

Моделирование движения жидкости к скважинам различной конфигурации при помощи сферического потока

Modelling of fluid flow toward complex-architecture wells using spherical flowing approach

V.A. Iktissanov¹

¹TatNIPIneft

E-mail: iktissanov@tatnipi.ru

Keywords: spherical flowing, steady-state flow, unsteady-state flow, complex-architecture wells, horizontal wells, limited entry completions, calculation algorithm

In recent decades, complex-architecture wells have been extensively substituted for vertical wells. Slanted, horizontal, multilateral horizontal wells, fractured horizontal wells hold much promise as regards improvement of tight reservoirs' performance and increase of final oil recovery. In this connection, a great number of equations describing steady-state and unsteady-state flows in such wells have been offered by different authors, but, most regrettably, flow formulae for these wells can only be obtained in particular cases given of idealization of flow. Besides, a great number of different flow equations for horizontal wells in contrast to the only Dupuit equation for vertical wells cannot but testify to a low level of solution to this problem.

The previous papers discussed an alternative approach to describe fluid flow in complex-architecture horizontal wells. This approach involved a set of closely spaced nodes (vertical wells) and pseudo-skin effect for horizontal wells differentiating between flow to fracture and flow to horizontal wellbore. However, complete solution can only be obtained by representing a wellbore by a set of closely spaced spheres. One of the challenges of the solution to the problem is that in order to take into account the effect of impermeable formation tops and bottoms, summation from minus to plus infinity is necessary. Because of that, the solution is not infrequently simplified; furthermore, the known equations do not consider interference of spheres. These drawbacks have been duly considered, and a calculation algorithm has been worked out, as well as an external program to Saphir to determine steady-state and unsteady-state flows to wellbore(s), no matter how complex its architecture, not involving finite-difference methods. This method not only considers different well types, it also considers the limited entry completions. The calculation algorithm tested for particular cases for horizontal and vertical wells demonstrated high extent of matching with modeled PBU calculated in Saphir. It is noteworthy that it is incomparably faster than numerical solution methods. The offered method to describe steady- and unsteady-state flows to complex-architecture wellbores using the spherical flowing approach enabled (a) to replace a great number of formulae applicable to particular cases, (b) to describe flow and PBU for wells with no analytic formulae, and (c) to select the most effective well drainage architecture considering reservoir characteristics, operational and technological aspects, etc.

В настоящее время в нефтяной отрасли используются различные типы скважин: вертикальные, вертикальные с трещиной гидроразрыва пласта (ГРП), наклонно направленные, горизонтальные (ГС), горизонтальные с трещинами ГРП, многоствольные горизонтальные, горизонтально-разветвленные, многоярусные и др. Многообразие типов скважин, а также различное вскрытие пласта приводят к появлению большого числа формул для расчета дебита скважин и решения задач неустановившейся фильтрации. Для некоторых сложных случаев аналитические формулы расчета притока отсутствуют.

Следует отметить, что даже для одного типа скважин и одного закона фильтрации, например Дарси, существует

В.А. Иктисанов¹, Д.Т.Н.

¹ТатНИПИнефть

Адрес для связи: iktissanov@tatnipi.ru

Ключевые слова: сферический поток, установившаяся и неустановившаяся фильтрация, скважины сложной конфигурации, скважины с горизонтальным окончанием, скважины с частичным вскрытием, алгоритм расчета

DOI: 10.24887/0028-2448-2018-5-52-55

несколько уравнений установившего притока. Так, решению задачи определения дебита ГС посвятили свои работы П.Я. Полубаринова-Кочина, В.П. Меркулов, В.П. Табаков, Ю.П. Борисов, В.П. Пилатовский, В.Г. Григулецкий, Б.А. Никитин, S.D. Joshi, M.J. Economides, C.A. Ehlig-Economides, F.M. Giger, D.K. Babu, A.S. Odeh, R. Raghavan, R.M. Butler, R. Suprunowicz, P.T. Фазлыев, В.Д. Лысенко, М.Х. Хайруллин, И.Р. Мукминов, Т.Г. Бердин, З.С. Алиев, А.Б. Золотухин и другие. Аналогичная тенденция относится и к другим типам скважин за исключением совершенной вертикальной скважины, для которой при линейном законе фильтрации используется единственное уравнение Дюпюи.

Наличие нескольких формул для одного типа скважин может свидетельствовать о различной степени идеализации и соответственно разной погрешности решения задачи. Однако, по мнению автора, наиболее правильным подходом является создание и использование минимального числа расчетных способов или одного способа расчета притока к скважине для заданного закона фильтрации, причем не только для каждого типа скважин, но и для всех возможных типов скважин с различным вскрытием пласта. Кроме того, необходимо решение задачи для нестационарной фильтрации.

При наиболее общем расчетном методе для скважин с горизонтальным окончанием ранее автором решение исходной трехмерной задачи было сведено к решению двух плоских задач [1–3], в частности в вертикальной плоскости – к притоку жидкости к точечному стоку в полосу с непроницаемыми кровлей и подошвой (рис. 1). Для его описания возможно применение различных уравнений, представленных в работах [1–8].

Для моделирования сложной траектории стволов в горизонтальной плоскости использовался набор верти-

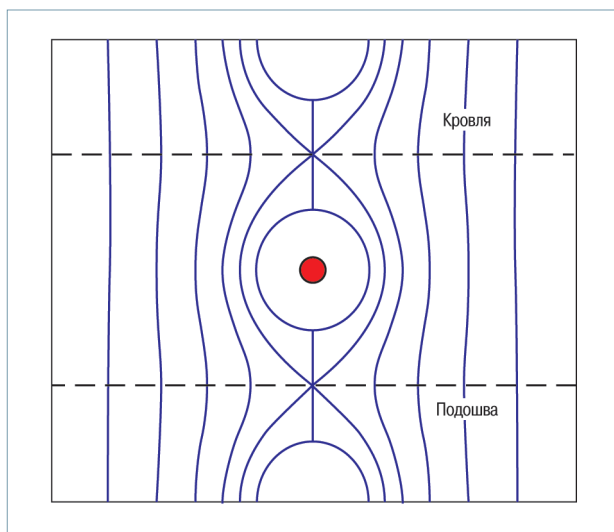


Рис. 1. Моделирование потока к точечному стоку в полосе с непроницаемыми кровлей и подошвой

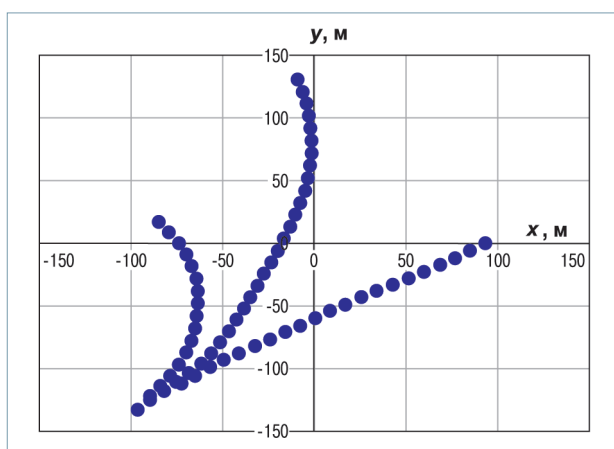


Рис. 2. Моделирование траектории стволов в горизонтальной плоскости при помощи набора узлов

кальных скважин или узлов, достаточно близко расположенных друг к другу (рис. 2). Данный подход позволяет описать течение жидкости к стоку, представляющему собой искривленную вертикальную трещину, проходящую через всю толщину пласта. Дебиты узлов Q_i в горизонтальной плоскости определялись при решении системы уравнений, учитывающей интерференцию узлов

$$\begin{aligned} Q_1 &= \frac{2\pi\epsilon}{\ln R_K/r_w} \left(p_f + \frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{j=1}^n Q_j \ln \frac{r_{1j}}{R_K} \right) - p_{bi}; \\ Q_i &= \frac{2\pi\epsilon}{\ln R_K/r_w} \left(p_f + \frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{j=1}^n Q_j \ln \frac{r_{ij}}{R_K} \right) - p_{bi}; \\ Q_n &= \frac{2\pi\epsilon}{\ln R_K/r_w} \left(p_f + \frac{1}{2\pi\epsilon} \sum_{j=1}^n Q_j \ln \frac{r_{nj}}{R_K} \right) - p_{bi}, \end{aligned} \quad (1)$$

где Q_i – дебит узла; ϵ – гидропроводность пласта; r_w , R_K – радиус соответственно скважины и контура питания; p_f , p_b – соответственно пластовое и забойное давление; r_{ij} – расстояние между узлами.

Для расчета дебита скважины фильтрационные сопротивления суммировались в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Данный подход позволил учесть

любые конфигурации горизонтальных стволов и расположение работающих участков. Задача решена для установившегося и неустановившегося потоков жидкости в пласте. Одновременно создана и апробирована внешняя модель в программном комплексе (ПК) Saphir (рис. 3).

К сожалению, область применения этого расчетного метода связана только с пластами малой толщины, точнее – с малым отношением толщины пласта к длине ствола ГС. Прежде всего это вызвано приближенным учетом фильтрационного сопротивления при описании различными уравнениями притока в вертикальной плоскости к стволу ГС между непроницаемыми кровлей и подошвой пласта (см. рис. 1). Для неустановившегося потока данный эффект схождения линий тока обычно называют псевдоскин-фактором для ГС.

Наиболее общее решение можно получить при использовании трехмерного потока жидкости к скважине. Это достигается введением сферического потока к узлам, моделирующим ствол горизонтальной (многоствольной) или любой другой скважины (рис. 4). Данный подход был описан еще в 90-е годы XX века Е. Ozkan, R. Raghavan [6], которые на его основании вывели ряд решений для различных типов потоков и границ пласта. В отечественной практике данным направлением занимались Ф.Н. Доманюк и А.Б. Золотухин [7, 8]. Ими предложена аппроксимация бесконечных сумм, возникающих при моделировании кровли и подошвы, методом отображения стоков при помощи приближенных аналитических зависимостей.

В итоге непосредственное решение задачи с суммированием от минус до плюс бесконечности для учета непроницаемых кровли и подошвы никто не использовал. Вместо этого применялись различные упрощения задачи. В связи с отмеченным предпринята попытка решения задачи путем использования исходных уравнений притока к сферам, моделирующим ствол скважины. Данная идея возникла давно, тем более что при помощи набора сфер можно описать не только скважину с горизонтальным окончанием, но и другие типы скважин, однако алгоритм устойчивого решения был реализован лишь недавно. В основе предлагаемого метода использовался подход, примененный ранее при решении системы уравнений (1), т.е. задача решалась с учетом интерференции отдельных узлов. Только в данном случае узлы представляли собой не вертикальные скважины, как для уравнения (1), а сферы. Для этого выведена система n уравнений с n неизвестными дебитами узлов

$$\begin{aligned} Q_1 &= -\frac{4\pi\epsilon}{\sum_{m=-\infty}^{\infty} \alpha_{1m}} \left(p_f - \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_{j=1}^n \left(Q_j \sum_{k=-\infty}^{\infty} \alpha_{1k} \right) \right) - p_{bi}; \\ Q_i &= -\frac{4\pi\epsilon}{\sum_{m=-\infty}^{\infty} \alpha_{im}} \left(p_f - \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_{j=1}^n \left(Q_j \sum_{k=-\infty}^{\infty} \alpha_{ik} \right) \right) - p_{bi}; \\ Q_n &= -\frac{4\pi\epsilon}{\sum_{m=-\infty}^{\infty} \alpha_{nm}} \left(p_f - \frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_{j=1}^n \left(Q_j \sum_{k=-\infty}^{\infty} \alpha_{mk} \right) \right) - p_{bi}. \end{aligned} \quad (2)$$

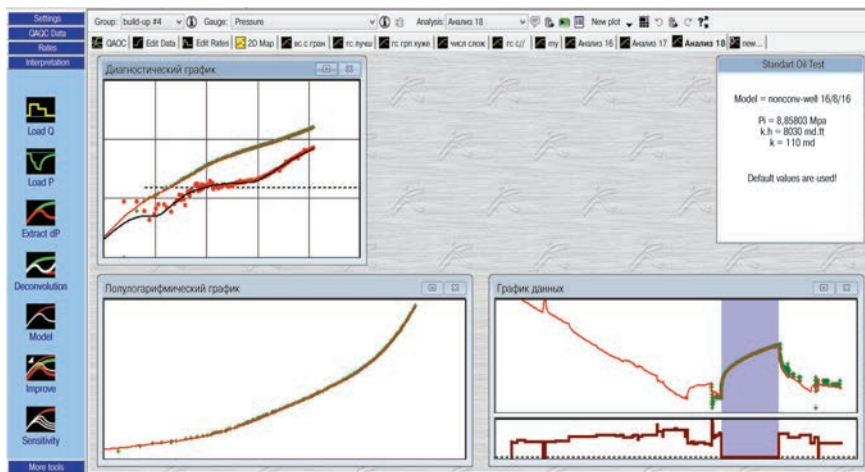


Рис. 3. Пример использования внешней модели для многоствольной скважины в ПК Saphir

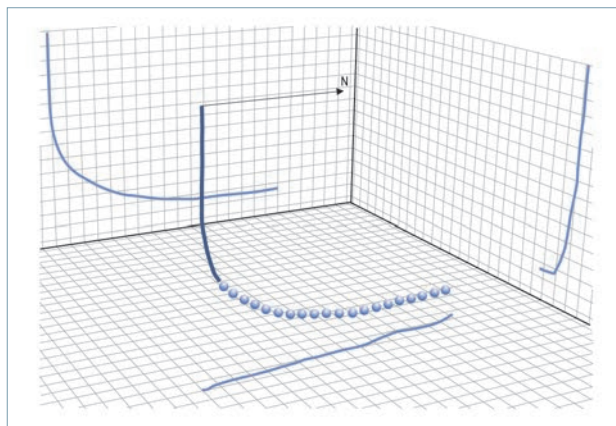


Рис. 4. Представление ствола ГС в пласте набором сфер

Здесь

$$\alpha_{im} = \frac{h}{\sqrt{r_w^2 + (-2hm)^2}} + \frac{h}{\sqrt{r_w^2 + (-2hm - 2Z_{wi})^2}} - \frac{h}{\sqrt{R_k^2 + (-2hm)^2}} - \frac{h}{\sqrt{R_k^2 + (-2hm - 2Z_{wi})^2}}; \quad (3)$$

$$\alpha_{ik} = \frac{h}{\sqrt{R_k^2 + (-2hk)^2}} + \frac{h}{\sqrt{R_k^2 + (-2hk - 2Z_{wi})^2}} - \frac{h}{\sqrt{r_{ij}^2 + (-2hk)^2}} - \frac{h}{\sqrt{r_{ij}^2 + (-2hk - 2Z_{wi})^2}}, \quad (4)$$

где h – толщина пласта; Z_w – расстояние от подошвы пласта до центра узла.

Как и для предыдущего алгоритма расчета, в данном случае при использовании сферического потока возможно задание различных забойных давлений в узлах, что позволяет учитывать потери на трение и влияние гидрозатворов в скважине с горизонтальным окончанием и, если необходимо, в вертикальных скважинах.

Отработка алгоритма выполнялась при помощи созданной внешней программы для ПК Saphir

следующим образом. Сопоставляя значения суммарных дебитов узлов для радиального и сферического установившихся потоков, рассчитывали псевдоскин-эффект для ГС. Далее его значение подставляли в разработанный ранее алгоритм для интерпретации кривой восстановления давления (КВД) [3]. Полученное решение сопоставлялось с эталонным решением по программе Saphir для частных случаев: горизонтальной и вертикальной скважин.

После апробации и проверки алгоритма было выполнено моделирование для скважины с горизонтальным окончанием. В частности, установлено, что в однородном пласте

при одинаковом забойном давлении без влияния соседних скважин согласно уравнению R.M. Butler приток к трещине имеет U-образный профиль [1, 3]. Такой же профиль притока получен при помощи системы уравнений (1) с использованием уравнений для радиального потока. Для сферического потока при моделировании ГС конечные узлы характеризуются гораздо меньшим притоком, т.е. U-образный профиль разглаживается. В частности, для условий расчета, представленных на рис. 5, приток для конечных узлов снижается в 2 раза и более. Это можно объяснить меньшим притоком к узлу-сфере по сравнению с притоком к узлу – вертикальной скважине.

Близость профилей притока для радиального и сферического потоков характерна только при малых толщинах пласта (см. рис. 5). Именно для данного условия сходимость системы (2)–(4) становится хуже, однако в этом случае возможно использование системы уравнений (1). При отношении вертикальной проницаемости к горизонтальной меньше единицы ($k_z/k_r < 1$), что типично для большинства коллекторов, сходимость решения системы (2)–(4) улучшается. Однако из-за необходимости более частого расположения узлов время счета увеличивается.

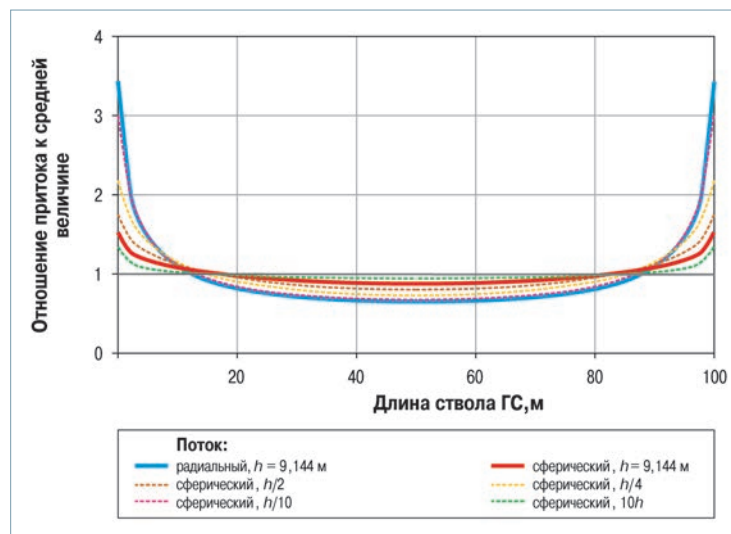


Рис. 5. Профиль притока к трещине (радиальный поток) и ГС (сферический поток) для различных толщин пласта

При отработке алгоритма для вертикальных совершенных скважин установлено, что профиль притока из-за погрешности численных расчетов не является постоянным, как это следует из уравнения для радиального потока (рис. 6). Конечные узлы обычно имеют разброс, однако суммарный дебит узлов совпадает с дебитом скважины до шестого знака после запятой. Кроме того, расчеты показали, что частое разбиение на узлы приводит к неустойчивому решению, в связи с чем существует ограничение на число узлов по толщине пласта. В среднем расстояние между узлами должно быть в 2 раза больше диаметра сферы. Для скважины с частичным вскрытием пласта, как и ожидалось, наблюдается наибольший приток со стороны крайних интервалов перфорации или конечных участков ствола, удаленных от кровли или подошвы (см. рис. 6). Для условия $k_z/k_r < 1$ профиль притока к вертикальной скважине с частичным вскрытием становится более ровным. К недостаткам предлагаемого способа можно отнести только возрастание времени счета при низкой вертикальной проницаемости (в $1/\sqrt{k_z/k_r}$ раз).

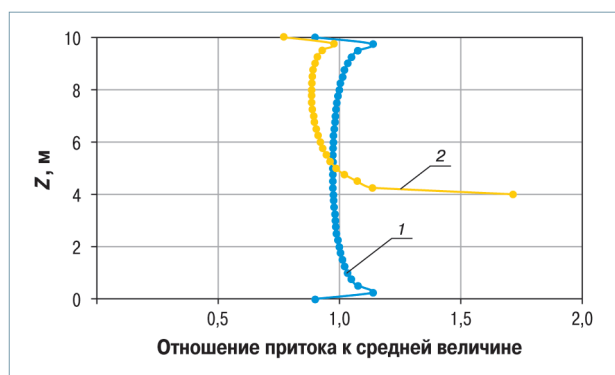


Рис. 6. Профиль притока с использованием сферического потока к совершенной вертикальной скважине (1) и скважине с частичным вскрытием пласта (2) (Z – координата)

Таким образом, представление траектории ствола (стволов) скважины в виде набора узлов и использование метода суперпозиций привели к возможности создания алгоритма расчета установившейся и неустановившейся фильтрации для любых типов скважин с любыми работающими участками. Это позволяет: а) заменить множество формул, полученных для частных случаев; б) описать приток к скважинам, для которых не существует аналитических формул; в) выбрать наиболее эффективную схему дренажа скважины с учетом особенностей коллектора, рациональной эксплуатации скважины; г) интерпретировать КВД скважин сложной конфи-

гурации; д) снизить трудоемкость расчетов по сравнению с расчетами с использованием конечно-разностного моделирования. Установлено, что приток на концах ГС значительно меньше притока на концах трещины той же длины, проходящей от кровли до подошвы. При частичном вскрытии пласта вертикальной скважиной наибольший приток характерен для конечных участков ствола, удаленных от кровли или от подошвы.

Список литературы

1. Иктисанов В.А. Гидродинамические исследования и моделирование многостворных горизонтальных скважин. – Казань: Плутон, 2007. – 124 с.
2. Иктисанов В.А. Методы расчета продуктивности и интерпретации КВД для скважин сложной архитектуры // SPE 133477. – 2010.
3. Иктисанов В.А. Особенности притока к скважинам с горизонтальным окончанием // Нефтяная провинция: сетевое научное издание – 2017. – № 1. – С. 95-126. – http://docs.wixstatic.com/ugd/2e67f9_40a056e73d114e52a9fccded0bbbebbe.pdf.
4. Борисов Ю.П., Пилатовский В.П., Табаков В.П. Разработка нефтяных месторождений горизонтальными и многозабойными скважинами. – М.: Недра, 1964. – 154 с.
5. Butler R.M. Horizontal wells for the recovery of oil, gas and bitumen. – Calgary: Petroleum Society, Canadian Institute of Mining, Metallurgy & Petroleum, 1994. – 228 p.
6. Ozkan E., Raghavan R. New solutions for Well-Test-Analysis Problems: Part 1 – Analytical Considerations // SPE Formation Evaluation. – 1991. – V. 6. – № 3. – P. 359–368.
7. Доманюк Ф.Н., Золотухин А.Б. Определение дебита скважины с прямолинейным профилем в вертикально-изотропном пласте // Нефтяное хозяйство. – 2011. – № 5. – С. 92–95.
8. Доманюк Ф.Н. Разработка аналитических методов прогнозирования производительности горизонтальных и сложнопрофильных скважин: автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2012.

References

1. Iktisnov V.A., *Gidrodinamicheskie issledovaniya i modelirovaniye mnogostvor'nykh gorizonta'nykh skvazhin* (Hydrodynamic studies and modeling of multilateral horizontal wells), Kazan': Pluton Publ., 2007, 124 p.
2. Iktisnov V.A., *Pressure transient analysis and simulation of nonconventional wells* (In Russ.), SPE 133477, 2010.
3. Iktisnov V.A., *Fluid flow pattern towards horizontal wells* (In Russ.), *Neftyanaya provintsiya*, 2017, no. 1, pp. 95-126. – http://docs.wixstatic.com/ugd/2e67f9_40a056e73d114e52a9fccded0bbbebbe.pdf.
4. Borisov Yu.P., Pilatovskiy V.P., Tabakov V.P., *Razrabotka neftnykh mestorozhdeniy s gorizonta'nyimi i mnogozaboynymi skvazhinami* (Development of oil fields using horizontal and multilateral wells), Moscow: Nedra Publ., 1964, 364 p.
5. Butler R.M., *Horizontal wells for the recovery of oil, gas and bitumen*, Calgary: Petroleum Society, Canadian Institute of Mining, Metallurgy & Petroleum, 1994, 228 p.
6. Ozkan E., Raghavan R., *New solutions for well test analysis problems: Part 1. Analytical considerations*, SPE 18615-MS, 1991.
7. Domanyuk F.N., Zolotukhin A.B., *Productivity estimation of the well with straight-line profile in anisotropic reservoir* (In Russ.), *Neftyanoe khozyaystvo* = Oil Industry, 2011, no. 5, pp. 92–95.
8. Domanyuk F.N., *Razrabotka analiticheskikh metodov prognozirovaniya proizvoditel'nosti gorizonta'nykh i slozhnoprofil'nykh skvazhin* (Development of analytical methods for forecasting the productivity of horizontal wells and wells with compound section): thesis of candidate of technical science, Moscow, 2012.