UDC 622.276.344
DOI https://doi.org/10.52171/herald.339

Gas Filtration in Reservoir Conditions Taking into Account the Skin Factor

X.I. Dadashzadeh[1], Sh.F. Musayeva[2]

[1]*Azerbaijan State Oil and Industry University (Baku, Azerbaijan)*
[2]*"Geotechnological problems of oil, gas and chemistry" RI (Baku, Azerbaijan)*

For correspondence:
Musayeva Shafa / e-mail: musashafa0809@gmail.com

Abstract

This article investigates the gas filtration under reservoir conditions with particular emphasis on the influence of the skin factor on the gas well productivity. The study focuses on the physical and chemical properties of the drilling muds and the well killing fluids, as well as the processes occurring in the bottomhole zone during the drilling and well operation. Unlike the oil wells, the bottomhole zone in the gas wells is characterized by more complex filtration conditions, where the formation of a skin zone creates additional hydraulic resistance and reduces the permeability of the near-wellbore region. The imperfect completion of gas wells leads to non-uniform flow caused by deformation of both the reservoir and the filtration stream, while the physical properties of the skin zone differ significantly from those of the undisturbed formation. The partial or complete contamination of the bottomhole zone results in the deterioration of filtration characteristics and considerable reservoir energy losses. To account for these effects, a method for calculating the skin factor during gas well operation is proposed. The relationship between the well flow rate and the skin factor is established, providing a basis for selecting appropriate treatment methods for the bottomhole zone in order to improve gas well productivity.

Keywords: permeability, contour and bottomhole pressure, dynamic viscosity, volumetric flow, density, temperature, skin-factor.

Submitted *12 December 2025*
Accepted *11 September 2026*
Published *25 September 2026*

For citation:
X.I. Dadashzadeh, Sh.F. Musayeva
[Gas Filtration in Reservoir Conditions Taking into Account the Skin Factor]
Herald of the Azerbaijan Engineering Academy, 2026, vol. 18 (3), pp. 27-34
ISSN (p): 2076-0515, ISSN (e): 2789-8245
© 2026 X.I. Dadashzadeh, Sh.F. Musayeva. This article is distributed under the terms of the **https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/** ***(CC BY-NC 4.0)***

Skin-faktorun nəzərə alınması ilə lay şəraitində qazın süzülməsi

X.İ. Dadaşzadə[1], Ş.F. Musayeva[2]
[1]*Azərbaycan Dövlət Neft və Sənaye Universiteti (Bakı, Azərbaycan)*
[2]*"Neftin, qazın geotexnoloji problemləri və kimya" ETİ (Bakı, Azərbaycan)*

Xülasə

Məqalədə lay şəraitində qazın süzülməsi prosesinə skin-zonanın təsiri tədqiq edilmişdir. Tədqiqatın məqsədi qaz quyularının istismarı zamanı quyudibi zonasının xüsusiyyətlərini, burada yaranan əlavə hidravlik müqavimətin süzülmə prosesinə təsirini və onun hasilata təsirini qiymətləndirməkdir. Tədqiqat qazma məhlullarının və quyu mayelərinin fiziki-kimyəvi xassələrinin, həmçinin quyudibi zonasının süzülmə xüsusiyyətlərinin təhlilinə əsaslanır. Müəyyən edilmişdir ki, neft quyularından fərqli olaraq qaz quyularında quyudibi zonasında baş verən mürəkkəb axın prosesləri layın və axının deformasiyası ilə müşayiət olunur. Bu zonada yaranan skin-zona əlavə süzülmə müqaviməti yaradaraq layın keçiriciliyini azaldır, onun fiziki xassələri isə layın əsas hissəsinin xassələrindən əhəmiyyətli dərəcədə fərqlənir. Quyudibi zonasının qismən və ya tam çirklənməsi süzülmə göstəricilərinin pisləşməsinə, lay enerjisinin itirilməsinə və quyu parametrlərinin dəyişməsinə səbəb olur. Məqalədə skin-zona nəzərə alınmaqla qaz quyusunun işçi parametrlərinin hesablanması və hasilatın skin-faktordan asılılığının qiymətləndirilməsi təqdim edilmişdir. Alınan nəticələr quyudibi zonasına müxtəlif üsullarla təsir etməklə qaz quyularının məhsuldarlığının artırılması üçün elmi-praktik əsas yaradır.

Açar sözlər: keçiricilik, kontur və quyudibi təzyiqi, dinamik özlülük, həcmi sərf, sıxlıq, temperatur, skin-faktor.

Фильтрация газа в пластовых условиях с учетом скин-фактора

Х.И. Дадашзаде[1], Ш.Ф. Мусаева[2]
[1]*Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности (Баку, Азербайджан)*
[2]*НИИ «Геотехнологические проблемы нефти, газа и химия» (Баку, Азербайджан)*

Аннотация

В статье исследуется процесс фильтрации газа в пластовых условиях с учетом влияния скин-зоны на производительность газовых скважин. Целью работы является оценка особенностей призабойной зоны и влияния дополнительного гидравлического сопротивления на фильтрационные характеристики и дебит газовых скважин. Исследование основано на анализе физико-химических свойств буровых растворов и жидкостей глушения, а также процессов, протекающих в призабойной зоне в период бурения и эксплуатации скважин. Показано, что, в отличие от нефтяных скважин, в газовых скважинах возникают более сложные неоднородные потоки, обусловленные деформацией пласта и фильтрационного потока. Формирование скин-зоны приводит к дополнительному фильтрационному сопротивлению, снижению проницаемости призабойной зоны, ухудшению фильтрационных свойств и потерям пластовой энергии, при этом физические свойства данной зоны существенно отличаются от свойств продуктивного пласта. В работе предложена методика расчета скин-фактора при эксплуатации газовых скважин и определена зависимость дебита скважины от величины скин-фактора. Полученные результаты позволяют обосновать применение различных методов воздействия на призабойную зону с целью повышения производительности газовых скважин.

Ключевые слова: проницаемость, контурное и забойное давление, динамическая вязкость, объемный расход, плотность, температура, скин-фактор.

Введение

Анализ показывает, что в данное время слово «модель» получило широкое распространение. С помощью модели можно определить процесс с различной степенью детализации с целью получения необходимых параметров или подтвердить предложенную гипотезу. Необходимо отметить, что моделирование ни в какой степени не заменяет изучения объекта, которое является основным источником информации о пласте или скважине, используемого и при моделировании.

Для решения данной задачи используются классические подходы к решению вопросов моделирования, которые заключаются в том, чтобы сформулировать основную задачу, описывающую физический процесс. Далее, вводя необходимое количество упрощающих допущений или формулировку проблемы, которая поддается лабораторному или теоретическому описанию теми или иными средствами.

В настоящее время компьютерные средства являются необходимой предпосылкой для дальнейшего развития моделирования. Учитывая компьютерную технику будут расширяться пределы использования моделирования при решении задач возрастающей сложности.

Сформулируем общие вопросы необходимые для инженеров, которые можно получить с помощью моделирования пласта и скважины.

1. Что нужно нефтянику для разработки и эксплуатации месторождений. Чтобы обеспечить оптимальную добычу углеводородов?
2. Какой наилучший способ вскрытия пласта?
3. Из какой части месторождения следует отбирать углеводороды?
4. Что можно сделать, чтобы увеличить нефтеотдачу пласта?
5. Как должен быть осуществлен проект увеличения нефтеотдачи с учетом экономического расчета?
6. Для более оптимальной разработки и эксплуатации какими промысловыми данными необходимо обладать?

Учитывая цели проводимого исследования, более реальная постановка оптимальных задач является важным этапом при выполнении любого моделирования. Анализ показывает, что в зависимости от целей исследований строят соответствующую модель. Из курса физики известно, что модель бывает двух типов: физическая и математическая. В физической модели можно выделить модели, поведение которых описывается теми же физическими законами, что и поведение изучаемого объекта. Кроме этого существуют модели, основанные на аналогии между различными физическими законами.

В основном рассматриваются следующие фильтрационные модели:

1. Практические, естественные физические модели;
2. Аналоговые модели;
3. Прикладные математические модели;

Цель работы

Определить влияния скин-зоны на производительность газовой скважины.

Постановка задачи

На основе модельного представления определить дебит газовых скважин, работающих в сложных условиях.

Решение задачи

На основе одномерного радиального модели решить сложную задачу по

фильтрациии газа в однородной пласте с учетом «скин-фактора».

В научном мире широко применяются физические модели, которые дают возможность изучить аналогичное явление на модели меньшего масштаба в лабораторных условиях. В основном, физические модели имеют ту же физическую природу, что и изучаемые объекты. На данных моделях проводятся исследования закономерностей анализируемого процесса. Основные выводы таких явлений есть моделирование, целью которого является получение различных характеристик фильтрации в пластовых условиях на основе результатов опытов.

Необходимо отметить, что модели строятся с учетом принципов подобных и природных процессов. Учитывая вышесказанное, размеры модели, свойства пласта, жидкости и газа выбирают в лабораторных условиях на основе геометрического и физического подобия модели и естественного объекта.

При этом, значение переменных величин, характеризующих процесс фильтрации для модели и для пласта определяются в зависимости от давления и температуры в сходные моменты времени в заданных точках трехмерного координатного пространства при условии их пропорциональности. Полученные результаты лабораторных экспериментов, поставленных на модели, могут быть перенесены на изучаемый нефтяной или газовый пласт путем пересчета, то есть умножением каждой из определенных величин на постоянный для всех них единый множитель - коэффициент подобия.

Результаты моделирования, выполненные на моделях, в более близком отношении повторяются в пространстве и во времени для процессов фильтрации в естественных масштабах пласта. При этом, необходимо указать, что модель позволяет исследовать основную роль любого параметра путем изменения его значения в других сериях экспериментов при постоянных значениях остальных параметров.

Отметим, что, учитывая сложность реальных процессов фильтрации пластовых углеводородов, полностью моделировать пласт почти невозможно. Учитывая вышесказанное, в большинстве случаев ограничиваются приближенным моделированием пласта.

В данной работе предлагается изучение математической модели, представляющей собой приближенное описание поведения изучаемого объекта с помощью математических инструментов.

Учитывая вышесказанное, можно указать, что в подземной гидромеханике основным «рабочим материалом» была модель, описывающая установившуюся и неустановившуюся фильтрацию однофазного флюида (жидкости и газа) в однородной пористой среде. Данная модель является классической, не утратившей своего практического значения по сей день.

Как показала практика, необходимость более полного извлечения природного газа из пласта, а также проектирование разработки и эксплуатации газового месторождения в осложненных условиях требуют создания новых, более совершенных математических моделей, учитывающих дополнительные процессы призабойной зоны, а также сложную геометрию пространственных потоков газа.

Процессы, при которых температура газа равна температуре среды и остается постоянной, называются изотермическими. Отметим, что фильтрация представляет собой очень медленный процесс изменения температуры, возникающего в ходе движе-

ния как следствие наличия сопротивления стенок поровых каналов и трещин, а также из-за расширения газа при уменьшении давления, которое успевает компенсироваться в результате теплообмена с окружающими горными породами. В данных условиях изотермический процесс, как было указано профессором Б.Б.Лапуком, уравнение энергии рассматривать нет необходимости [1, 2, 3].

Для решения многочисленных задач газового месторождения необходимо иметь набор исходных данных о строении и свойствах пласта и призабойной зоны, о режимах и показателях работы скважин, преобразуемых в вид, требуемый для ввода в модель фильтрации. Важнейшим элементом моделирования является построение трехмерной геометрической модели пласта на основания интерпретации исследований последующим дополнением данной модели информацией об основных геолого-физических характеристиках пласта (пористости, проницаемости пласта и призабойной зоны и др.) по данным гидродинамических исследований скважины и анализа керна с использованием статических методов.

Как известно, радиально-сферическая модель является трехмерной, то есть пространственной моделью пласта.

Учитывая вышесказанное, определим объемный и массовый расход природного газа с учетом влияния призабойной зоны скважины. Пусть имеется модель скважины, вскрывшей кровлю пласта, на забое которой поддерживается постоянное давление. Можно предположить, что толщина газового пласта достаточно большая и можно выделить полусферу с радиусом, на поверхности которой поддерживается постоянное давление, и через данное пространство происходит приток газа, равный дебиту газовой скважины.

Примем, что течение установившееся и поверхность полусферы представляет собой контур питания. Учитывая вышесказанное, можно предположить, что вскрытие кровли пласта имеет форму полусферы и вектор скорости фильтрации в любой точке пласта между контуром питания и забоем скважины направлен к центру сферы. В данном случае задача имеет сферическую симметрию и ее удобно решать в сферической системе координат.

Учитывая вышесказанное предположение о сферической симметрии процесса все искомые функции зависят только от радиуса. В данном случае система уравнений фильтрации упростится и в сферической системе координат примет вид:

$$V_г = \frac{k}{\mu}\frac{dP}{dr} \qquad (1)$$

Где $V_г$ - скорость фильтрации потока газа;

К - проницаемость пласта;

μ - динамическая вязкость газа;

$\frac{dP}{dr}$ - градиент давления.

Умножая левую и правую части данного уравнения на площадь сечения пласта, имеем

$$Q = \frac{k}{\mu}2\pi r^2\frac{dP}{dr} \qquad (2)$$

Для решения данного уравнения в данную модель добавляем уравнение состояния

$$\rho = \rho_0\frac{P}{P_0}\frac{TZ}{T_0} \qquad (3)$$

Где P_0 - атмосферное давление; T_0 - атмосферная температура; P - заданное давление; ρ_0 - плотность газа при атмосферных условиях; Z - коэффициент сверхсжимаемости газа, который учитывает отклонение состояния реального газа от идеального. Отметим, что данный коэффициент зависит от приведенных давления и температуры.

Для начального случая, примем, что процесс изотермический при стандартных

условиях, то есть Z =1. Тогда имеем [1-6]

$$\rho = \rho_0 \frac{P}{P_0} \quad (4)$$

Решая данные уравнения совместно, находим

$$Q\rho = \frac{k}{\mu}\rho_0 \frac{P}{P_0} 2\pi r^2 \frac{dP}{dr} \quad (5)$$

Принимая во внимание изменение объема газа в зависимости от температуры, в расчетную модель следует включить понятие массового расхода. Тогда имеем:

$$\frac{M\mu P_0}{2\pi k \rho_0}\frac{dr}{r^2} = PdP \quad (6)$$

Предположим, что в данной системе пласта существует призабойная зона вокруг скважины, где во время бурения или эксплуатации возникла дополнительная зона с иной проницаемостью. Отметим, что на практике вблизи газовой скважины имеется небольшая область - призабойная зона, в которой происходит дополнительное падение давления, вызванное различными факторами. Наличие этого эффекта [7-10], в первую очередь, связано с особенностями вскрытия пласта, то есть создания гидродинамической связи между пластом и скважиной. Если скважина с открытым забоем вскрывает пласт не по всей толщине, а только на некоторую глубину, то данную скважину называют гидродинамически несовершенной по степени вскрытия пласта. Отметим, что если скважина вскрывает пласт от кровли до подошвы, но сообщение с пластом происходит только через специальные отверстия в обсадной колонне и через специальный фильтр, то такую скважину называют гидродинамически несовершенной по характеру вскрытия пласта.

Степень и характер вскрытия пласта имеют особенное значение при разработке месторождений природного газа, так как данные факторы определяют фильтрационные сопротивления, возникающие в призабойной зоне, что в конечном итоге оказывает влияние на производительность газовой скважины. Вследствие несовершенства скважин в призабойной зоне возникают сложные неодномерные течения, обусловленные существенными деформациями потока. Этот процесс называют скин-эффект.

Отметим, что другой причиной возникновения скин-эффекта являются фильтрационные характеристики призабойной зоны. Зачастую свойства данной зоны существенно отличается от соответствующих свойств пласта. Промысловые исследования показывают, что загрязнение зоны, прилегающей к забою скважины обуславливает ухудшение фильтрационных характеристик и значительные потери пластовой энергии при фильтрации природного газа из пласта к скважине. Данный процесс формируется на протяжении всего эксплуатационного периода скважины, то есть при бурении, цементировании, перфорации, освоении и эксплуатации.

Учитывая вышесказанное, отметим, что скин эффект является дополнительным фильтрационным сопротивлением, обусловленным несовершенством скважины и наклоном ее ствола, изменением проницаемости призабойной зоны.

Тогда, решая уравнение в пределах

$r=R_c \quad P=P_c$

$r=R_s \quad P=P_s$

$r=R_k \quad P=P_k$

Добавляя и убавляя значение $\left(\frac{1}{R_c}\right)$, с учетом скин зоны, в итоге имеем значение массового расхода

$$M = \frac{\pi k \rho}{\mu P_0} R_c \frac{\left(P_k^2 - P_c^2\right)}{\left[S + \left(1 - \frac{R_c}{R_k}\right)\right]} \quad (7)$$

Где R_c - радиус скважины; R_k - радиус контура; P_c - забойное давление скважины; P_k - контурное давление; S - скин фактор.

Значение скин фактора определяется по формуле:

$$S = \left(\frac{k}{k_s} - 1\right)\left(1 - \frac{R_c}{R_s}\right) \qquad (8)$$

Где k_s - проницаемость в скин зоне призабойного участка; R_s - радиус призабойной скин- зоны.

Если S=0, то имеем формулу для притока газа в скважину без скин фактора.

Учитывая, что $\frac{R_c}{R_k} < 1$, конечное уравнение для определения массового расхода выглядит следующим образом

$$M = \frac{\pi k \rho}{\mu P_0} R_c (P_k^2 - P_c^2) \qquad (9)$$

Данную формулу можно решить и по объемному расходу:

$$Q = \frac{M}{\rho_0} = \frac{\pi k}{\mu P_0} \frac{P_k^2 - P_c^2}{S+1} \qquad (10)$$

В дальнейших работах данную задачу необходимо применять и для других моделей и для реального газа.

Данная методика была применена для скважин с учетом скин-фактора. Как видно из рисунка 1 при различных значениях скин-зоны производительность изменяется. Так, при увеличении скин-фактора производительность падает, что характерно для газовых скважин, в продукции которых появляется жидкость, конденсат или вода. С увеличением параметра скин зоны обьемный расход газа уменьшается.

Выявление основных показателей пласта в условиях эксплуатации является актуальной проблемой промысловой практики. Так, уменьшение давления в пласте создает эффект падения дебита нефти по скважинам. Однако не только падение пластового давления, но и множество других факторов явно и косвенно влияющих на процесс фильтрации, является скин-зона. В данной зоне постепенно идет снижение проницаемости, что в итоге снижает дебит газовой скважины. Учитывая это явление, необходимо более основательно подходить к вопросам влияния скин-фактора на процесс эксплуатации газовых скважин.

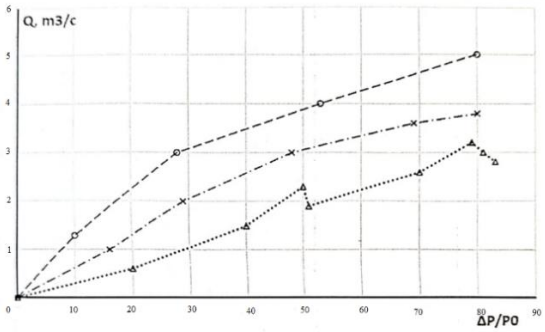

Рисунок 1 – Зависимость объемного расхода от безразмерного перепада давления, где 0-S=0,5; x-S=1,0; Δ-S=2,0
Figure 1 – Dependence of volumetric flow rate on dimensionless pressure drop, where 0-S=0,5; x-S=1,0; Δ-S=2,0

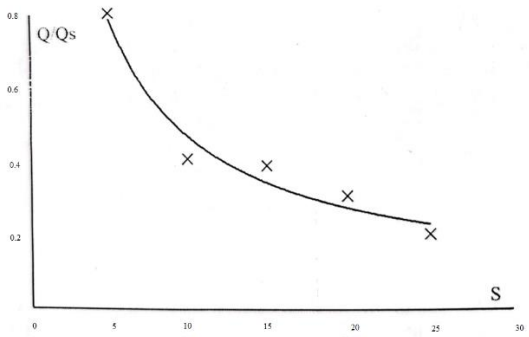

Рисунок 2 – Зависимость расхода газа от скин-фактора, где Q_s - расход газа с учетом скин зоны, Q - расход газа без скин зоны, S - скин фактор
Figure 2 – Gas consumption dependence on skin factor, where Q_s - gas flow rate considering the skin zone, Q - gas flow rate without considering the skin zone, S - skin factor

Многочисленные лабораторные и промысловые исследования показали, что околоскважинное пространство продуктивного пласта является высокоактивной нестабильной зоной. В процессе бурения, первичного вскрытия продуктивного пласта, заканчивания скважины и эксплуатации возникают особые процессы, которые нарушают природное энергомеханическое равновесие

пласта и околоскважинное пространство в частности.

В данном случае в околоскважинном пространстве наблюдаются изменения и физико-механических гидротермодинамических свойств и характеристик породы по нефти, газу и воде.

В периоды бурения и эксплуатации околоскважинное пространство и свойства жидкости меняются. Так как отложения смол, парафинов, образование гидратов, набухание глинистых минералов, разрушение коллектора, газовая блокировка изменяют пористость и проницаемость призабойной зоны, то можно сделать вывод о том, что эти факторы существенно нарушают производительность скважины, образуя неоднородную по параметрам скин-зону. Скин-зона влияет на все гидродинамические параметры пласта.

Заключение

1. Предложена методика расчета газовой скважины с учетом скин-зоны для сферически-радиальной модели с учетом физических характеристик газа и пласта.

2. Данная методика дает возможность определить основные параметры газовой скважины, такие как массовый и объемный расходы газовой скважины с учетом влияния скин-зоны.

3. Определив значение скин-фактора можно провести дополнительные работы на забое эксплуатационной скважины для улучшения ее производительности. Данные работы дают возможность проведения дополнительных мероприятий по увеличению производительности газовой скважины на более ранних этапах возникновения скин-зоны. Характерной особенностью является то, что во всех случаях учет скин-зоны положительно влияет на работу газовой скважины.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанных с публикацией данной статьи.

REFERENCES

1. **Basniev K.S., Dmitriev N.M., Kanevskaya R.D., Maksimov V.M.** "Podzemnaya qidromexanika", M., Izhevsk, 2005, 495 s.
2. **Lapuk B.B.** "Teoreticeskie osnovi teorii razrabotki mestorojdeniy prirojnix qazov", M-L. Gostoptekhizdat, 2002, 296 s.
3. **Lurye M.V.** "Mexanika podzemnoqo xraneniya qaza v vodonosnix plastax" “Neft i Gas", 2004, 350 s.
4. **Mirzajanzade A.Kh., Kuznetsov O.L., Basniev K.S., Aliev Z.S.** "Osnovi tenoloqii dobicha gasa", M., "Nedra", 2003, 880 s.
5. **Mikhailov N.N.** "Informacionno-texnoloqiceskaya qeodinamika okoloskvajinnix zon", M., "Nedra", 1996, 339 s.
6. **Molokovich Yu.M., Markov A.I., Davletshin A.A., Kushtapova G.G.** "Piezometriya okrestnosti skvajin. Theoreticeskie osnovi" - Kazan DAS, 2000, 203 s.
7. **Kanevskaya R.D.** "Matematiceskoe modelirovanie qidrodinamiceskix processov razrabotki mestorijdeniy uqlevodorodov" M., Izhevsk, Institut Computernix Issledovaniy, 2003, 140 s.
8. **Grencom R.A.** "Flow phenomena in porous media" Basel. M., Dekket Inc., 1983-550 pp.
9. **Dadashzade H.I., Musayeva Sh.F.** “Nekotorie osobennosti dvijeniya nenyutonovskix neftey v skvajine s ucetom sfericeski-radialnoy modeli”, Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri, Bakı. 2024, cild 16, № 4, s.46-51 s.
10. **Dadashzade H.I., Maxmudova V.Z.** “Xarakternie osobennosti dvijeniya upruqo-vyazkoplasticnoy jidkosti v trubax i plastax” Azərbaycan Mühəndislik Akademiyasının Xəbərləri, Bakı. 2025 № 3, s. 47-55