаемости в гидродинамической модели / Р.И. Ермаков, В.П. Меркулов, О.С. Чернова, М.О. Коровин // Записки Горного института. – 2020. – Т. 243. – С. 299-304. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.299
23. Применение комплексного подхода для геологического моделирования трещиноватых коллекторов Западно-Сибирского фундамента (на примере Малоюжского месторождения) / О.В. Пинус, Д.Ю. Ворисенко, С.Ю. Вахир, Е.П. Соколов, А. Зеллоу // Геология нефти и газа. – 2006. – № 6. – С. 38-42.
24. Бондаренко В.А. Повышение крепления призабойной зоны пласта с целью снижения пескопроявлений (на примере месторождений Краснодарского края): автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Краснодар, 2014.
25. Krumbein W.C., Sloss L.L. Stratigraphy and Sedimentation. – 2nd ed. – San Francisco, CA: W.H. Freeman and Co., 1963.
26. Недолюков Н.М. Исследование керна нефтегазовых скважин: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2006. – 170 с.
27. Тер-Саркисов Р.М. Разработка месторождений природных газов. – М.: Недра, 1999.
28. Worden R.H., Morad S. Clay minerals in sandstones: controls on formation, distribution and evolution // Clay mineral in sandstones, International Association of Sedimentologists. – 2003. – P. 1-41. DOI: 10.1002/9781444304336.ch1



Рис. 7. Предпосылки и причины пескопроявлений в скважинах [36]

Для комплексного и точного моделирования песчаных горных пород следует принимать во внимание следующие параметры:

1. Компонентный состав породы (необходимо задать компоненты, которые будут составлять модель).
2. Параметры компонентов породы (отношение долей песчаных частиц, цементирующих веществ и воды к массе всей породы).
3. Параметры песчаника (проницаемость, пористость, плотность песчаных частиц, цементирующих веществ и воды).
4. Геологические свойства песчаника (структура, текстура, состав, наличие и тип пустотного пространства и т.д.).
5. Механические свойства песчаника (прочностные, деформационные и реологические свойства).
6. Хрупкость, пластичность породы, характер и параметры разрушения.

Исследования по моделированию песчаных пластов дают возможность прогнозировать поведение пластов-коллекторов в процессе их эксплуатации, а также предсказывать процессы пескопроявлений в скважинах, что значительно увеличит производительность как одной скважины в частности, так и всего месторождения в целом.

29. Кобранова В.Н. Петрофизика. – М.: Недра, 1986. – 392 с.
 30. Brace W. Permeability of crystalline and argillaceous rocks // *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. – 1980. – Vol. 17. – P. 241–251. DOI: 10.1016/0148-9062(80)90807-4
 31. Карасев М.А., Трушко В.Л., Беляков Н.А. Механика сплошной среды: учеб. пособие. – СПб.: Лема, 2019.
 32. Деметьев А.В. Геомеханика: лабораторный практикум: учеб. пособие. – Кемерово: КузГТУ имени Т.Ф. Горбачева, 2015. – 104 с.
 33. Барон Л.И., Веселов Г. М., Кошин Ю.Г. Экспериментальные исследования процессов разрушения горных пород ударом. – М.: Изд-во АН СССР, 1962. – 120 с.
 34. Паспорта прочности горных пород и методы их определения / М.М. Протодаконов, М.И. Койфман, С.Е. Чирков, М.Ф. Кунтыш, Р.И. Тедер. – М.: Наука, 1964. – 129 с.
 35. An analytical model to predict the volume of sand during drilling and production / R. Gholami, B. Aadnoy, V. Rasouli, N. Fakhari // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. – 2016. – Vol. 8 (4). – P. 521–532. DOI: 10.1016/j.jrmge.2016.01.002
 36. Parametric study of sand-production prediction: analytical approach / N. Morita, D.L. Whitfill, O.P. Fedde, T.H. Levik // *SPE Production Engineering*. – 1989. – Vol. 4 (1). – P. 25–33. DOI: 10.2118/16990-PA
 37. Попов М.А., Петраков Д.Г. Исследование режимов эксплуатации газовых скважин в осложненных условиях // *Недропользование*. – 2021. – Т. 21, № 1. – С. 36–41. DOI: 10.15593/2712-8008/2021.1.6
 38. Лаврентьев А.В., Антианиди Д. Г. Анализ причин и последствий пескопроявлений на завершающей стадии разработки нефтяных и газовых месторождений // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. – 2015. – № 4. Спец. вып. № 10 (отдельные статьи). – 32 с.
 39. Рекомендованные методики по выбору способа заканчивания скважин в условиях пескопроявления / Корпоративный научно-технический центр ОАО «НК «Роснефть». Управление новых технологий, 2011.
 40. Ахметов А.А. Капитальный ремонт скважин на Уренгойском месторождении. Проблемы и решения. – Уфа: РИО УГНТУ, 2000. – 209 с.
 41. Papamichos E., Furu E. Sand production initiation criteria and their validation // 47th US rock mechanics/geomechanics symposium, American Rock Mechanics Association (ARMA), 2013. – P. 198–206.
 42. Zhou X., Xiao N. A novel 3D geometrical reconstruction model for porous rocks // *Eng Geol.* – 2017. – Vol. 228. – P. 371–384. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.08.021
 43. Аксенова Н.А., Овчинников В.П., Анашкина А.Е. Технология и технические средства заканчивания скважин с неустойчивыми коллекторами: моногр. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2018. – 134 с.
 44. Katz A., Thompson A. Quantitative prediction of permeability in porous rock // *Phys Rev B*. – 1986. – Vol. 34 (11). – P. 8179–8181. DOI: 10.1103/physrevb.34.8179
 45. Al-Shaabi S.K., Al-Ajmi A.M., Al-Wahaibi Y. Three dimensional modeling for predicting sand production // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. – 2013. – Vol. 109. – P. 348–363. DOI: 10.1016/j.petrol.2013.04.015

References

1. Veeken C.A.M., Davies D.R., Kenter C.J., Kooijman A.P. Sand Production Prediction Review: Developing an Integrated Approach. *Paper SPE 22792 presented at 66th Annual Technical Conference and Exhibition of the Society of Petroleum Engineers*, Dallas, 1991. DOI: 10.2118/22792-MS
 2. Qui K., Marsden J.R., Alexander J., Retnanto A., Abdelkarim O.A. Practical approach to accuracy in sanding prediction. *Paper SPE 100944 presented at the SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, Adelaide, Australia, 2006. DOI: 10.2523/100944-MS
 3. Aborisade O.M. Practical approach to effective sand prediction, control and management. *A thesis presented to the Department of Petroleum Engineering. African University of science and Technology, Nigeria*, 2011, 94 p.
 4. Moore W.R. Sand Production Prediction. *J Petrol Technol: 955. SPE 29331-PA*, 1994. DOI: 10.2118/29331-PA
 5. Araujo-Guerrero E.F., Alzate G.A., Arbelaz-Londono A., Pena S., Cardona A., Naranjo A. Analytical prediction model of sand production integrating geomechanics for open hole and cased-perforated wells. *SPE heavy and extra heavy oil conference, Society of Petroleum Engineers (SPE)*, 2014. DOI: 10.2118/171107-MS
 6. Tananykhin D.S., Maksutiin A.V., Sultanova D.A. Analiz modelei prognozirovaniia peskoproyavleniia pri ekspluatatsii slabostsementirovannykh kollektorov [Review of sand prediction models during the operation of unconsolidated formations]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, 2015, no. 1, pp. 334–338.
 7. Molchanov A.A., Ageev P.G. Vnedrenie novykh tekhnologii – nadezhnyi put' izvlecheniia ostatochnykh zapasov mestorozhdenii uglevodorodov [Implementation of new technology is a reliable method of extracting reserves remaining in hydro-carbon deposits]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2017, vol. 227, pp. 530–539. DOI: 10.25515/PMI.2017.5.530
 8. Tananykhin D.S. Obosnovanie tekhnologii krepneniia slabostsementirovannykh peschanikov v prizaboinoi zone neftiannykh i gazovykh skvazhin khimicheskim sposobom [Substantiation of the technology of fastening weakly cemented sandstones in the bottomhole zone of oil and gas wells by chemical method]. Abstract of Ph. D. thesis. Saint Petersburg, 2013.
 9. Tananykhin D.S., Petukhov A.V., Siuzev O.B. Khimicheskie metody preduprezhdeniia peskoproyavleniia i krepneniia slabostsementirovannykh kollektorov pri razrabotke neftiannykh i gazovykh mestorozhdenii [Prevention of sand-related problems and consolidation of slightly cemented reservoir by chemical methods during the development of oil and gas fields]. *Neftegazovoe delo*, 2012, iss. 10, no. 1, pp. 16–22.
 10. Goshtasbi K., Elyasi A., Naeimipour A. Numerical assessment of the mechanical stability in vertical, directional and horizontal wellbores. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2013, vol. 23 (6), pp. 937–942. DOI: 10.1016/j.ijmst.2013.11.010
 11. Abaturov V.G. Fiziko-mekhanicheskie svoystva gornykh porod i porodorazrushaiushchii burovoi instrument [Physical and mechanical properties of rocks and rock cutting drilling tools]. *Tiumen': Neftegazovyi universitet*, 2007, 238 p.
 12. Dardis O., McCloskey J. Permeability porosity relationships from numerical simulations of fluid flow. *Geophys Res Lett*, 1998, vol. 25 (9), pp. 1471–1474. DOI: 10.1029/98GL01061
 13. Litvinskii G.G. Analiticheskaiia teoriia prochnosti gornykh porod i massivov [Analytical theory of strength of rocks and massifs]. Donetsk: Nord-Press, 2008, 207 p.
 14. Portsevskii A.K., Katkov G.A. Osnovy fiziki gornykh porod, geomekhaniki i upravleniia sostoianiem massiva [Fundamentals of rock physics, geomechanics and rock mass management]. Moscow: Moskovskii gosudarstvennyi otkrytyi universitet, 2004, 120 p.
 15. Bachurin L.L., Revva V.N. Obosnovanie parametrov nachalnoi mikrotreshchiny dlia opredeleniia treshchinostoikiosti peschanikov sposobom razryva diskovykh obratsov [Substantiation of the parameters of the initial microcrack to determine the fracture toughness of sandstones by the method of fracturing disk specimens]. *Geotekhnicheskaiia mekhanika*, 2012, iss. 098.
 16. Nosach A.K., Riazanovskaya N.A., Bachurin L.L. Kharakter rasprostraneniia treshchin v sloistykh osadochnykh gornykh porodakh [The nature of crack propagation in layered sedimentary rocks]. *Sbornik nauchnykh trudov Natsionalnoi gornoj akademii Ukrainy*, vol. 2, no. 13.
 17. Kristinof R., Ranjith P., Choi S. Finite element simulation of fluid flow in fractured rock media. *Environ Earth Sci.*, 2010, vol. 60 (4), pp. 765–773. DOI: 10.1007/s12665-009-0214-2
 18. Korotenko V.A., Grachev S.I., Kushakova N.P., Muliavin S.F. Otsenka vliianiia gradientov vodonasyshchennosti i kapillarnogo davleniia na formirovanie razmera zony dvukhfaznoi filtratsii v szhizhaimom nizkopronitsaemom kollektore [Assessment of the Influence of Water Saturation and Capillary Pressure Gradients on Size Formation of Two-Phase Filtration Zone in Compressed Low-Permeable Reservoir]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2020, vol. 245, pp. 569–581. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.9
 19. Latypov A.G. Geotekhnologicheskie osobennosti ekspluatatsii gazovykh skvazhin v slabostsementirovannykh plastakh-kollektorakh [Geotechnological features of gas wells operation in weakly cemented reservoirs]. *Neftegazovoe delo*, 2004, vol. 2, pp. 83–89.
 20. Karmanskiy A.T. Eksperimental'noe obosnovanie prochnosti i razrusheniia nasyshchennykh osadochnykh gornykh porod [Experimental substantiation of the strength and destruction of saturated sedimentary rocks]. Doctor's degree dissertation. Saint Petersburg, 2010, 275 p.
 21. Bondarev E.A., Rozhin I.I., Argunova K.K. Vlagosoderzhanie prirodnoho gaza v prizaboinoi zone plasta [Moisture content of natural gas in bottom hole zone]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2018, vol. 233, pp. 492–497. DOI: 10.31897/PMI.2018.5.492
 22. Ermekov R.I., Merkulov V.P., Chernova O.S., Korovin M.O. Osobennosti ucheta anizotropii pronitsaemosti v gidrodinamicheskoi modeli [Features of permeability anisotropy accounting in the hydrodynamic model]. *Zapiski Gornogo instituta*, 2020, vol. 243, pp. 299–304. DOI: 10.31897/PMI.2020.3.299
 23. Pinus O.V., Vorisenok D.Iu., Vakhris S.Iu., Sokolov E.P., Zellou A. Primenenie kompleksnogo podkhoda dlia geologicheskogo modelirovaniia treshchinovatykh kollektorov Zapadno-Sibirskogo fundamenta (na primere Maloichskogo mestorozhdeniia) [Using of multiple approach for geological simulation of fractured reservoirs of West Siberian basement (with reference to Maloichskoye field)]. *Geologiya nefti i gaza*, 2006, no. 6, pp. 38–42.
 24. Bondarenko V.A. Povysheniie krepneniia prizaboinoi zony plasta s tsel'iu snizheniia peskoproyavlenii (na primere mestorozhdenii Krasnodarskogo kraia) [Increasing the bottom-hole formation reinforcement to reduce sand intrusions (on the example of fields in the Krasnodar Territory)]. Abstract of Ph. D. thesis. Krasnodar, 2014.
 25. Krumbain W.C., Sloss L.L. Stratigraphy and Sedimentation. 2nd ed. San Francisco, CA: W.H. Freeman and Co., 1963.
 26. Nedolivko N.M. Issledovanie kerna neftegazovyi skvazhin [Study of core oil and gas wells]. Tomsk: Tomskii Politekhnikeskii universitet, 2006, 170 p.
 27. Ter-Sarkisov R.M. Razrabotka mestorozhdenii prirodnykh gazov [Development of natural gas fields]. Moscow: Nedra, 1999.
 28. Worden R.H., Morad S. Clay minerals in sandstones: controls on formation, distribution and evolution. *Clay mineral in sandstones, International Association of Sedimentologists*, 2003, pp. 1–41. DOI: 10.1002/9781444304336.ch1
 29. Kobranova V.N. Petrofizika [Petrophysics]. Moscow: Nedra, 1986, 392 p.
 30. Brace W. Permeability of crystalline and argillaceous rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1980, vol. 17, pp. 241–251. DOI: 10.1016/0148-9062(80)90807-4
 31. Karasev M.A., Trushko V.L., Belyakov N.A. Mekhanika sploshnoi sredy [Continuum mechanics]. Saint Petersburg: Lema, 2019.
 32. Demetiev A.V. Geomekhanika: laboratornyi praktikum [Geomechanics: laboratory workshop]. Кемерово: Kuzbasskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet imeni T.F. Gorbacheva, 2015, 104 p.
 33. Барон Л.И., Веселов Г.М., Конишин Ю.Г. Экспериментальные исследования процессов разрушения горных пород ударом [Experimental studies of the processes of destruction of rocks by impact]. Moscow: AN SSSR, 1962, 120 p.
 34. Protod'iaonov M.M., Koifman M.I., Chirkov S.E., Kuntys M.F., Teder R.I. Pasporta prochnosti gornykh porod i metody ikh opredeleniia [Passports of strength of rocks and methods for their determination]. Moscow: Nauka, 1964, 129 p.
 35. Gholami R., Aadnoy V., Rasouli V., Fakhari N. An analytical model to predict the volume of sand during drilling and production. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2016, vol. 8 (4), pp. 521–532. DOI: 10.1016/j.jrmge.2016.01.002
 36. Morita N., Whitfill D.L., Fedde O.P., Levik T.H. Parametric study of sand-production prediction: analytical approach. *SPE Production Engineering*, 1989, vol. 4 (1), pp. 25–33. DOI: 10.2118/16990-PA
 37. Попов М.А., Петраков Д.Г. Исследование режимов эксплуатации газовых скважин в осложненных условиях [Study of Gas Wells Operation Regimes in Complicated Conditions]. *Недропользование*, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 36–41. DOI: 10.15593/2712-8008/2021.1.6
 38. Lavrentiev A.V., Antonidi D.G. Analiz prichin i posledstviy peskoproyavlenii na zavershaiushchei stadii razrabotki neftiannykh i gazovykh mestorozhdenii [Analysis of the causes and consequences of sand manifestations at the final stage of the development of oil and gas fields]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii buileten*, 2015, no. 4. Spets. vyp. No. 10 (otdelnye statii), 2015, 32 p.
 39. Рекомендованные методики по выбору способа заканчивания скважин в условиях пескопроявления [Recommended Methods for Choosing a Well Completion Technique in Sandy Conditions]. Корпоративный научно-технический центр ОАО «НК «Роснефть». Управление новых технологий, 2011.
 40. Akhmetov A.A. Kapital'nyi remont skvazhin na Urengoiskom mestorozhdenii. Problemy i resheniia [Capital repairs of wells at the Urengoy field. Problems and Solutions]. Ufa: RIO UGNUTU, 2000, 209 p.
 41. Papamichos E., Furu E. Sand production initiation criteria and their validation. *47th US rock mechanics/geomechanics symposium, American Rock Mechanics Association (ARMA)*, 2013, pp. 198–206.
 42. Zhou X., Xiao N. A novel 3D geometrical reconstruction model for porous rocks. *Eng Geol.*, 2017, vol. 228, pp. 371–384. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.08.021
 43. Аксенова Н.А., Овчинников В.П., Анашкина А.Е. Технология и технические средства заканчивания скважин с неустойчивыми коллекторами [Technology and technical means of well completion with unstable reservoirs]. Tiumen': Tiumenskii gosudarstvennyi neftegazovyi universitet, 2018, 134 p.
 44. Katz A., Thompson A. Quantitative prediction of permeability in porous rock. *Phys Rev B*, 1986, vol. 34 (11), pp. 8179–8181. DOI: 10.1103/physrevb.34.8179
 45. Al-Shaabi S.K., Al-Ajmi A.M., Al-Wahaibi Y. Three dimensional modeling for predicting sand production. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2013, vol. 109, pp. 348–363. DOI: 10.1016/j.petrol.2013.04.015

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.
 Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.