



© А.Г. Козубовский,
Т.В. Кузьмина, 2024



УДК 622.276.5:532.5+550.832
<https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-3-34-42>

АНАЛИЗ ОЦЕНОК ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПО ДАННЫМ ИНТЕРПРЕТАЦИИ КРИВЫХ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИНАХ

А.Г. Козубовский¹, Т.В. Кузьмина^{2,*}

¹ЗАО Научно-производственное объединение «ИнТЭК», РФ, Тюмень

²Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть», РФ, Тюмень

Электронный адрес: Tatyana.Kuzmina2@lukoil.com

Введение. Вертикальная проницаемость является важной характеристикой нефтенасыщенного коллектора, сведения о которой позволяют решать многие задачи научной и промышленной практики. Данный параметр в значительной степени влияет на распределение потоков флюида в пласте, и поэтому знания о специфике его изменения в процессе разработки объекта добычи представляются весьма актуальными. Одним из наиболее доступных источников информации о вертикальной проницаемости могут служить методы гидродинамических исследований скважин на нестационарных режимах фильтрации.

Цель. Оценка по кривым восстановления давления особенностей изменения вертикальной проницаемости пласта в процессе жизненного цикла эксплуатации горизонтальных скважин для условий горно-геологической обстановки конкретной залежи нефти.

Материалы и методы. Использованы материалы геофизических, промысловых гидродинамических исследований на установившихся и нестационарных режимах фильтрации и результаты их интерпретации. Применены способы обработки исходных данных методами математической статистики и графического анализа.

Результаты. Показано, что в определенном диапазоне забойных депрессий эксплуатации скважин перед их закрытием на исследование вертикальная проницаемость линейно зависит от перепада давления. Уравнение аппроксимирующей прямой имеет различные характеристики в разных скважинах. Полученные данные послужили основой для разработки метода, позволяющего при условии работы скважин на таких режимах осуществлять оперативную оценку горизонтальной проницаемости.

Выводы. Проведенные исследования дают основание утверждать, что движение пластового флюида в вертикальном направлении в пределах численно установленных интервалов депрессий осложнено нелинейными эффектами и не подчиняется закону Дарси. При более высоких перепадах давления нелинейные эффекты отсутствуют. В горизонтальной плоскости течение пластового флюида не является аномальным, т.е. соответствует закону линейной фильтрации.

Ключевые слова: вертикальная проницаемость, кривая восстановления давления, фильтрация, депрессия, нелинейные эффекты, закон Дарси

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Козубовский А.Г., Кузьмина Т.В. Анализ оценок вертикальной проницаемости по данным интерпретации кривых восстановления давления в горизонтальных скважинах. ПРОНЕФТЬ. Профессионально о нефти. 2024;9(3):34–42. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-3-34-42>

Статья поступила в редакцию 14.01.2024

Принята к публикации 29.02.2024

Опубликована 30.09.2024

ANALYSIS OF VERTICAL PERMEABILITY ESTIMATES BASED ON INTERPRETATION OF THE BUILD-UP OF PRESSURE IN HORIZONTAL WELLS

Aleksandr G. Kozubovsky¹, Tat'yana V. Kuzmina^{2,*}

¹JSC «InTEK», RF, Tyumen

²Tyumen Branch of LLC «Lukoil-engineering», RF, Tyumen

E-mail: Tatyana.Kuzmina2@lukoil.com

Introduction. Vertical permeability is an important characteristic of an oil-bearing reservoir, the knowledge of which allows solving many problems of scientific in oilfield practice. This parameter significantly affects the distribution of fluid flows in the formation, and therefore, understanding the specifics of its changes during the development of a production object is highly relevant. One of the most accessible sources of information on vertical permeability can be hydrodynamic well testing methods under unsteady filtration conditions.

Objective. To evaluate the peculiarities of changes in vertical permeability of the formation during the life cycle of horizontal wells under specific geological conditions of a particular oil field by analyzing pressure restoration curves.

Materials and methods. The materials of geophysical, production hydrodynamic research conducted under steady-state and unsteady filtration conditions, as well as the results of their interpretation, were used. Data processing methods using mathematical statistics and graphical analysis applied.

Results. Shown that within a certain range of wellbore depressurization during well operation before shutting them down for testing, vertical permeability linearly depends on pressure drop. The equation of the approximating straight line has different characteristics for different wells. The obtained data served as the basis for developing a method that allows for a prompt assessment of horizontal permeability under the condition of well operation under such regimes.

Conclusions. The conducted research provides that the movement of reservoir fluid in the vertical direction within numerically established depression intervals is complicated by nonlinear effects and does not follow Darcy's law. Nonlinear effects are absent at higher pressure differentials. In the horizontal plane, the flow of reservoir fluid is not anomalous, so, it corresponds to the law of linear filtration.

Keywords: vertical permeability, build-up, filtration, depression, nonlinear effects, Darcy's law.

Conflict of interest: the authors declare no conflict of interest.

For citation: Kozubovsky A.G., Kuzmina T.V. Analysis of vertical permeability estimates based on interpretation of the build-up of pressure in horizontal wells. PRONEFT. Professionally about oil. 2024;9(3):34–42.

<https://doi.org/10.51890/2587-7399-2024-9-3-34-42>

Manuscript received 14.01.2024

Accepted 29.02.2024

Published 30.09.2024

ВВЕДЕНИЕ

Большинство природных резервуаров нефти и газа в силу условий их образования практически всегда представляют собой геологические тела, обладающие неоднородностью свойств в различных направлениях. Не является исключением и такая характеристика продуктивных отложений, как проницаемость k . Изменение проницаемости принято рассматривать в определенной системе координат, например трехмерной (X, Y, Z) , ортогональной. При этом в плоскости осей $X-Y$ k идентифицируется как горизонтальная и обозначается соответственно k_x , k_y , а по оси Z — как вертикальная, с индексацией k_z . В научно-производственной практике преобладающее внимание уделяется исследованиям по определению горизонтальной проницаемости.

Обсуждение вопросов, относящихся к оценкам вертикальной проницаемости, представлено не столь масштабно, хотя сведения о k_z не менее важны и востребованы.

В частности, без адекватных представлений о значениях данного параметра невозможно решение многих задач в области управления и контроля разработки объектов добычи углеводородного сырья. Например, не обладая знаниями о достоверных величинах k_z и особенностях фильтрации флюидов в вертикальном направлении, неосуществимо выполнение с требуемой точностью таких расчетов, как вычисление анизотропии пористой среды по нормали к плоскости напластования, прогнозирование конусообразования газа или пластовых вод с целью предотвращения их преждевременного

прорыва к перфорированному интервалу, реализация аналитических оценок дебитов горизонтальных скважин, создание постоянно действующих фильтрационных моделей залежей, должным образом адаптированных к фактическим геолого-промысловым условиям, и т.п.

Поскольку вертикальная проницаемость значительным образом влияет на распределение потоков жидкости и газа в пласте, информация о специфике возможного изменения её численных уровней в процессе жизненного цикла эксплуатации продуктивного горизонта представляется весьма актуальной, особенно в ситуациях сложной горно-геологической обстановки при использовании профилей забоев, ориентированных параллельно горизонтальному распространению коллектора.

Одним из существующих источников подобных данных с весомым потенциалом аутентичной оценки k_z могут служить гидродинамические исследования на нестационарных режимах фильтрации, исполненные по схеме восстановления (падения) давления в закрытой скважине после её отработки с постоянным расходом.

ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Оценить по кривым восстановления давления (КВД) в горизонтальных скважинах специфические особенности изменений вертикальной проницаемости коллектора и охарактеризовать их влияние на процесс фильтрации пластового флюида для условий конкретной залежи нефти.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Способы получения сведений о вертикальной проницаемости можно разделить на две группы: лабораторные и промысловые. К лабораторным относят комплекс экспериментов, выполняемых на различных модификациях специального оборудования, позволяющего осуществлять изучение фильтрации жидкостей и газа через естественные керны в широком диапазоне температур и давлений. Недостатки такого подхода хорошо известны:

ИЗМЕНЕНИЕ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПЛАСТА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН ВЛИЯЕТ НА РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТОКОВ ФЛЮИДА, ПОЭТОМУ ЕЕ ОЦЕНКА ПО КВД ПОЗВОЛЯЕТ КОРРЕКТНО КОНТРОЛИРОВАТЬ ДОБЫЧУ УВ.

- трудности привязки используемых образцов к фактическим интервалам отбора;
- сложность воспроизведения реальных полей физико-механических параметров исследуемой среды в лабораторных условиях, т.е. выполнения подобия, одновременного действия всех сил различной природы в модели и пласте;
- ограниченный охват толщины и площади пласта анализируемым материалом, так как его отбор осуществляется не во всех скважинах.

В то же время необходимо отметить, что именно лабораторные измерения на кернах дают возможность установить специфические особенности коллекторских свойств породы и фильтрационных процессов, происходящих в ней, в том числе и в вертикальном направлении, информацию о которых получить иными приемами проблематично.

К промысловым способам следует отнести методы геофизических исследований скважин (ГИС). Не обладая инструментарием непосредственного определения k_z , они, тем не менее, потенциально располагают предпосылками для получения таких сведений, например, на основании связей «кern — ГИС», но в настоящий момент этот вопрос недостаточно изучен.

По промысловым данным параметр k_z может быть установлен и через характеристику анизотропии при анализе временной динамики и соотношений между собой дебитов воды (газа) и нефти для пластов с подошвенной водой или газовой шапкой (ГШ). Для этой

цели используются различные графоаналитические алгоритмы расчетов [1]. В качестве недостатков подобных вычислений следует указать, во-первых, их невысокую точность и, во-вторых, возможность их реализации как правило только на стадии разработки продуктивного объекта, когда период безводной (безгазовой) эксплуатации уже закончился.

К средствам определения вертикальной проницаемости с фиксацией исходных замеров на промысле также необходимо причислить и различные виды гидродинамических исследований скважин (ГДИС) на нестационарных режимах фильтрации. Среди них можно выделить зондирование коллектора методом КВД, некоторые схемы гидропрослушивания, например вертикальное, 3D-гидропрослушивание и др.

Несомненным положительным качеством такого подхода перед замерами k_z на кернах является то, что диагностика обсуждаемого свойства производится в пределах дренируемого объема, а не на образце породы несоизмеримо меньших размеров.

При этом нужно иметь в виду, что интерпретация исходных кривых давления позволяет совершать оценку только средних величин искомой характеристики в границах зоны влияния исследования. Кроме того, для обсуждаемых ГДИС характерно интегральное воздействие на отклик давления таких факторов, как присутствие непроницаемых границ, работа соседних скважин, фазовые превращения флюидов и т.п., что затрудняет раздельную фиксацию проницаемости вдоль различных направлений.

Тем не менее, при условии выполнения подобных работ с соблюдением установленных технико-технологических требований и в сочетании с иными источниками сведений о свойствах нефтегазонасыщенного горизонта существует возможность получать вполне достоверные данные о значениях k_z . Из всей рассматриваемой совокупности комплексного применения инструментальных измерений и расчетных процедур для приобретения знаний о k_z наиболее распространенным являются ГДИС в формате КВД. Повсеместное использование в значительных объемах позволяет отождествлять данный вид исследований с информационным ресурсом, который в наибольшей степени удовлетворяет потребности специалистов в части получения оперативных оценок k_z , особенно для скважин с горизонтальной направленностью забоя.

ОПИСАНИЕ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ ПО ДАННЫМ КВД ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН

Основой существующих алгоритмов определения k_z при интерпретации КВД в остановленных горизонтальных скважинах является аналитическая модель восстановления забойного давления ($P_{заб}$), подразумевающая на начальной стадии процесса наличие радиального движения флюида в вертикальной плоскости, перпендикулярной стволу. Расчетная схема [2] предусматривает использование диагностического графика фактического изменения производной $P'_{заб}$ во времени t , выполненного в логарифмическом масштабе, с помощью которого по характерным признакам устанавливают временной диапазон проявления раннего радиального режима течения (РРРТ). Далее, обрабатывая КВД в полулогарифмических координатах « $P_{заб}$ – Lnt », по уклону прямолинейного участка, соответствующего данному режиму, и исходя из известных соотношений, определяемых используемой методикой обработки замеров, производят оценку комплексного параметра $(k_y k_z)^{0.5}$.

Аналогичным образом выделяют поздний псевдорadiaльный режим течения (ППРТ), после чего, определив уклон надлежащей прямой на КВД, отображенной в поле графика с осями « $P_{заб}$ – Lnt », осуществляют расчет величины $(k_x k_y)^{0.5}$, а затем и k_z (полагая при этом, что $k_x = k_y$). При наличии сведений о протяженности эффективного интервала горизонтального ствола $L_{эф}$ значение k_y можно установить из раннего линейного режима течения (РЛРТ).

Существует также подход вычисления вертикальной проницаемости (используемый в данной статье), не требующий знания $k_y(k_x)$. Расчеты производятся исходя из времени окончания раннего радиального режима течения t_{Erf} (time to end of early-radial flow), характеризующего момент достижения волной распространения давления кровли или подошвы пласта. Значение t_{Erf} фиксируют по расчетной кривой $P'_{расч,заб} = f(t)$, полученной с помощью созданной аналитической модели. Используя выражение взаимосвязи t_{Erf} с k_z , выполняют численную идентификацию последней [3].

Здесь необходимо отметить, что на фактических КВД достаточно часто, особенно в горизонтальных скважинах, период РРРТ бывает завуалирован влиянием ствола скважины (ВСС). Кроме того, в силу ряда обстоятельств технического и технологического характера (недостаточное время

регистрации, негерметичность запорной арматуры, наличие «шумов» разнообразной природы и т.д.) не все прочие режимы течения могут быть доступны для диагностики. В такой ситуации существенно возрастает неопределенность генерируемой модели реакции пласта на изменение стационарного состояния. Например, согласно [4] при отсутствии РРРТ и РЛРТ k_z , а также такие свойства коллектора, как общий скин-фактор S и $L_{эф}$, оцениваются условно, в достаточно широком диапазоне их вероятных численных уровней (низкая степень достоверности).

В подобных случаях оперируют возможностью упрощения интерпретационного процесса посредством априорного задания части неизвестных параметров исходя из предыдущих знаний о них.

Эффективность такого подхода обусловлена тем, что использование в процедуре обработки КВД информации о количественных признаках объекта в статусе значений, установленных до интерпретации, предполагает в последующих вычислениях их увязку с другими искомыми величинами, с которыми они могут быть взаимосвязаны. Рассматриваемый прием позволяет сократить количество определяемых переменных и дает возможность получать их расчетные оценки, согласованные с заданным набором входных данных, повышая тем самым точность и однозначность аналитической модели отклика давления.

Источником априорных сведений могут служить мнения экспертов, проектная и нормативно-техническая документация, научно-техническая литература, показания и замеры, зарегистрированные ранее в аналогичных горно-геологических и промышленных условиях и т.п.

В представляемой работе авторы на примере конкретной залежи оптимизируют интерпретацию КВД, расширяя стандартный перечень исходных материалов (пористость, радиус скважины, эффективная толщина пласта и т.п.) за счет начальных приближений таких характеристик, как коэффициент влияния ствола скважины и механический скин-фактор, $S_{мех}$. Первичные значения ВСС и $S_{мех}$ устанавливаются по регрессионным зависимостям до осуществления выполняемых при анализе КВД оценок [5, 6].

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДАННЫХ

Информационной средой для проведения соответствующих вычислений послужили результаты интерпретации гидродинамических

исследований на установившихся и нестационарных режимах фильтрации, реализованные в процессе разработки нефтяного пласта одного из месторождений Западной Сибири. Выбор объекта изучения осуществлен исходя из следующих соображений:

- значительная степень вертикальной неоднородности, количество прослоев коллектора в скважинах варьирует по площади залежи от 2 до 15;
- все добывающие скважины имеют горизонтальное окончание, но с отличающимися особенностями забоев (длиной горизонтального участка, азимутальным углом его направленности, точкой его входа в пласт и т.п.);
- высокая периодичность и степень охвата эксплуатационного фонда методами ГДИС.

Перечисленные обстоятельства обуславливают существенную вариативность получаемых значений k_z , что может быть полезным для более детального понимания зафиксированных величин анализируемого показателя. Все расчеты исполнены на основе выборки, сформированной из качественных (неискаженных) исследований. Созданный исходный массив данных включал в себя сведения как о КВД, так и о дебитах жидкости (Q) и соответствующих им забойных депрессиях на пласт (ΔP) при стационарных условиях притока, имевших место непосредственно перед записью кривых восстановления давления. Полученная совокупность замеров Q , пластового давления ($P_{пл}$), ΔP и кривых изменения $P_{заб}$ в остановленных и закрытых скважинах обрабатывалась общепринятыми

методами, но с использованием процедуры оптимизации интерпретации КВД посредством задания априорных значений коэффициента ВСС и величин $S_{мех}$. Последующее согласование фактических КВД с аналитической характеристикой давления дало возможность получать адекватные модели отклика давления на основе которых для идентификации РРРТ генерировались кривые $P'_{расч, заб} - f(t)$ без учета влияния ВСС. Такой подход позволяет оценить уровень параметра t_{Eerf} и произвести оценку k_z . Графическая иллюстрация используемой схемы представлена на **рис. 1**.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В процессе проведенных работ установлено, что полученные при расчетах величины k_z ниже горизонтальной (радиальной, k_r) проницаемости и находятся в диапазоне от $0,5 \cdot 10^{-3}$ до $9,5 \cdot 10^{-3}$ мкм². Последующий анализ был акцентирован на выявление и объяснение возможных изменений вертикальной проницаемости в течение изучаемого периода отбора пластового флюида. С этой целью производилось сопоставление значений k_z с ΔP по данным исследования конкретных скважин. Наиболее показательные результаты приведены на **рис. 2 (а, б)**.

Комментируя **рис. 2**, необходимо отметить следующее.

В интервале зафиксированных перепадов давления от 1,1 до 6,03 МПа между рассматриваемыми характеристиками установлена линейная корреляция. Факт наличия такой

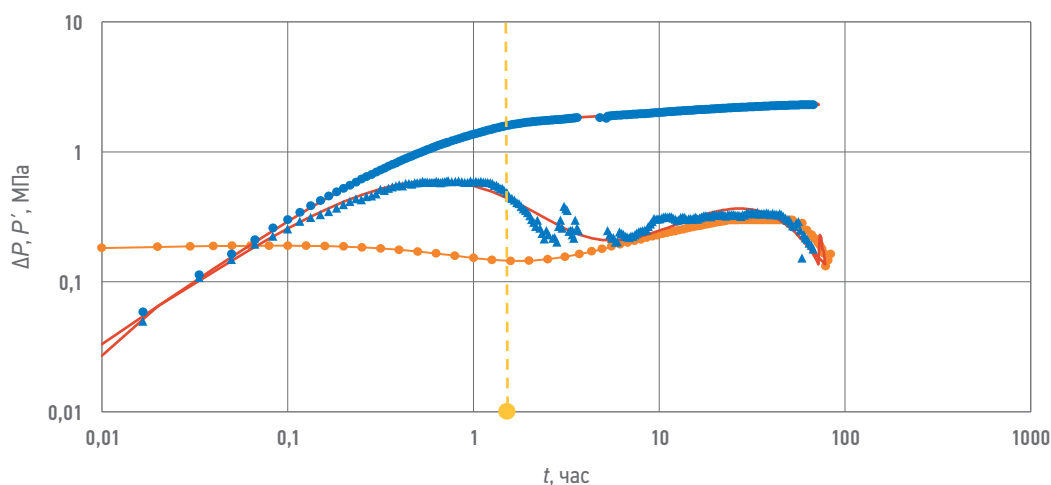


Рис. 1. Пример оценки времени окончания раннего радиального режима течения. Составлено авторами
 ● ΔP — фактические замеры давления; ▲ P' — фактическая производная давления; ● P' — модельная кривая производной давления, без учета влияния ВСС; ● t_{Eerf} — время окончания раннего радиального режима течения флюида; — модель с учетом априорно заданных величин: ВСС и $S_{мех}$

Fig. 1. Example of estimating the end time of the early radial flow. Compiled by the authors
 ● ΔP — pressure measurement, fact; ▲ P' — pressure derivative, fact; ● P' — pressure derivative, model, without the well bore storage effect; ● t_{Eerf} — end time of the early radial flow; — a model with prior parameters: WBS, $S_{мех}$

взаимосвязи между k_z и ΔP свидетельствует о том, что движение природной газожидкостной смеси, ориентированное перпендикулярно плоскости напластования, не подчиняется закону Дарси. Фактическая совокупность замеров (см. **рис. 2**) аппроксимируется уравнением вида $k_z = a \cdot \Delta P + b$, где a и b коэффициенты уравнения регрессии. Экстраполяция линии регрессии до пересечения с осью абсцисс позволяет определить критическую депрессию ($\Delta P_{кр}$), которую можно рассматривать как аналог начального градиента давления, в связи с чем предполагается, что течение флюида в вертикальном направлении при условии $\Delta P < \Delta P_{кр}$ либо отсутствует вовсе, либо столь незначительно, что им можно пренебречь.

Дополнительно на **рис. 2** отражены соотношения между радиальной (горизонтальной) проницаемостью (k_r) и ΔP , из которых следует, что k_r остается практически неизменной во всем диапазоне зарегистрированных ΔP . Данное обстоятельство позволяет констатировать, что характер фильтрации в горизонтальном направлении соответствует закону Дарси.

Определения k_z при более высоких депрессиях (от 6,03 до 8,49 МПа) показывают, что каких-либо существенных изменений анализируемого параметра при этом не наблюдается, **рис. 3**. Установленный факт находится в соответствии с выводами исследований ряда авторов [7, 8, 9] и свидетельствует о том, что в данном интервале ΔP закон фильтрации линейный. В качестве примера на **рис. 3** иллюстрируется выделение областей с соответствующим законом Дарси (2) и не соответствующим ему (1) характером движения флюида. Из рисунка видно, что диапазон проявления нелинейных эффектов ограничен значениями $\Delta P_{кр}$ и $\Delta P_{пред}$ (аналог эффективного предельного градиента давления, точка, после которой тангенс угла наклона кривой фильтрации остается постоянным [7 и др.]). Выявленная специфика фильтрационных процессов, исходя из существующих на сегодня представлений, характерна для низкопроницаемых коллекторов [8, 9, 10, 11 и др.] и не противоречит полученным определениям k_z .

Принятая для области проявления нелинейных эффектов регрессионная модель дает возможность производить оперативные оценки k_z и $\Delta P_{кр}$ исходя из режима отбора флюида, но для того, чтобы их реализовать, необходимо располагать сведениями о коэффициентах a и b , которые различны для каждой скважины, равно как и параметры $\Delta P_{кр}$ и $\Delta P_{пред}$. Качество проводимых ГДИС и промысловых замеров не всегда

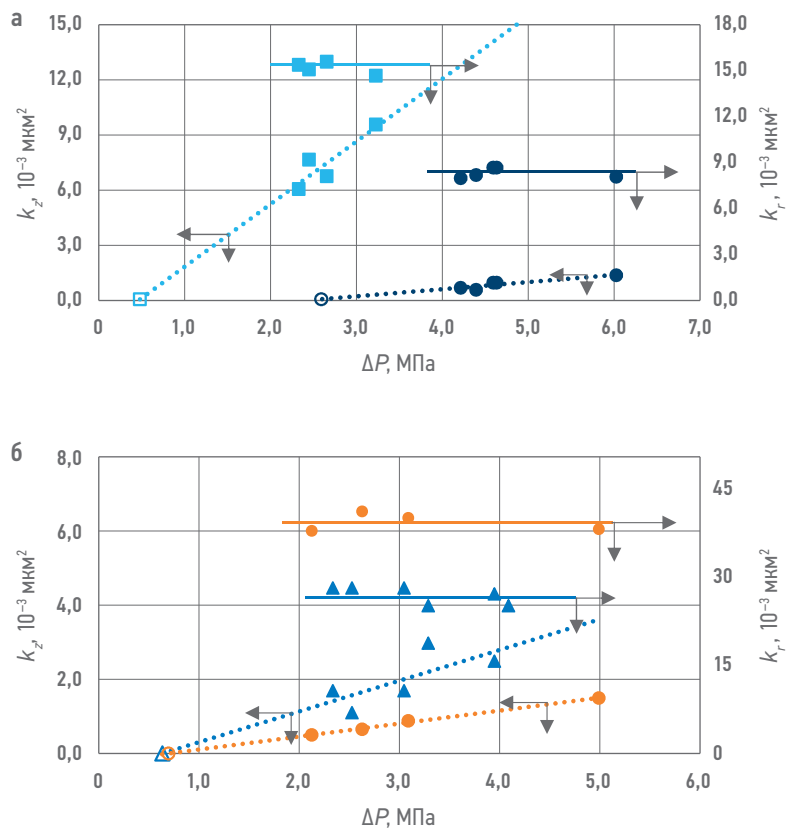


Рис. 2. Зависимость вертикальной и радиальной (горизонтальной) проницаемостей (k_z , k_r) от депрессии на пласт (ΔP) в процессе эксплуатации скважин перед их закрытием на КВД. Составлено авторами

а) скважины 1, 2; б) скважины 3, 4; ●, ▲, ○ скважины соответственно 1, 2, 3, 4; □, △, ◇ $\Delta P_{кр}$ соответственно для скважин 1, 2, 3, 4

Fig. 2. The dependence of vertical and radial (horizontal) permeability (k_z , k_r) on depression on the reservoir (ΔP) during the operation of wells before their closure on the Build-up. Compiled by the authors

а) wells 1, 2; б) wells 3, 4; ●, ▲, ○ wells 1, 2, 3, 4; □, △, ◇ ΔP_{cr} respectively for wells 1, 2, 3, 4

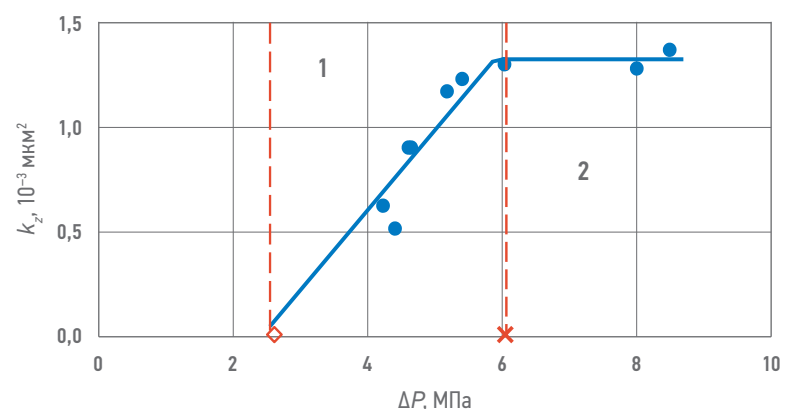


Рис. 3. Зависимость вертикальной проницаемости от депрессии на пласт в процессе эксплуатации скважины перед ее закрытием на КВД. Составлено авторами

1 — область проявления нелинейных эффектов фильтрации; 2 — область соответствия характера течения жидкости закону Дарси

◇ $\Delta P_{кр}$; × $\Delta P_{пред}$

Fig. 3. The dependence of vertical permeability on depression on the reservoir during the operation of the well before its closure on the Build-up. Compiled by the authors

1 — the area of manifestation of nonlinear filtration effects; 2 — the area of correspondence of the nature of the fluid flow to Darcy's law

◇ ΔP_{cr} ; × ΔP_{limit}

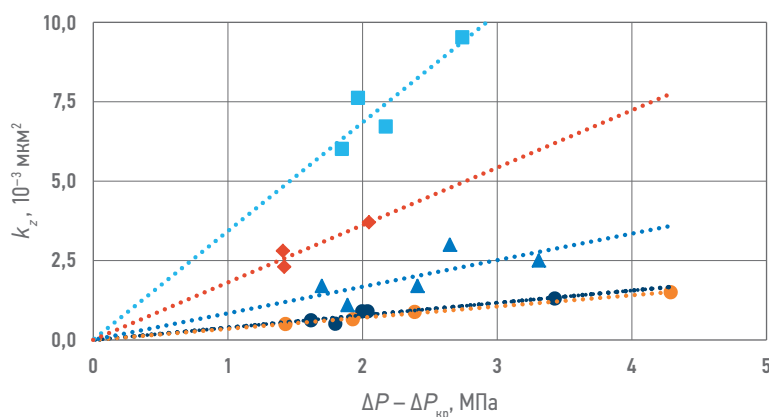


Рис. 4. Зависимость вертикальной проницаемости от параметра $\Delta P - \Delta P_{cr}$.

Составлено авторами

● ■ ▲ ◆ скважины соответственно 1, 2, 3, 4, 5

Fig. 4. Dependence of vertical permeability on the $\Delta P - \Delta P_{cr}$ parameter. Compiled by the authors

● ■ ▲ ◆ wells 1, 2, 3, 4, 5

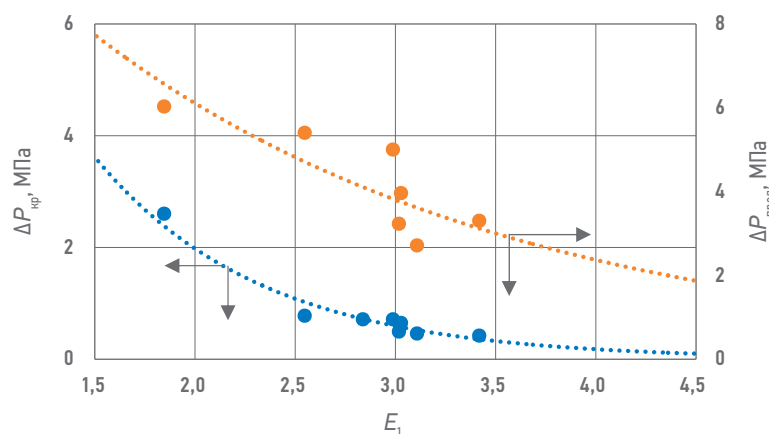


Рис. 5. Зависимость ΔP_{cr} и $\Delta P_{пред}$ от комплексного параметра E_1 . Составлено авторами

Fig. 5. The dependence of ΔP_{cr} and ΔP_{limit} on the complex parameter E_1 . Compiled by the authors

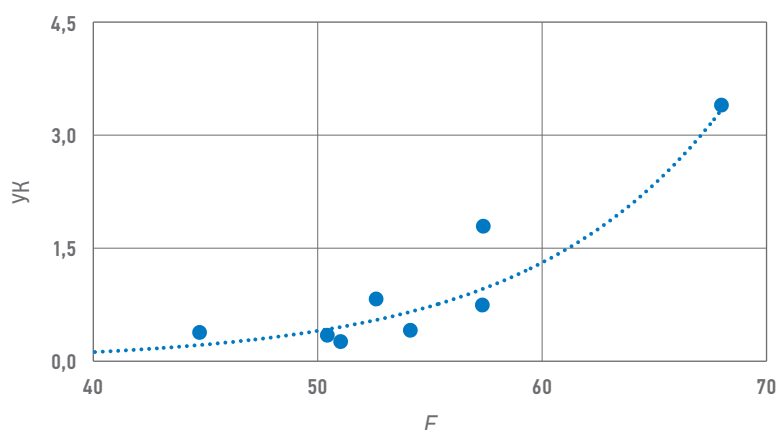


Рис. 6. Зависимость углового коэффициента (УК) от величины параметра F . Составлено авторами

Fig. 6. The dependence of the slope on the parameter F . Compiled by the authors

дает возможность сформировать требуемый объем кондиционных исходных данных, чтобы осуществить их определение. В ситуации дефицита надлежащих материалов

для прямой численной идентификации величин a , b , $P_{кр}$ и $\Delta P_{пред}$ целесообразно использование косвенных показателей, источником которых могут быть, например, геофизические методы изучения естественных насыщенных пористых сред.

С целью сокращения количества подлежащих установлению переменных выполнена оптимизация графических построений посредством приведения аргумента ΔP к формату $\Delta P^* = (\Delta P - \Delta P_{кр})$. Результаты поясняются

рис. 4, демонстрирующим, что зависимость k_z от ΔP^* описывается уравнением вида $k_z = a \cdot (\Delta P - \Delta P_{кр})$ и необходимость в нахождении коэффициента b при этом отпадает.

При последующем анализе осуществлялся поиск взаимосвязи $\Delta P_{кр}$, a (в дальнейшем угловой коэффициент УК) и $\Delta P_{пред}$ с набором геолого-физических параметров, которые могли быть доступны для определения в каждой скважине.

В частности, удалось установить, что $\Delta P_{кр}$ соотносится с комплексом E_1 представляющим собой сочетание величин, соответствующих геометрическим особенностям забоя скважины и атрибутам пустотной емкости коллектора [12] (рис. 5).

Оценка $\Delta P_{пред}$ при текущей степени изученности для конкретных условий может быть ориентировочно произведена исходя из корреляции, которая представлена также на рисунке 5.

Для углового коэффициента получена статистическая модель, отражающая его связь с фактором-аргументом F , являющимся функцией свойств пласта и характеристик окончания ствола скважины (рис. 6).

Выявленные соотношения для рассматриваемых переменных позволяют выполнять оперативные определения вертикальной проницаемости при условии, что фактическая депрессия эксплуатации скважины соответствует требованию $\Delta P_{кр} < \Delta P < \Delta P_{пред}$.

Расчеты выполняются в следующей очередности:

- проверяют принадлежность ΔP на режиме эксплуатации скважины диапазону: $\Delta P_{кр} < \Delta P < \Delta P_{пред}$;
 - для этого, используя значение E_1 для конкретной скважины, по уравнениям регрессии на основе рисунка 5 устанавливают величины $\Delta P_{кр}$ и $\Delta P_{пред}$;
 - если обозначенное требование выполняется, то вычисляется разность $(\Delta P - \Delta P_{кр})$;
 - исходя из уровня F в выбранной для анализа скважине находят УК (рис. 6);
 - из выражения $k_z = УК \cdot (\Delta P - \Delta P_{кр})$ производят оценку вертикальной проницаемости.
- Сопоставление между числовыми отображениями k_z , зафиксированными

при интерпретации КВД и по предлагаемому методу, отображены на **рис. 7**.

График на рисунке, на наш взгляд, наглядно свидетельствует о том, что используемый методический прием обеспечивает получение сведений о k_z с приемлемой степенью точности относительно аналогичных данных по кривой восстановления давления для ситуации, когда $\Delta P_{кр} < \Delta P < \Delta P_{пред}$. Результаты выполненного анализа могут быть полезны для решения различных нефтепромысловых задач, например таких, как оптимизация интерпретации КВД, разработка фильтрационных моделей залежей, выполнение специальных расчетов для оценок дебитов и продуктивности скважин, вертикальной анизотропии проницаемости и т.п.

ВЫВОДЫ

Проведенные исследования дают основание для следующих выводов:

- сравнение полученных в результате обработки КВД величин вертикальной и горизонтальной проницаемостей (k_z и k_r) показывает, что определения k_z существенно ниже k_r и находятся для условий конкретной залежи в интервале от $0,5 \cdot 10^{-3}$ до $9,5 \cdot 10^{-3}$ мкм². Исходя из существующих на сегодня представлений о фильтрационных свойствах пород такие значения k_z соответствуют низкопроницаемому уровню;
- движение пластового флюида в вертикальном направлении в диапазоне депрессий эксплуатации скважин от $\Delta P_{кр}$ до $\Delta P_{пред}$ осложнено нелинейными эффектами и не подчиняется закону Дарси. При депрессиях выше $\Delta P_{пред}$ нелинейные эффекты отсутствуют;
- в плоскости напластования анализируемого природного резервуара течение нефти (нефти и воды) не является аномальным, т.е. соответствует закону Дарси;
- разработан метод оперативной прогнозной оценки k_z , позволяющий получать

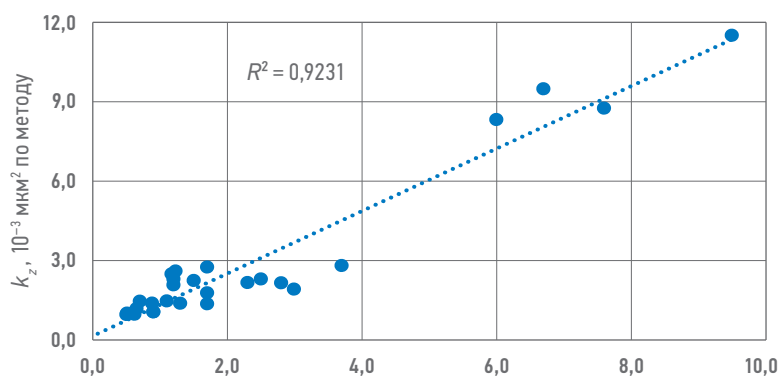


Рис. 7. Соотношение между величинами вертикальной проницаемости, определенными по КВД и рассчитанными по предлагаемому методу.

Составлено авторами

Fig. 7. Relationship between vertical permeability values determined by Build-up and calculated using the proposed method. Compiled by the authors

сведения о данном параметре с приемлемой точностью, при условии что $\Delta P_{кр} < \Delta P < \Delta P_{пред}$. Отмеченное обстоятельство дает возможность использовать полученную таким способом информацию о k_z в качестве априорно задаваемой характеристики перед реализацией процедуры интерпретации КВД. Применение предлагаемого методического приема реализуется в любой скважине, где исходная информация для расчетов может быть доступна;

- результаты расчетов требуют уточнения и дополнения, особенно в части перепадов давлений меньших $\Delta P_{кр}$ и больших $\Delta P_{пред}$, в том числе и для иной горно-геологической обстановки. Для этого необходимо проведение промысловых исследований в рамках специальных программ и выполнение лабораторных экспериментов на образцах керна с учетом его пространственной ориентации в точке отбора;
- отдельному рассмотрению и изучению подлежат вопросы интерпретации КВД, зарегистрированных в условиях эксплуатации горизонтальных скважин при депрессиях меньших $\Delta P_{кр}$, когда режим раннего радиального течения может отсутствовать.

Список литературы

1. Телнов А.П. Подземная гидрогазодинамика. — Уфа, 1974. — 224 с.
2. Брехунцов А.М., Телнов А.П. Развитие теории фильтрации жидкости и газа к горизонтальным стволам скважин. — Тюмень: ОАО «СибНАЦ», 2004. — 290 с.
3. Lee J., Rollins J.B., Spivey J.P. Pressure transient testing. SPE, Richardson, 2003.
4. Баженов Д.Ю., Артамонов А.А., Шорохов А.Н. и др. Комплексирование результатов гидродинамических и промыслово-геофизических исследований на примере нефтегазоконденсатного месторождения ПАО «Газпром нефть» // Нефтяное хозяйство. — 2016. — № 12. — С. 52–55.
5. Нозубовский А.Г., Нузьмина Т.В. Оптимизация интерпретации кривых восстановления давления, осложненных эффектом сегрегации фаз в лифте подъемных труб // ПРОнефть. Профессионально о нефти. — 2021. — Т. 6. — № 2. — С. 39–44. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2021-6-2-29-44>
6. Нозубовский А.Г., Нузьмина Т.В., Ефимов А.А. Анализ результатов оценок скин-фактора в условиях дефицита исходной информации // ПРОнефть. Профессионально о нефти. — 2023. — Т. 8. — № 2. — С. 97–104. <https://doi.org/10.51890/25877399-2023-82-97-104>

7. Байков В.А., Галеев Р.Р., Колонских А.В., Макатров А.К., Политов М.Е., Телин А.Г. Нелинейная фильтрация в низкопроницаемых коллекторах. Анализ и интерпретация результатов лабораторных исследований ядра Приобского месторождения // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». — 2013. — № 2. — вып. 31. — С. 8–12.
 8. Байков В.А., Колонских А.В., Макатров А.К., Политов М.Е., Телин А.Г. Нелинейная фильтрация в низкопроницаемых коллекторах. Лабораторное фильтрационное исследование ядра Приобского месторождения // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». — 2013. — № 2. — Вып. 31. — С. 4–7.
 9. Зайцев М.В., Михайлов Н.Н., Туманова Е.С. Модели нелинейной фильтрации и влияние параметров нелинейности на дебит скважин в низкопроницаемых коллекторах // Георесурсы. — 2021. — Т. 23. — № 4. — С. 44–50.
 10. Zhao L., Jiang H., Wang H., Yang H., Sun F., Li J. Representation of a new physics-based non-Darcy equation for low-velocity flow in tight reservoirs // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. — 2020. — Vol. 184. — No. 106518. — Pp. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106518>
 11. Hao F., Cheng L.S., Hassan O., Hou J. «Threshold Pressure Gradient in Ultra-low Permeability Reservoirs» *Petroleum Science and Technology*. — 2008. — Vol. 26. — Pp. 1024–1035.
 12. Козубовский А.Г., Кузьмина Т.В. Исследование влияния процесса разработки залежи на продуктивность скважин. // *ПРОнефть. Профессионально о нефти*. — 2022. — Т. 7. — № 2. — С. 32–40. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2022-7-2-32-40>
- References**
1. Telkov A.P. *Subsurface hydrogasodynamics*. Ufa, 1974. — 224 p.
 2. Brekhuntsov A.M., Telkov A.P. *Development of the theory of fluid and gas filtration to horizontal wellbores*. Tyumen: LLC "SibNATs", 2004. 290 p.
 3. Lee J., Rollins J.B., Spivey J.P. *Pressure transient testing*. SPE, Richardson, 2003.
 4. Bazhenov D.Yu., Artamonov A.A., Shorokhov A.N. et al. Integrating the results of hydrodynamic and field-geophysical studies using the example of the oil and gas condensate field of PJSC "Gazprom Neft" // *Oil Industry*. 2016, no. 12, pp. 52–55.
 5. Kozubovsky A.G., Kuzmina T.V. Optimizing of interpretation Build-up with the effect of phase segregation in the lifting tubes // *PROneft. Professional about oil*. 2021, vol. 6, no. 2, pp. 39–44. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2021-6-2-29-44>
 6. Kozubovsky A.G., Kuzmina T.V., Efimov A.A. Analysis of the results determination of the skin factor in conditions of deficit of initial information // *PROneft. Professional about oil*. 2023, vol. 8, no. 2, pp. 97–104. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-202382-97-104>
 7. Baikov V.A., Galeev R.R., Kolonskykh A.V., Makatrov A.K., Politov M.E., Telyin A.G. Nonlinear filtration in low-permeability reservoirs. Analysis and interpretation of core laboratory test results of the Priobskoye field // *Scientific and Technical Bulletin of NK Rosneft*. 2013, no. 2, issue 31, pp. 8–12.
 8. Baikov V.A., Kolonskykh A.V., Makatrov A.K., Politov M.E., Telyin A.G. Nonlinear filtration in low-permeability reservoirs. Laboratory filtration study of the core of the Priobskoye field // *Scientific and Technical Bulletin of NK Rosneft*. 2013, no. 2, issue 31, pp. 4–7.
 9. Zaitsev M.V., Mikhailov N.N., Tumanova E.S. Models of nonlinear filtration and the influence of nonlinearity parameters on well productivity in low-permeability reservoirs // *Georesources*. 2021, vol. 23, no. 4, pp. 44–50.
 10. Zhao L., Jiang H., Wang H., Yang H., Sun F., Li J. Representation of a new physics-based non-Darcy equation for low-velocity flow in tight reservoirs // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2020, vol. 184, no. 106518, pp. 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106518>
 11. Hao F., Cheng L.S., Hassan O., Hou J. Threshold Pressure Gradient in Ultra-low Permeability Reservoirs // *Petroleum Science and Technology*. 2008, vol. 26, pp. 1024–1035.
 12. Kozubovsky A.G., Kuzmina T.V. The impact of development of reservoir on well productivity // *PROneft. Professional about oil*. 2022, vol. 7, no. 2, pp. 32–40. <https://doi.org/10.51890/2587-7399-2022-7-2-32-40>

ВКЛАД АВТОРОВ / AUTHOR CONTRIBUTIONS

А.Г. Козубовский — разработал концепцию статьи, выполнил обзор публикаций по теме статьи, подготовил текст статьи, окончательно утвердил версию статьи

Т.В. Кузьмина — организовала получение данных для анализа, выполнила обзор публикаций по теме статьи, провела интерпретацию гидродинамических исследований, окончательно утвердила версию статьи

Aleksandr G. Kozubovsky — developed the concept of the article, conducted a literature review on the topic, prepared the article text, and finally approved the article version.

Tat'yana V. Kuzmina — organized the data acquisition for analysis, conducted a literature review on the topic, interpreted the hydrodynamic research, and finally approved the article version.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Александр Геннадьевич Козубовский — руководитель группы НИР, ЗАО НПО «ИНТЭК»

Aleksandr G. Kozubovsky — Head of research group, InTEK CJSC

Татьяна Валерьевна Кузьмина* — главный специалист управления проектного сопровождения разрабатываемых месторождений, Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг» «КогалымНИПИнефть», г. Тюмень 625000, Россия, г. Тюмень, ул. Республики, д. 143а. e-mail: Tatyana.Kuzmina2@lukoil.com

Tat'yana V. Kuzmina* — Chief specialist of Department of development of oil and gas fields, Branch of LLC LUKOIL-Engineering "KogalymNIPIneft" 143a, Republic str., 625000, Tyumen, Russia. e-mail: Tatyana.Kuzmina2@lukoil.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author