

ОДНОМЕРНОЕ ДВИЖЕНИЕ НЕФТЕЙ С ВЯЗКО-ПЛАСТИЧНЫМИ СВОЙСТВАМИ С УЧЕТОМ СКИН-ФАКТОРА

АБДУЛЛАЕВ М. Г.¹, ДАДАШ-ЗАДЕ Х. И.¹

¹ Азербайджанский государственный университет нефти и промышленности
(Азербайджан, г. Баку, просп. Азадлыг, 20)

Введение. В статье рассмотрен вопрос влияния скин-фактора на одномерное движение нефтей с вязко-пластичными свойствами.

Цель статьи – оценить влияние скин-фактора на производительность скважин с высоковязкой нефтью.

Методика проведения исследований. Загрязнение призабойной зоны пласта и высокий скин-фактор приводят к снижению производительности скважин. Если скважины отличаются особенно высокими значениями скин-фактора и низкими продуктивными возможностями, обусловленными значительным загрязнением призабойной зоны асфальто-парафино-смолистыми отложениями, нужно проводить обработку призабойной зоны пласта, чтобы восстановить первичные значения проницаемости призабойной зоны. Поэтому необходимо выявление влияния скин-фактора на дебит скважин, из которых добывают нефть с вязко-пластичными свойствами, выполнено с использованием теоретического анализа процессов фильтрации.

Результаты. Рассмотрены нефти угленосной толщи нижнего карбона, которые отличаются высоким содержанием асфальтенов и смол. Нефть, содержащая асфальтено-смолистые вещества, представляет собой коллоидную систему, которая по характеру близка к вязко-пластичным нефтям. Дисперсной фазой в этой системе являются частицы асфальтенов, дисперсионной средой – смолы углеводородов разных классов. Стабилизирующим фактором в системе являются сольватные соли, вокруг которых накапливаются тяжелые компоненты. Интенсивность взаимодействия между частицами асфальтенов в нефти зависит от степени их сольватации. При десольватации усиливается взаимодействие между ними, что ведет, с одной стороны, к их ассоциации и уменьшению степени дисперсности асфальтенов, а с другой – к возникновению структуры в нефти и появлению вязко-пластичных свойств.

Выводы. Установлено влияние скин-фактора на вязко-пластичные свойства нефти и на дебит скважины.

Ключевые слова: вязко-пластичные свойства; проницаемость; парафины; асфальтены; смолы; скин-фактор.

Введение. Из многочисленных литературных источников известны причины возникновения скин-фактора – гидродинамическое несовершенство вскрытия пласта, загрязнение околоскважинной зоны, нелинейные эффекты (турбулентное течение, разгазирование, сжатие скелета горной породы и т. д.) – и его влияние на производительность как добывающих, так и нагнетательных скважин.

Методические подходы. В 1949 г. впервые А. Ф. Van Everdingen и N. Hurst для оценки состояния призабойной зоны скважины ввели понятие *скин-эффект* и указали, что падение забойного давления в результате ухудшения проницаемости околоскважинной зоны пласта пропорционально скин-эффекту (1956 г.) [1]. Термин *скин-эффект* был введен ранее в области электротехники, а применительно к нефтегазодобыче для оценки состояния продуктивного пласта более подходящим было бы использование понятия *скин-фактор*. Распространенное определение скин-фактора (S) как результата несовершенства вскрытия скважины, данное в работе [2], далеко не полностью раскрывает физический смысл и механизмы его возникновения. Поэтому по сей день остаются открытыми и дискуссионными наиболее принципиальные вопросы: область существования значений S и их принадлежность, неопределенность положительного и отрицательного знаков его

значений, отсутствие строгой теории вывода формулы. По формуле М. Ф. Hawkins скин-фактор может иметь значения от $-\infty$ до 0 и от 0 до $+\infty$ без принадлежности области определения и существования.

Скин-фактор определяется на основании результатов исследований при установившихся (стационарных) и неуставившихся (нестационарных) режимах фильтрации [3]. В работе [4] для оценки скин-эффекта и для расчета поля давления использовались функции Грина. Пласт считался бесконечным, вскрытым одной скважиной с вертикальной трещиной.

Теоретические и лабораторные исследования показали, что многие нефтяные месторождения Азербайджана, России и США содержат нефть с аномальными свойствами. По результатам исследований, проведенных за последние годы, можно судить о том, что эта нефть по физико-механическим свойствам может рассматриваться как вязко-пластичная среда. Фильтрация структурных жидкостей в пористой среде отличается от фильтрации ньютоновских жидкостей. Экспериментально доказано, что на структурные свойства нефти оказывают влияние парафины, асфальтены, смолы, а также углеводородный состав газов, растворенных в нефти.

Влияние на изменение структурных свойств нефти таких компонентов, как парафины и смолы, а также воздействие температуры рассматривалось многими авторами [2, 5–9]. О влиянии асфальтенов и газов, растворенных в нефти, сведений очень мало [10]. В некоторых работах при определении состояния призабойной зоны пласта по результатам гидродинамических исследований рассматривался вопрос определения скин-эффекта на основании кривой восстановления давления. Для определения скин-фактора (с учетом схождения потоков в трещине горизонтальной скважины с многостадийным ГРП и схождения потоков к стволу горизонтальной скважин) предлагались различные формулы [11, 12].

Изучению влияния ствола скважины и скин-эффекта на КВД при исследованиях скважин посвящены работы Агарвола, Аль-Хусейна и Ремей (1970 г.) для случая КПД, а также работы Мак Кинли (1971 г.) [13] для случая КВД, Грингартена и соавторов – для обобщенных КВД и КПД. Агарвол с соавторами [14] получили решение дифференциального уравнения фильтрации для случая пуска скважины конечного радиуса в бесконечном пласте с постоянным дебитом. Однако аналитическое исследование этого уравнения достаточно сложно для получения практических полезных выводов о влиянии ствола скважины на КВД [15]. В работе [15] подробно и последовательно излагается аналитический вывод формулы для расчета S , физический смысл и геометрическая интерпретация его значения. Аналитический вывод формулы S подтверждается выводом формулы через индикаторные линии *дебит-уровень*, *дебит-давление* и по значениям забойного давления и потенциального дебита. Однако в представленных работах не изучено влияние скин-фактора на реальный расход жидкости, т. е. на дебит скважины.

Интерес представляют нефти угленосной толщи нижнего карбона, которые отличаются высоким содержанием асфальтенов и смол. Нефть, содержащая асфальтено-смолистые вещества, представляет собой коллоидную систему, которая по характеру близка к вязко-пластичным нефтям. Надо отметить, что дисперсной фазой в этой системе являются частицы асфальтенов, дисперсионной средой – смолы углеводородов разных классов. Стабилизирующим фактором в системе являются сольватные соли, вокруг которых накапливаются тяжелые компоненты. Сольватные соли образуют смолы, ароматические и нафтеновые углеводороды. Интенсивность взаимодействия между частицами асфальтенов в нефти зависит от степени их сольватации. При десольватации усиливается взаимодействие между ними, что ведет, с одной стороны, к их ассоциации и уменьшению степени дисперсности асфальтенов, а с другой – к возникновению в нефти структуры и появлению вязко-пластичных свойств.

Таким образом, изучение асфальтенов в пластовой нефти дает возможность установить, при каких условиях последняя может обладать структурными, т. е. вязко-пластичными свойствами.

Многочисленные лабораторные исследования показывают, что ряд практических вопросов, касающихся рациональной разработки нефтяных месторождений, механизма нефтеотдачи, процесса фильтрации, для случаев, когда нефть обладает структурно-механическими свойствами, остаются невыясненными.

Одним из таких вопросов является вопрос процессов фильтрации аномальных нефтей с вязко-пластичными свойствами с учетом скин-фактора.

Известно, что при одномерной линейной фильтрации вязко-пластичных нефтей скорость фильтрации можно определить по формуле

$$\frac{dP}{dx} = - \left(\frac{\mu}{k} + \frac{\alpha \tau_0}{\sqrt{k_1}} \right),$$

где dP/dx – градиент давления; μ – структурная вязкость вязко-пластичной жидкости; k – проницаемость пласта по жидкости; k_1 – проницаемость пласта по воздуху; τ_0 – предельное напряжение сдвига; α – безразмерный параметр, учитывающий неньютоновские свойства нефти; v – скорость фильтрации жидкости.

Решим данное уравнение относительно расхода жидкости:

$$Q = \frac{kF}{\mu} \left(\frac{dP}{dx} - \frac{\alpha \tau_0}{\sqrt{k_1}} \right),$$

где F – площадь поперечного сечения пласта.

Отсюда

$$dP = \left[\frac{Q\mu}{kF} + \frac{\alpha \tau_0}{\sqrt{k_1}} \right] dx.$$

Для учета скин-фактора рассмотрим следующие условия для пласта с вязко-пластичными свойствами фильтрующей жидкости:

$$\int_{P_c}^{P_k} dP = \left[\frac{Q\mu}{kF} + \frac{\alpha \tau_0}{\sqrt{k_1}} \right] \int_0^{L_s} dx + \left[\frac{Q\mu}{kF} + \frac{\alpha \tau_0}{\sqrt{k_1}} \right] \int_{L_s}^{L-L_s} dx,$$

где k_s – проницаемость пласта ближе к ряду скважин, где возникает скин-фактор; P_k – давление на контуре; P_c – давление на забое скважины; L_s – длина участка, где возникает процесс, учитывающий скин-фактор; L – длина общего участка между контуром и забоем скважины.

Решая данное уравнение, получим:

$$P_k - P_c = \frac{Q\mu}{kF} L \left[1 + \frac{L_s}{L} \left(\frac{k}{k_s} - 2 \right) \right] + \frac{\alpha \tau_0}{\sqrt{k_1}} (L - L_s).$$

Введем понятие скин-фактора:

$$S = \frac{L_s}{L} \left(\frac{k}{k_s} - 2 \right).$$

С учетом скин-фактора перепад давления при фильтрации вязко-пластичной жидкости можно определить как

$$P_k - P_c = \frac{Q\mu}{kF} L(1 + S) + \frac{\alpha\tau_0}{\sqrt{k_1}} L \left(1 - \frac{L_s}{L}\right).$$

При $S = 0$ получим формулу академика А. Х. Мирзаджанзаде; если $\tau_0 = 0$ – общую формулу для неньютоновских жидкостей.

С учетом сказанного можно определить расход неньютоновской жидкости:

$$Q = \frac{kF}{\mu} \left[\frac{P_k - P_c}{\mu} - \frac{\alpha\tau_0}{\sqrt{k_1}} \left(1 - \frac{L_s}{L}\right) \right] / (1 + S).$$

Выводы. Как видно из формулы, скин-фактор влияет на вязко-пластичные свойства нефти и на дебит скважины. Отметим, что если скин-фактор имеет отрицательное значение, то добыча увеличивается, если скин-фактор имеет положительное значение, то дебит уменьшается. Скин-фактор можно определить на основе результатов исследования скважин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Van Everdingen A. F., Hurst W. The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs // *Petrol. Transactions, AIME*. 1949. Vol. 1. No. 12. С. 2732–2735.
2. Справочное руководство по проектированию разработки и эксплуатации нефтяных месторождений / под ред. Ш. К. Гиматудинова. М.: Недра, 1983. 455 с.
3. Economides Michael J., Daniel Hill A., Ehlig Christine. *Petroleum production systems*. Economides, by Prentice Hall PTR, 1994.
4. Gringarten A. C., Ramey H. J., Raghavan R. Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single infinite-conductivity vertical fracture // *Soc. Petrol. Eng. J.* 1974. Vol. 14. No. 4. P. 347–360.
5. Ли Дж., Ваттенбаргер Р. А. Инжиниринг газовых резервуаров. М.: Газпром, 2014. 944 с.
6. Мирзаджанзаде А. Х. Вопросы гидродинамики вязко-пластичных и вязких жидкостей в нефтедобыче. Баку, 1959. 348 с.
7. Мищенко И. Т. Скважинная добыча нефти. М.: Нефть и газ, 2003. 816 с.
8. Салаватов Т. Ш., Абдуллаев М. Г., Гараев Р. Г., Хамитов Н. М., Джаманбаев С. Е. Способ повышения производительности скважин применением термохимической обработки призабойной зоны пласта // *Научное обозрение*. 2016. № 9. С. 61–70.
9. Салаватов Т. Ш. Регулирование реофизических свойств нефтей физическими полями: дис. ... канд. техн. наук. Баку, 1981. 150 с.
10. Хорнеш Я. Исследование фильтрации асфальтсодержащих нефтей // *Нефтяное хозяйство*. 1966. № 10. С. 25–20.
11. Булатов А. И., Савенок О. В., Яремиичук Р. С. Научные основы и практика освоения нефтяных и газовых скважин. Краснодар: Юг, 2016. 576 с.
12. Дуркин С. М. Математическая модель скважины, дренирующей трещиновато-пористый коллектор: дис. ... канд. техн. наук. Ухта, 2014. 125 с.
13. McKinley K. M. Wellbore transmissibility from afterflow-dominated pressure build-up data // *J. Petrol. Technol.*, July, 1971.
14. Agarwal R. G., Al-Hussainy R., Ramey H. J. An investigation of wellbore storage and skin effect in unsteady liquid flow. *J. Analytical Treatment. SPEJ*. Sept. 1979. P. 279–290.
15. Муфазалов Р. Ш. Гидромеханика добычи нефти: учеб. пособие для вузов. М.: Горная книга, 2005. 328 с.

Поступила в редакцию 10 апреля 2018 года

Абдуллаев М. Г., Дадаш-заде Х. И. Одномерное движение нефтей с вязко-пластичными свойствами с учетом скин-фактора // *Известия вузов. Горный журнал*. 2018. № 6. С. 35–40.

Сведения об авторах:

Абдуллаев Малик Гурбан оглу – кандидат технических наук, доцент, преподаватель кафедры нефтегазовой инженерии Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности. E-mail: malik.abdullayev.52@mail.ru

Дадаш-заде Ханум Иса гъзы – кандидат технических наук, доцент, преподаватель кафедры нефтегазовой инженерии Азербайджанского государственного университета нефти и промышленности. E-mail: dadashzadimirza@mail.ru

ONE-DIMENSIONAL MOTION OF OILS WITH VISCOUS-DUCTILE PROPERTIES WITH THE ACCOUNT OF A SKIN FACTOR

Abdullaev M. G.¹, Dadash-zade Kh. I.¹

¹ Azerbaijan State Oil and Industry University, Baku, Azerbaijan.

Introduction. The article considers the problem of skin factor influence on the one-dimensional motion of oils with viscous and ductile properties.

The aim of the article is to assess the influence of a skin factor on the capacity of wells with high-viscosity oil.

Research methodology. It is well-known that seam borehole zone pollution and high skin factor leads to the reduction of wells capacity. If wells are distinguished by particularly high values of a skin factor and low productiveness conditioned on significant pollution of a borehole zone with asphalt-paraffin-resine residue, it is necessary to fulfill seam borehole zone processing in order to reconstruct borehole zone permeability primary values. It is therefore necessary to determine the influence of a skin factor on the production rate of the well whereof oil with viscous and ductile properties is produced.

Results. With this purpose the lower Carbonian coal-bearing strata oils are examined which are distinguished by high content of asphaltenes and resins. Oil which contains asphaltene-resin matters represents colloidal system which is similar to viscous-ductile oils in its character. It should be noted that in this system asphaltene particles are dispersed phase, while hydrocarbon resins of various classes and resins dissolved in them are a continuous medium. Stabilizing factor in the system are solvate salts around which heavy components are accumulated. Interaction intensity between asphaltene particles in oil depends on the degree of their solvation. Under desolvation the interaction between them intensifies which leads to their association and asphaltene dispersion reduction on the one hand, and generation of a structure in oil and the occurrence of viscous-ductile properties on the other hand.

Key words: viscous-ductile properties; permeability; paraffins; asphaltenes; resins; skin factor.

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-6-35-40

REFERENCES

1. Van Everdingen A. F., Hurst W. The application of the Laplace transformation to flow problems in reservoirs. *Petrol. Transactions, AIME*, 1949, vol. 1, no. 12, pp. 2732–2735.
2. *Spravochnoe rukovodstvo po proektirovaniu razrabotki i ekspluatatsii nefitynykh mestorozhdenii / pod red. Sh. K. Gimatudinova* [Reference guide on mine design and oil fields exploitation. Edited by Sh. K. Gimatudinov]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 455 p.
3. Economides Michael J., Daniel Hill A., Ehlig Christine. *Petroleum production systems*. Economides, by Prentice Hall PTR, 1994.
4. Gringarten A. C., Ramey H. J., Raghavan R. Unsteady-state pressure distributions created by a well with a single infinite-conductivity vertical fracture. *Soc. Petrol. Eng. J.*, 1974, vol. 14, no. 4, pp. 347–360.
5. Lee J., Wattenbarger R. A. *Inzhiniring gazovykh rezervuarov* [Gas reservoir engineering]. Moscow, Gazprom Publ., 2014. 944 p.
6. Mirzadzhanzade A. Kh. *Voprosy gidrodinamiki viazko-plastichnykh i viazkikh zhidkostei v nefte dobyche* [Issues of hydrodynamics of viscous-ductile and viscous liquids in oil production]. Baku, 1959. 348 p.
7. Mishchenko I. T. *Skvazhinnaia dobycha nefi* [Oil well mining]. Moscow, Neft' i gaz Publ., 2003. 816 p.
8. Salavatov T. Sh., Abdullaev M. G., Garaev R. G., Khamitov N. M., Dzhamanbaev S. E. [Method for improving the well productivity by using the thermochemical processing of hole-bottom region]. *Nauchnoe obozrenie – Science Review*, 2016, no. 9, pp. 61–70. (In Russ.)
9. Salavatov T. Sh. *Regulirovanie reofizicheskikh svoystv neftei fizicheskimi poliami: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Regulation of oil rheophysical properties with physical fields. Cand. Eng. sci. diss.]. Baku, 1981. 150 p.
10. Khornesh Ia. [Investigation into asphaltene bearing oils filtration]. *Nefianoe khoziaistvo – Oil Industry*, 1966, no. 10, pp. 25–20. (In Russ.)
11. Bulatov A. I., Savenok O. V., Iaremiichuk R. S. *Nauchnye osnovy i praktika osvoeniia nefitynykh i gazovykh skvazhin* [Scientific fundamentals and the practice of oil and gas wells completion]. Krasnodar, Iug Publ., 2016. 576 p.
12. Durkin S. M. *Matematicheskaiia model' skvazhiny, dreniruiushchei treshchinovato-poristy kolektor: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Mathematical model of the well which drains fissured porous reservoirs. Cand. Eng. sci. diss.]. Ukhta, 2014. 125 p.
13. McKinley K. M. Wellbore transmissibility from afterflow-dominated pressure build-up data. *J. Petrol. Technol.*, July, 1971.
14. Agarwal R. G., Al-Hussainy R., Ramey H. J. An investigation of wellbore storage and skin effect in unsteady liquid flow. *J. Analytical Treatment. SPEJ*, Sept. 1979, p. 279–290.
15. Mufazalov R. Sh. *Gidromekhanika dobychi nefi: ucheb. posobie dlia vuzov* [School book for the institutions of higher education "Hydromechanics of oil production"]. Moscow, Gornaia kniga Publ., 2005. 328 p.

Information about authors

Abdullaev Malik Gurban oglu – Candidate of Engineering sciences, Associate professor, lecturer at the Department of Oil and Gas Engineering of Azerbaijan State University of Oil and Industry. E-mail: malik.abdullayev.52@mail.ru

Dadash-zade Khanum Isa gyzy – Candidate of Engineering sciences, Associate professor, lecturer at the Department of Oil and Gas Engineering of Azerbaijan State University of Oil and Industry. E-mail: dadashzademirza@mail.ru
