

## ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ СКВАЖИН С УЧЕТОМ СКИН-ЗОНЫ WELL PRODUCTIVITY WITH ACCOUNT FOR THE SKIN-ZONE

**Т. Ш. Салаватов**  
**Tulparkhan Sh. Salavatov**

Азербайджанский  
государственный университет  
нефти и промышленности  
г. Баку,  
Азербайджанская Республика

Azerbaijan State Oil  
and Industry University,  
Baku, Republic of Azerbaijan

**М. А. Дадаш-заде**  
**Mirza A. Dadash-zade**

Азербайджанский  
государственный университет  
нефти и промышленности  
г. Баку,  
Азербайджанская Республика

Azerbaijan State Oil  
and Industry University,  
Baku, Republic of Azerbaijan

**И. Н. Алиев**  
**Inglab N. Aliyev**

Азербайджанский  
государственный университет  
нефти и промышленности  
г. Баку,  
Азербайджанская Республика

Azerbaijan State Oil  
and Industry University,  
Baku, Republic of Azerbaijan

Промысловые исследования показывают, что во время эксплуатации вокруг скважины образуется новая область, которая характеризуется иными свойствами. Данная область называется скин-зоной. Применительно к вопросу исследования скважин термин «скин-эффект» следует понимать как влияние призабойной зоны (то есть влияние структуры пласта, геологического разреза, свойств горных пород и так далее) на величину забойного давления. Это указывает на изменение проницаемости призабойной зоны в процессе бурения и освоения скважин.

Предложенная методика расчета дает возможность изучения состояния скважин двумя способами. Во-первых, заменить величину истинного радиуса эксплуатационной скважины на величину приведенного радиуса. При этом термин «скин-фактор» будет отображать только влияние изменения призабойной зоны. Второй способ заключается в том, что скин-фактор будет отображать не только величину изменения призабойной зоны, но и влияние гидродинамического несовершенства эксплуатационной скважины в процессе добычи, сохраняя величину радиуса скважины. Оценив данные параметры, можно сделать заключение об эффективности мероприятий, проведенных в призабойной зоне пласта. При этом после проведенных работ, связанных с воздействием на призабойную зону, по значению скин-фактора можно определить положительное или отрицательное воздействие на работу скважины.

Field research shows that during operation around the well a new area is formed, which is characterized by different properties. This area is called the skin zone. Concerning the issue of well investigation, the term «skin effect» should be understood as the influence of the bottomhole zone (i.e., the influence of the formation structure, geological section, rock properties, etc.) on the bottomhole pressure. This indicates a change in permeability of the bottomhole zone in the process of drilling and development of wells.

The proposed calculation procedure makes it possible to study the state of the wells in two ways. First, replace the true radius of the production well by the amount of the reduced radius. In this case, the term «skin factor» will only reflect the effect of the change in the bottomhole zone. The second way is that the skin factor will reflect not only the magnitude of the change in the bottomhole zone, but also the effect of the hydrodynamic imperfection of the production well in the extraction process, while maintaining the wellbore radius. Having assessed these parameters, it is possible to make a conclusion about the effectiveness of the measures taken in the bottomhole formation zone. In this case, after the work done related to the impact on the bottomhole zone, the value of the skin factor can determine the positive or negative impact on the well operation.

### Ключевые слова

скин-эффект, скин-зона,  
число Слихтера,  
забойное давление,  
пластовое давление,  
эффективный диаметр

### Key words

skin-effect, skin-zone,  
Slichter number,  
bottomhole pressure,  
reservoir pressure,  
effective diameter

Не существует области промышленности, где из горных пород с помощью скважины не добывали бы полезные ископаемые. Это нефть, газ, вода, растворенные в кислоте металлы и другие элементы. Данный способ эксплуатации очень рентабелен и широко применим в горнодобывающем и промысловом производстве [1, 2].

Структура горных пород, горное давление, синклинали и антиклинали, минеральный состав породы в значительной степени влияют на процесс накопления углеводородов в пористой среде. Увеличение горного давления тоже влияет на процесс фильтрации жидкости и газа.

Углеводороды могут накапливаться в различных породах. По структуре, по характеру эти породы могут быть песчаниками, доломитами, известняками. Горные породы частично по гранулометрическому или механическому составу отличаются. В основном коллекторские характеристики горных пород также влияют на процесс накопления нефти. Так, к коллекторам нормального типа принадлежат и карбонатные породы, зерна которых состоят в значительной степени из раковин, обломков зерен и оолитов. Цемент песчаников очень разнообразный (мергелистый, известковистый, глинистый, кремнистый, железистый и так далее). Цементирующий материал может быть первичным, отложившимся вместе с зернами песка, и осадившимся химически в результате диагенетического процесса между зернами и вокруг них, а также вторичными, осадившимся из водных растворов, которые проникли в горные породы после их отложения. Отметим, что с увеличением цемента горная порода может постепенно превратиться в хомогенную горную породу. Данный процесс может ухудшить коллекторские свойства пласта и постепенно превратить его в непродуктивную горную породу, что в призабойной зоне эксплуатационной скважины создает скин-зону.

Характер строения и размер пустот оказывает большое влияние на коллекторские свойства породы и на величину накопления углеводородов. Строение горной породы и пустоты подразделяют на крупные, мелкие, субкапиллярные. Углеводороды обычно накапливаются в капиллярных, то есть в мелких пустотах.

Давление оказывает влияние на структуру породы и насыщенность ее углеводородами.

Однако создаваемое давление (так называемое гидростатическое пластовое давление) имеет специфические отличия от давления, создаваемого горной породой (геостатического давления). При этом, необходимо отметить две группы скопления углеводородов: а) при нормальном пластовом давлении и б) при аномальном пластовом давлении.

Однако в процессе эксплуатации в призабойной зоне возникает дополнительное сопротивление. Возникновение новой зоны частично уменьшает проницаемость призабойной зоны. Для решения данной задачи рассмотрим простейший случай, когда по проницаемости, по структуре породы, по пористости и так далее весь пласт можно разделить на две резко разграниченные зоны. Границей раздела зон пласта с различными физическими свойствами пусть служит коаксиальная скважина. Между скважиной и заданной областью существует резкое изменение характеристик породы. Отметим, что в реальных условиях ухудшение призабойной зоны может быть вызвано влиянием некачественного глинистого раствора в процессе разбухания продуктивного пласта и освоения скважины, промывками забоя различными жидкостями (водой, кислотой, паром), засорением пор пласта и так далее [1–9].

Из вышеизложенного вытекают следующие весьма полезные выводы: нарушение гидродинамического совершенства эксплуатационной скважины и нарушение призабойной зоны в окрестности ее забоя не препятствуют определению проницаемости пласта во всей области дренажа скважины. Однако нарушение призабойной зоны и гидродинамического совершенства скважины сильно влияют на величину понижения забойного давления. Так как данное забойное давление, соответствующее заданному дебиту эксплуатационной скважины, изменяется, это оказывает влияние на величину коэффициента продуктивности скважины.

Отметим, что если скважина имеет нарушение в призабойной зоне, то величина данной зоны отличается от величин пласта. Американские ученые Херст и Ван-Эвердинген на основе проведенных работ ввели понятие «скин-эффект». Английское слово «skin» буквально переводится как «наружный слой», «оболочка». Добавление этого параметра отражает основную идею данных авторов. Этот параметр количественно характеризует

скин-эффект, который коротко называют показателем скин-фактора.

Известно, что общее уравнение — закон фильтрации — можно показать как:

$$v = \frac{d_{\Sigma}^2 Sl}{\mu} \cdot \frac{dP}{dr}, \quad (1)$$

где  $v$  — скорость фильтрации;

$d_{\Sigma}$  — эффективный диаметр частиц, который можно определить как:

$$d_{\Sigma} = \sqrt[3]{\frac{\sum n_i d_i}{\sum n_i}}; \quad (2)$$

$d_i$  — средний диаметр  $i$  фракций, определяемый по формуле

$$d_i = \frac{1}{2} (d_i' + d_i''); \quad (3)$$

$d_i'$  и  $d_i''$  — среднее арифметическое крайних диаметров;

$n_i$  — число песчинок  $i$  фракций;

$Sl$  — число Слехтера.

Данная безразмерная величина является величиной, зависящей не только от пористости, но и от структуры порового пространства, определяющейся формой частиц и степенью шероховатости их поверхностей.

Решим данную задачу для одномерного радиального потока несжимаемой жидкости. Для этого площадь сечения пласта примем как  $F = 2\pi rh$ , где  $h$  — мощность пласта [1]:

$$vF = \frac{d_{\Sigma}^2 Sl}{\mu} 2\pi rh \frac{dP}{dr}. \quad (4)$$

Согласно линейному закону фильтрации имеем:

$$dP = \frac{Q\mu}{d_{\Sigma}^2 Sl} \frac{1}{2\pi h} \frac{dr}{r}. \quad (5)$$

Примем следующие граничные условия:

$$\int_{P_c}^{P_k} dP = \frac{Q\mu}{2\pi h} \left[ \int_{R_c}^{R_s} \frac{1}{d_{\Sigma 1}^2 Sl_1} \frac{dr}{r} + \int_{R_s}^{R_k} \frac{1}{d_{\Sigma 2}^2 Sl_2} \frac{dr}{r} \right], \quad (6)$$

где  $d_{\Sigma 1}$  и  $d_{\Sigma 2}$  — соответственно эффективный диаметр скин-зоны и пласта;

$Sl_1$  и  $Sl_2$  — соответственно числа Слехтера для скин-зоны и пласта;

$P_c$  — давление на забое скважины;

$P_k$  — давление на контуре питания;

$R_c$  и  $R_k$  — соответственно радиусы скважины и контура скважины;

$R_s$  — радиус скин-зоны.

Интегрируя, имеем:

$$P_k - P_c = \frac{Q\mu}{2\pi h} \left[ \frac{1}{d_{\Sigma 1}^2 Sl_1} \ln \frac{R_s}{R_c} + \frac{1}{d_{\Sigma 2}^2 Sl_2} \ln \frac{R_k}{R_s} \right]. \quad (7)$$

Приравнявая и отнимая значение  $\frac{1}{d_{\Sigma 1}^2 Sl_1} \ln \frac{R_s}{R_c}$ , находим:

$$P_k - P_c = \frac{Q\mu}{2\pi h} \frac{1}{d_{\Sigma 2}^2 Sl_2} \left[ \frac{d_{\Sigma 2}^2 Sl_2}{d_{\Sigma 1}^2 Sl_1} \ln \frac{R_s}{R_c} + \ln \frac{R_k}{R_s} + \ln \frac{R_s}{R_c} - \ln \frac{R_s}{R_c} \right]. \quad (8)$$

Проведем группировку:

$$P_k - P_c = \frac{Q\mu}{2\pi h d_{\Sigma 2}^2 Sl_2} \left[ \ln \frac{R_s}{R_c} \left( \frac{d_{\Sigma 2}^2 Sl_2}{d_{\Sigma 1}^2 Sl_1} - 1 \right) + \ln \frac{R_k}{R_c} \right]. \quad (9)$$

Введем понятие скин-фактора:

$$S = \ln \frac{R_s}{R_c} \left( \frac{d_{\Sigma 2}^2 Sl_2}{d_{\Sigma 1}^2 Sl_1} - 1 \right). \quad (10)$$

Тогда в конечном виде имеем:

$$P_k - P_c = \frac{Q\mu}{2\pi h d_{\Sigma 2}^2 Sl_2} \left[ S + \ln \frac{R_k}{R_c} \right]. \quad (11)$$

Из данной формулы можно определить значение объемного расхода жидкости:

$$Q = \frac{2\pi h d_{\Sigma 2}^2 Sl_2}{\mu \left( S + \ln \frac{R_k}{R_c} \right)}. \quad (12)$$

Данные формулы дают возможность оценить влияние скин-фактора на понижение забойного давления, расхода жидкости. Многочисленные наблюдения показали, что на практике скин-эффект принимает значения меньше  $S = -6$ . При таком значении скин-фактора рассматривается крайний теоретически мыслимый случай, то есть

$$\frac{d_{\Sigma 2}^2 Sl_2}{d_{\Sigma 1}^2 Sl_1} = 0. \quad (13)$$

Промысловые наблюдения показали, что величина была получена после гидроразрыва пласта, но только на основании проведенных расчетов можно сделать вывод о том, что гидроразрыв имел положительный эффект. Обработывая многочисленные промысловые исследования, обнаружено, что очень часто величина показателя скин-эффекта оказывалась большой и положительной. Это говорит о том, что характеристики призабойной зоны ухудшены в процессе бурения или освоения скважин. Анализ показывает, что после проведения специальных работ, связанных с воздействием на призабойную зону, новые значения скин-эффекта оказались меньше прежних.

### Выводы

Учитывая вышесказанное, можно показать, что скин-эффект дает возможность оценить состояние призабойной зоны скважины в зависимости от структуры порового пространства, формы частиц и от степени шеро-

ховатости их поверхностей, и его необходимо учитывать при планировании мероприятий по улучшению работы эксплуатационной скважины.

По изменению значения скин-фактора можно судить об успешности проведенных в призабойной зоне мероприятий.

Данная методика расчета дает возможность учесть несовершенство скважин двумя способами. Во-первых, заменить величину

истинного радиуса скважины на величину приведенного радиуса. В данном случае величина скин-фактора будет отражать только влияние изменения призабойной зоны. Второй способ заключается в том, что скин-фактор будет отображать не только величину изменения призабойной зоны, но и влияние гидродинамического несовершенства эксплуатационной скважины в процессе добычи, сохраняя величину радиуса скважины.

#### СПИСОК ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Щелкачев В.Н., Лапук Б.Б. Подземная гидравлика. М.: Изд-во «НИИЦ», 2001. 736 с.
2. Жумашов Ж.Н., Жумашева З.Н., Туркбаев П.Б., Клименко Д.П. Угрозы от георисков на территориях освоения месторождений углеводородного сырья и нерудных полезных ископаемых Кыргызстана // Горный журнал. 2016. № 8. С. 76–82.
3. Щелкачев В.Н. Разработка нефтеводоносных пластов при упругом режиме. М.: Гостопиздат, 1959. 357 с.
4. Ли Дж., Ваттенбаргер Р.А. Инжиниринг газовых резервуаров. М.: Изд-во «Газпром», 2014. 944 с.
5. Загуренко А.Г. Основы испытания пластов. Ижевск: Изд-во «ИКИ», 2012. 432 с.
6. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти. М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2003. 816 с.
7. Салаватов Т.Ш., Дадаш-заде М.А., Алиев И.Н. Гидродинамические расчеты при заводнении месторождения // Азербайджанское нефтяное хозяйство. Баку, 2017. № 12. С. 17–20.
8. Salavatov T.Sh., Dadashzade M.A., Aliyev I.N. Skin-Factor of Compressible Fluid at Radial Steady-State Filtration // Science and Applied Engineering Quarterly. London, 2017. Issue 14. P. 15–17.
9. Алиев И.Н. Влияние скин-зоны на процесс эксплуатации скважин // Экоэнергетика. Баку, 2017. № 4. С. 40–44.

#### REFERENCES

1. Shchelkachev V.N., Lapuk B.B. *Podzemnaya gidravlika* [Underground Hydraulics]. Moscow, NITs Publ., 2001. 736 p. [in Russian].

2. Zhumashov Zh.N., Zhumasheva Z.N., Turkbaev P.B., Klimenko D.P. Ugrozy ot georiskov na territoriyakh osvoeniya mestorozhdenii uglevodorodnogo syr'ya i nerudnykh poleznykh iskopaemykh Kyrgyzstana [Threats from Geological Risk in the Territories of Developing Hydrocarbon Deposits and Non-Metallic Minerals of Kyrgyzstan]. *Gornyi zhurnal — Mining Journal*, 2016, No. 8, pp. 76–82. [in Russian].
3. Shchelkachev V.N. *Razrabotka neftevodonosnykh plastov pri uprugom rezhime* [Development of Oil-Water Layers under Elastic Regime]. Moscow, Gostopizdat Publ., 1959. 357 p. [in Russian].
4. Li Dzh., Vattenbarger R.A. *Inzhiniring gazovykh rezervuarov* [Gas Tanks Engineering]. Moscow, Gazprom Publ., 2014. 944 p. [in Russian].
5. Zagurenko A.G. *Osnovy ispytaniya plastov* [Fundamentals of Testing Seams]. Izhevsk, IKI Publ., 2012. 432 p. [in Russian].
6. Mishchenko I.T. *Skvazhinnaya dobycha nefiti* [Downhole Oil Production]. Moscow, Neft' i gaz Publ. of Gubkin University, 2003. 816 p. [in Russian].
7. Salavatov T.Sh., Dadash-zade M.A., Aliyev I.N. *Gidrodinamicheskie raschety pri zavodnenii mestorozhdeniya* [Hydrodynamic Calculations for Waterflooding Field]. *Azerbaidzhanskoe neftyanoe khozyaistvo — Azerbaijan Oil Industry*, Baku, 2017, No. 12, pp. 17–20. [in Russian].
8. Salavatov T.Sh., Dadashzade M.A., Aliyev I.N. [Skin-Factor of Compressible Fluid at Radial Steady-State Filtration]. *Science and Applied Engineering Quarterly*, London, 2017, issue 14, pp. 15–17.
9. Aliyev I.N. Vliyaniye Skin-zony na protsess ekspluatatsii skvazhin [Influence of the Skin Zone on the Operation of Wells]. *Ekoenergetika — Ecoenergetics*, Baku, 2017, No. 4, pp. 40–44. [in Russian].

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ ABOUT THE AUTHORS

**Салаватов Тулпархан Шарабудинович.** д-р техн. наук, профессор, академик РАН, член-корреспондент Национальной академии наук Азербайджана, заведующий кафедрой «Нефтегазовая инженерия», Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика

**Tulparkhan Sh. Salavatov,** Doctor of Engineering Sciences, Professor, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences, Corresponding Member of Azerbaijan National Academy of Sciences, Head of the Oil and Gas Engineering Department, Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Republic of Azerbaijan

e-mail: petrotech@asoiu.az

*Дадашзаде Мирза Ахмед оглы, канд. техн. наук, доцент кафедры «Нефтегазовая инженерия», Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика*

*Mirza A. Dadashzade, Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor of the Oil and Gas Engineering Department, Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Republic of Azerbaijan*

*e-mail: mirza\_dadashzade@mail.az*

*Алиев Инглаб Намик оглы, диссертант, ассистент кафедры «Нефтегазовая инженерия», Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности, г. Баку, Азербайджанская Республика*

*Inglab N. Aliyev, Post-graduate Student, Assistant of the Oil and Gas Engineering Department, Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Republic of Azerbaijan*

*e-mail: inglav\_aliyev@hotmail.com*