

# Проблематика гидродинамических исследований сеноманских скважин в условиях наличия проницаемой перемычки

Аккерман А.Ш.

ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия  
asdautbekova@tnnc.rosneft.ru

## Аннотация

В статье приводится анализ результатов гидродинамических исследований (ГДИ) сеноманских отложений, вскрывающихся горизонтальными скважинами (ГС). Особенностью рассматриваемого коллектора является наличие проницаемой перемычки, изначально принятой как неколлектор. Однако по мере разработки залежи возникли предположения на вероятное дренирование всей газонасыщенной толщины. Этот факт стал основанием для пересмотра результатов исследований.

При выполнении анализа по части скважин наблюдалось снижение производной под конец замера кривой восстановления давления (КВД). Ранее падение производной оценивалось как искажение отклика, связанное с алгоритмами сглаживания зашумленных данных. При пересмотре результатов ГДИ была выявлена возможность более сложных причин такого поведения, которыми являются активное влияние газовой воды (ГВК) или работа всего газонасыщенного интервала. Для уточнения данных предположений были выполнены расчеты на численной модели.

По результатам расчета были получены отклики, схожие с фактическими при моделировании работы всей газонасыщенной толщины через проницаемую перемычку без влияния ГВК. Выполненный анализ подтверждает работу второго цикла через перемычку, что позволило внести корректировки в режимы работы скважин с целью предотвращения преждевременного обводнения в связи с поднятием уровня ГВК. Эффект от данных мероприятий оценивается в увеличении конечного КИГ на 5 %.

## Материалы и методы

В качестве исходных данных в статье рассмотрены результаты первичных ГДИ скважин сеноманских отложений. В ходе работы выполнен анализ и категоризация диагностических графиков в зависимости от вида откликов и конструкции скважин. Для подтверждения выдвинутых предположений был выполнен расчет на гидродинамической модели для вариантов вертикальной

и горизонтальной скважины с различными значениями проницаемости перемычки.

## Ключевые слова

гидродинамические исследования, кривая восстановления давления, сеноманские отложения, слоистый коллектор, горизонтальные скважины

## Для цитирования

Аккерман А.Ш. Проблематика гидродинамических исследований сеноманских скважин в условиях наличия проницаемой перемычки // Экспозиция Нефть Газ. 2023. № 8. С. 70–74. DOI: 10.24412/2076-6785-2023-8-70-74

Поступила в редакцию: 17.11.2023

OIL PRODUCTION

UDC 622.279.23 | Original Paper

## Well test problems of Cenomanian reservoir with the presence of a permeable barrier

Akkerman A.Sh.

“Tyumen petroleum research center” LLC, Tyumen, Russia  
asdautbekova@tnnc.rosneft.ru

## Abstract

The article provides an analysis of well tests of horizontal wells producing in Cenomanian reservoir. A feature of the reservoir is the presence of a permeable shale barrier between two layers, initially accepted as a non-collector. However, as the field was developed, assumptions arose about the possibility of drainage of the entire gas-saturated thickness. This fact became the basis for revising the research results.

Some wells showed a drop of pressure build-up derivative. Previously, the derivative drop was assessed as a data distortion associated with smoothing algorithms for noisy data. Reviewing of the well test results showed the possibility of more complex reasons for this behavior such as active influence of the gas-water contact or the producing of the entire gas-saturated interval. To clarify these assumptions, there were performed numerical simulation.

Simulation results showed responses similar to producing of the entire gas-saturated thickness through a permeable shale barrier without the influence of the gas-water contact. The analysis results confirm the producing of the second layer through the barrier and enforce the restrictions to the well operating conditions in order to prevent premature watering due to a rise in the level of the gas-water contact. This allows to increase the final gas recovery factor by 5%.

## Materials and methods

As initial data, the article considers the well test results of Cenomanian reservoir. During the work, build-up log-log graphs were analyzed and categorized depending on the type of responses and well construction. To confirm the assumptions made, a numerical simulation was

performed for cases of a vertical and horizontal well with different values of the barrier permeability.

## Keywords

well test analysis, pressure build-up, Cenomanian reservoir, layered reservoir, horizontal wells

## For citation

Akkerman A.Sh. Well test problems of Cenomanian reservoir with the presence of a permeable barrier. Exposition Oil Gas, 2023, issue 8, P. 70–74. (In Russ). DOI: 10.24412/2076-6785-2023-8-70–74

Received: 17.11.2023

## Введение

Объектом исследования является газоносная залежь пласта ПК1, находящаяся на начальном этапе разработки. Как известно, сеноманские отложения являются одними из ключевых по запасам сухого газа, добыча которого ведется с 60–70-х гг. XX века, что определяет их достаточно высокую изученность. Одним из ключевых их свойств является высокая проницаемость (порядка 1 Д), обеспечивающая высокую продуктивность скважин. Вместе с тем коллекторы пласта представлены слабосцементированными песчаниками, что является критическим условием для существенного ограничения депрессии при эксплуатации скважин. С точки зрения геологии анализируемый в данной статье пласт имеет особенность, связанную с наличием двух циклитов: верхнего ПК1-1 и нижнего ПК1-2, разделенных перемычкой (рис. 1). Тип залежи — массивная, подстилание водой происходит полностью по циклиту ПК1-2. Эти особенности были учтены при проектировании разработки месторождения, где в качестве базового варианта с целью предупреждения раннего обводнения было принято бурение горизонтальных скважин в верхний циклит ПК1-1.

В то же время, по данным отбора керна, перемычка представлена преимущественно глинистыми алевролитами, значение проницаемости которых составляет 1–10 мД, что на несколько порядков ниже по сравнению с проницаемостями песчаных коллекторов, в связи с чем при проектировании разработки перемычка была принята как непроницаемая и в геологической модели учитывалась как неколектор. Однако темпы падения давления, отмечаемые при последующей эксплуатации, указывали на вероятность охвата дренированием нижнего циклита. Этот факт послужил основанием для пересмотра результатов ГДИ с целью выявления

характерных закономерностей, указывающих на эту возможность.

## Результаты ГДИ

Эксплуатационный фонд характеризуется полным охватом исследованиями, непосредственно как после бурения, так и в течение разработки залежи. На нескольких кустах было выполнено бурение вертикальных скважин с целью контроля за продвижением ГВК, где также были выполнены ГДИ.

В целом результаты выполненных исследований можно охарактеризовать как кондиционные — по всем скважинам были получены отклики на радиальный режим течения, что позволило достоверно оценить параметры системы «пласт-скважина». Однако интерпретация таких исследований осложнена двумя ключевыми проблемами, влияющими на точность определений: значительной зашумленностью данных давления и неопределенностью по дренируемой толщине.

## Зашумленность данных давления

Данная проблема является характерной для высокопроницаемых пластов, эксплуатирующихся на невысоких депрессиях, что определяет невысокие темпы прироста давления на конечном периоде записи КВД, составляющие порядка 0,05 бар в сутки. При этом регистрация данных давления, как правило, ведется приборами с пьезорезистивными датчиками с разрешающей способностью, составляющей порядка 0,001 бар, что является недостаточным для записи кривых на поздних этапах замера без значительной зашумленности.

На рисунке 2 представлен типичный пример записи КВД с использованием пьезорезистивных датчиков. В нижнем правом углу основного рисунка представлен общий вид записанной КВД, на основном рисунке представлен конечный участок кривой, где отчетливо выделяются горизонтальные

линии, соответствующие приросту давления по минимальному порогу чувствительности 0,001 бар. Однако в то же время отмечается зашумленность данных давления в пределах одного временного периода, составляющая порядка 0,02 бар.

Зашумленность кривых оказывает влияние на качество интерпретации данных КВД. Диагностический график сеноманской скважины, построенный без алгоритмов сглаживания, пример которого представлен на рисунке 3, характеризуется существенным разбросом точек производной. Анализ такого графика невозможен ввиду отсутствия характерных признаков поведения давления и широким диапазоном определения «полки» kh. Для проведения интерпретации необходимо прибегать к сглаживанию с высоким значением интервала дифференциации. На рисунке 3б кривая становится возможной для интерпретации при значении интервала сглаживания 0,6. В свою очередь, сглаживание с интервалом более 0,25 является критическим с точки зрения искажения фактического поведения [1]. Кроме того, после сглаживания зашумленные кривые зачастую характеризуются скачками производной вверх или вниз на конечном этапе замера КВД, что обусловлено алгоритмами сглаживания и зачастую принимается пластовыми инженерами как влияние границ пласта [1, 2], что наблюдается на примере рисунка 3б.

Данная проблема может быть решена использованием приборов с кварцевыми датчиками, что подтверждается результатом тестовых замеров на одной из скважин пласта ПК1. Как видно из рисунка 4а, характер производной давления по данному кварцевому датчику легко считывается даже без алгоритма сглаживания кривых, а при его применении (рис. 4б) характеризуется отсутствием видимых изменений в поведении давления. В целом по сопоставлению со сглаженной кривой пьезорезистивного

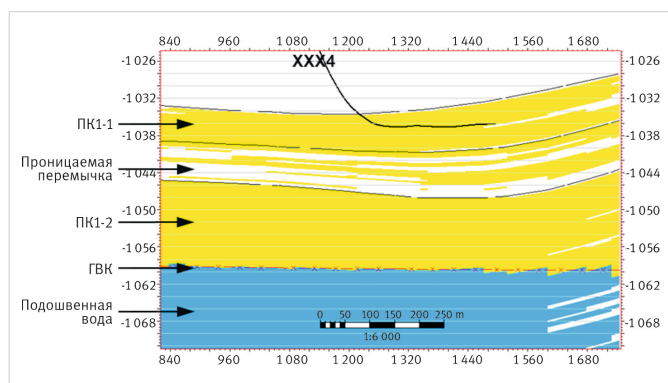


Рис. 1. Геологический разрез на примере скв. XXX4  
Fig. 1. Geological section using the example of well XXX4

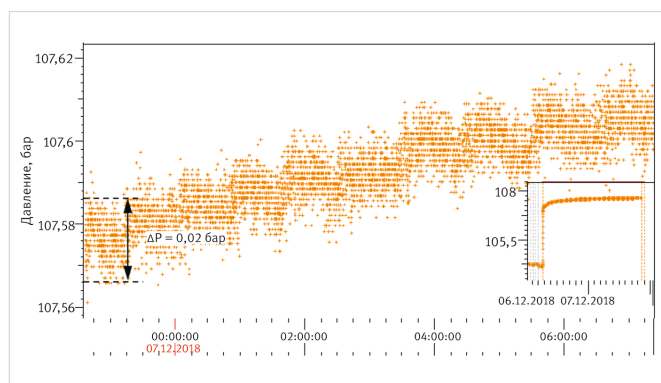


Рис. 2. Пример зашумленности данных давления при записи КВД  
Fig. 2. Example of noisy pressure data when recording pressure build-up curve

датчика отмечается отсутствие флуктуаций производной и резких скачков на конечной части замера. Закономерным является вывод о том, что только по показаниям кварцевого манометра можно судить о фактическом характере отклика давления. Их применение возможно в качестве разовых исследований на приоритетных скважинах, результаты исследований на которых влияют на оценку запасов и эффективности системы разработки (границы пласта, влияния неоднородности среды и др.).

### Неопределенность по дренируемой толщине

Как известно, «первичным» параметром, определяемым по данным КВД, является проводимость пласта  $kh$ . Точность оценки толщины, в свою очередь, влияет на точность определения проницаемости, на которую, в свою очередь, завязаны расчеты остальных параметров скважины. Во время как в вертикальных скважинах дренируемые толщины определяются, как правило, просто, с учетом данных геофизических исследований и вторичного вскрытия перфорацией. Для оценки отслеживания уровня подъема ГВК вертикальные скважины пласта ПК1 перфорировались не на полную эффективную газонасыщенную толщину, а только либо по первому, либо по второму циклиту. Для первого случая эффективная толщина определялась по толщине первого циклита, для второго случая — по газонасыщенной толщине второго циклита.

В ГС оценка дренируемых толщин «прямыми» методами невозможна. Для решения данной проблемы возможно использование 3D гидродинамической модели. Толщины определялись путем суммирования всех гидродинамически связанных слоев коллектора по разрезу, вскрытых стволом скважины. Впоследствии, при утверждении обновленной геологической модели, была произведена

переоценка дренируемых толщин и переинтерпретация данных исследования.

### Оценка влияния ГВК

При наличии проницаемой перемычки предполагалась реакция КВД на наличие в подошве второго циклита ГВК, который бы проявился как граница постоянного давления и вызвал падение производной в нуль [3]. По данным аналитического дизайна КВД, начало влияния ГВК оценивалось с первого часа замера. При этом по всем записанным КВД подобного поведения не наблюдалось. На рисунке 5а представлен график типовой КВД для ГС: ранне-радиальный режим скрыт влиянием ствола скважины и скин-фактора до 0,01 ч., затем отмечается работа горизонтального ствола в период до 1 ч. замера с последующим выходом на поздне-радиальный режим. Также стоит отметить, что по ряду скважин фиксировались несущественные снижения производной в конечной части замера, которые были приняты как результат существенного сглаживания зашумленных данных давления.

По итогам более подробного анализа выявилось противоречие между данным предположением и результатом замера КВД вертикальных скважин, диагностические графики которых представлены на рисунке 5б. Скважины XX2 и XX9, вскрывающие пласт ПК-1 во втором циклите и в непосредственной связи вблизи ГВК, показывают работу в условиях отсутствия влияния активной подошвенной воды, аналогично скважинам, вскрывающим верхний циклит. В первую очередь данное явление возможно объяснить существенной разницей между подвижностью воды и газа, в связи с чем наличие подошвенной воды проявляется аналогично естественной непроницаемой границе. Таким образом, для ГС наличие проницаемой перемычки не должно отображаться как падение производной до нуля. По ВС на возможный охват

дренированием всей эффективной толщины через перемычку указывает наличие сферического течения по скважинам XX5 и XX10, что является следствием небольшого интервала перфорации, вскрывающего существенно большую толщину (признак «частичного вскрытия») [3].

Для проверки данного утверждения было выполнено численное моделирование КВД скважины XX2 в ПО «Kappa Rubis». Модель представлена чередованием слоев коллектора и неколлектора согласно результатам интерпретации геофизических исследований (РИГИС), по которым задавались значения проницаемостей и водонасыщенности для слоев коллектора (рис. 6а). С целью оценки чувствительности КВД к проницаемости перемычки расчеты производились на три значения проницаемости: 1 мД, 10 мД и 25 мД. Для оценки влияния ГВК было выполнено два варианта расчета: без аквифера и с активным аквифером в подошве нижнего циклита.

Результаты расчета для варианта без влияния аквифера представлены на рисунке 7. Из рисунка видно, что в условиях чередующихся низко- и высокопроницаемого пропластков без влияния аквифера вид производной КВД имеет вид аналитической модели двойной проницаемости и проявляется как прогиб производной на среднем этапе замера. Вариация проницаемости перемычки при этом показывает, что чем ниже значение, тем позже наступает и дольше длится реакция и тем более глубокий формируется прогиб. В целом можно отметить, что в наблюдаемых диапазонах проницаемости перемычки прогиб является относительно неглубоким и легко может быть зашумлен при записи давления, что и отмечается при фактической регистрации КВД.

В случае активного аквифера (рис. 8) проницаемость перемычки в заданных диапазонах не влияет значительно на характер

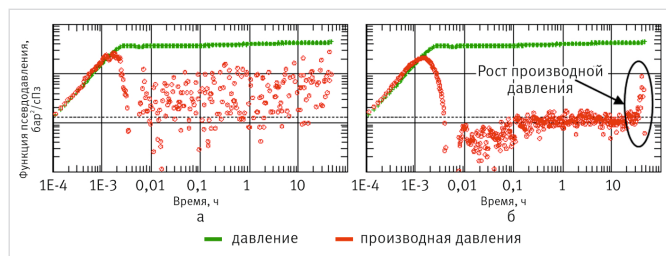


Рис. 3. Пример диагностического графика зашумленной КВД сеноманской скважины: а — график без сглаживания; б — график со сглаживанием 0,6  
Fig. 3. An example of a diagnostic graph of a noisy pressure build-up curve in a cenomanian well: а — graph without smoothing; б — graph with smoothing 0,6

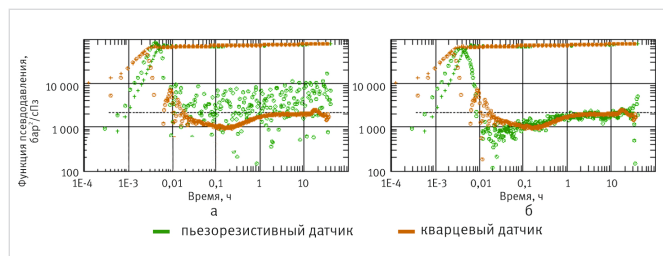


Рис. 4. Сопоставление диагностических графиков КВД по данным давлений пьезорезистивного и кварцевого манометров: а — график без сглаживания; б — график со сглаживанием 0,4  
Fig. 4. Comparison of diagnostic pressure build-up graphs based on pressure data from piezoresistive and quartz pressure gauges: а — graph without smoothing; б — graph with smoothing 0,4

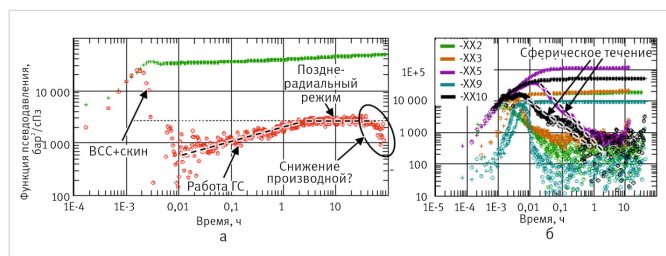


Рис. 5. Диагностические графики скважин пласта ПК1: а — ГС; б — ВС  
Fig. 5. Diagnostic graphs of wells of the PK1 formation: а — horizontal well; б — vertical well

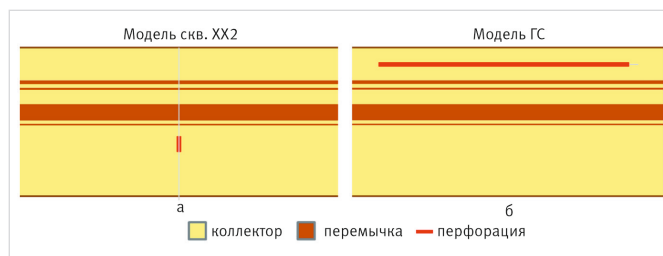


Рис. 6. Схема разреза и вскрытия скважинами пласта ПК1 при проведении гидродинамических расчетов: а — скважина XX2; б — ГС  
Fig. 6. Scheme of the section and well penetration of the PK1 formation during hydrodynamic calculations: а — well XX2; б — horizontal well

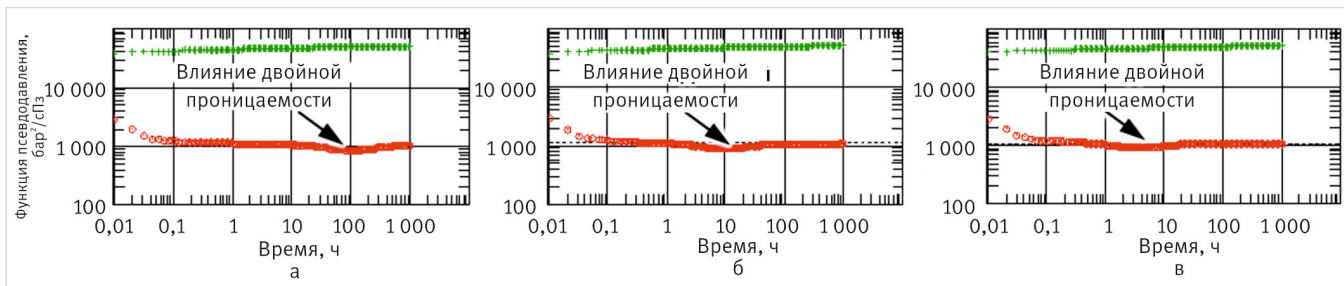


Рис. 7. Диагностический график КВД по результатам численного моделирования скв. XX2 без влияния аквифера: а — проницаемость перемычки 1 мД; б — проницаемость перемычки 10 мД; в — проницаемость перемычки 25 мД  
 Fig. 7. Diagnostic graph of pressure build-up curve based on the results of numerical modeling of a well. XX2 without the influence of the aquifer: а — permeability of the bridge 1 mD; б — permeability of the bridge 10 mD; в — permeability of the jumper 25 mD

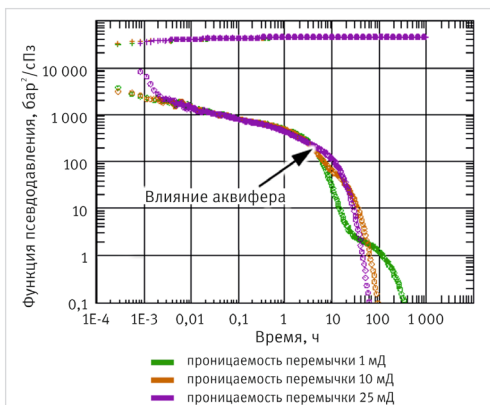


Рис. 8. Диагностический график КВД по результатам численного моделирования скв. XX2 с влиянием аквифера  
 Fig. 8. Diagnostic graph of pressure build-up curve based on the results of numerical modeling of a well XX2 with aquifer influence

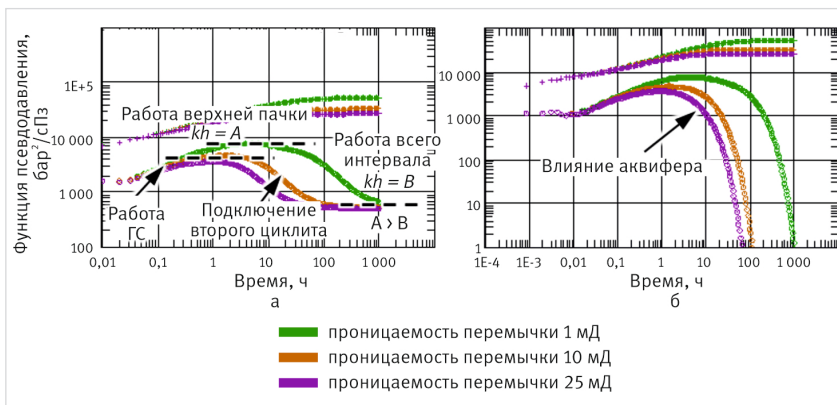


Рис. 9. Диагностический график КВД по результатам численного моделирования скв. ГС: а — без аквифера; б — с аквифером  
 Fig. 9. Diagnostic graph of pressure build-up curve based on the results of numerical modeling of a horizontal well: а — without aquifer; б — with aquifer

поведения производной. Для варианта с проницаемостью 1 мД наблюдается переходный процесс в интервале 20–100 ч., что связано с постепенным охватом всей газонасыщенной толщины на фоне более раннего признака влияния аквифера. Очевидно, что по результатам расчетов более близким к фактическому является отклик без влияния аквифера. Это позволяет сделать вывод о том, что в нашем случае наличие подошвенной воды в условиях высокопроницаемого газонасыщенного пласта проявляется как естественная непроницаемая граница.

Вторым этапом являлась оценка влияния многослойного коллектора на данные КВД в ГС. Для расчетов использовалась аналогичная скважине XX2 модель пласта с аналогичными вариантами расчета. Вскрытие горизонтальным стволом производилось только в верхнем циклите (рис. 6б). Результаты расчета представлены на рисунке 9. При отсутствии влияния аквифера на диагностическом графике КВД можно выделить несколько характерных участков: рост производной, связанный с работой ГС, поздне-радиальный режим в верхнем циклите, переходный процесс и формирование второго горизонтального участка, указывающего на полный охват дренированием всего продуктивного интервала. Вариация проницаемости перемычки влияет на время формирования первого горизонтального участка, его длительность, а также длительность переходного периода. При проницаемости перемычки в 1 мД выход на второй горизонтальный участок происходит спустя 1 000 часов замера.

В случае активного аквифера по результатам расчета наблюдается падение производной до нуля, длящееся от двух до трех логарифмических периодов в зависимости от проницаемости перемычки. При увеличении проницаемости наблюдается более ранняя реакция на влияние аквифера с более высоким темпом падения производной.

В условиях ограниченного времени замера возможна регистрация только начального участка снижения производной, в связи с чем отклик на подключение второго циклита и на влияния аквифера является практически идентичным. Поэтому получение начального участка со снижением производной не позволит сделать вывод о характере влияния ГVK. Однако в нашем случае активное влияние ГVK возможно исключить результатами анализа КВД в вертикальных скважинах, вскрывших пласт в непосредственной близости от контакта. Тщательный анализ исследований показал, что признаки снижения производной характеризуются длительностью, более характерной для пластовых эффектов, чем для чрезмерного сглаживания кривых. Это позволяет сделать выводы о получении отклика на работу второго циклита по результатам исследований.

Подключение в работу второго циклита через проницаемую перемычку создает угрозу для поднятия ГVK по мере падения пластового давления. Полученная по результатам работы информация позволит избежать преждевременного обводнения скважин за счет корректировки режимов работы скважин и более тщательного мониторинга

уровня ГVK. Таким образом, эффект от выполненной работы заключается в достижении планового КИГ. На рисунке 10 приведено сопоставление профилей добычи газа, рассчитанных на полномасштабной гидродинамической модели для базового варианта и варианта с ограничением работы скважин с целью предупреждения ранней обводненности. Разница по КИГ между расчетами составляет около 5%.

Для приоритетных скважин без признаков подключения в работу второго циклита, результаты исследования на которых влияют на оценку запасов и эффективности системы разработки, была разработана программа по проведению длительных замеров КВД с использованием кварцевых манометров. Такие исследования позволят устранить искажающее влияние зашумления данных и произвести оценку проницаемости перемычки, что позволит внести корректировки в гидродинамической модели для повышения качества ее прогнозов.

#### Итоги

В ходе работы был выполнен расчет КВД на гидродинамической модели для вариантов вертикальной и горизонтальной скважины со значениями проницаемости перемычки: 1 мД, 10 мД и 25 мД. Для оценки влияния ГVK рассмотрены варианты расчета: без влияния аквифера и с активным влиянием аквифера. По результатам расчетов для ВС без влияния аквифера отмечается схожесть поведения производной с аналитической моделью двойной проницаемости. В рассматриваемых

диапазонах проницаемости перемычки прогиб производной является незначительным и может быть скрыт шумами. В случае активного аквифера происходит резкое падение производной, чего не наблюдается по фактическим данным замеров на ВС. Таким образом, более близким к фактическому является отклик без влияния аквифера.

Гидродинамическое моделирование ГС показало схожесть поведения производных на начальном этапе варианта с влиянием аквифера и без него. В условиях ограниченного времени фактического исследования не представляется возможным определение причин снижения производной на конечном участке КВД. Однако активное влияние аквифера исключают результаты анализа КВД в ВС, вскрывших пласт в непосредственной близости от контакта.

### Выводы

- Одной из ключевых проблем интерпретации КВД сеноманских скважин является высокая зашумленность данных давления, не позволяющая однозначно распознавать характер зарегистрированных откликов.
- Вскрытие пласта горизонтальными стволами в условиях неопределенности по характеру и работе разреза оказывает влияние на качество результатов интерпретации.
- Уточнить характер работы разреза в ГС стало возможным путем сравнительного анализа результатов КВД в вертикальных скважинах. Проведение численного гидродинамического моделирования с вариацией свойств продуктивного пласта

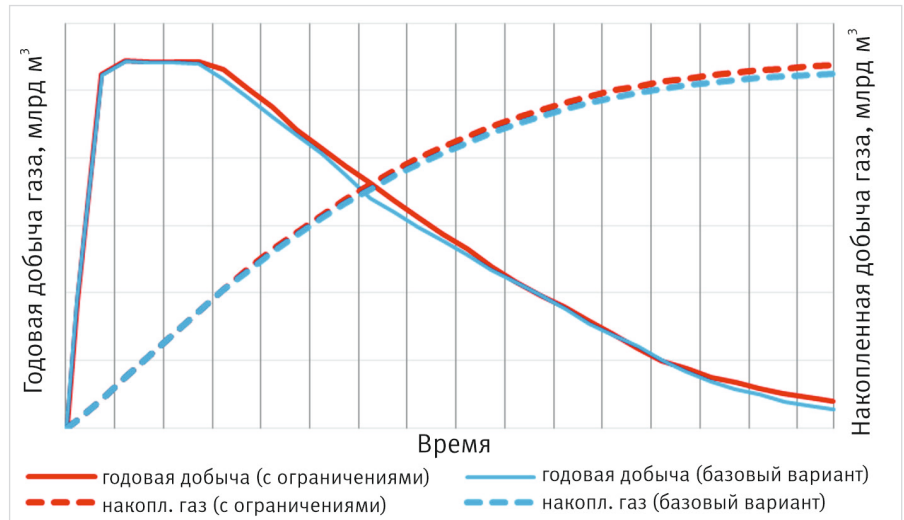


Рис. 10. Сопоставление профилей добычи газа для целевого варианта и варианта с преждевременным выбытием скважин со снижением производной давления  
Fig. 10. Comparison of gas production profiles for the target option and the option with premature retirement of wells with a decrease in pressure derivative

позволило пересмотреть ранее сделанные выводы о характере откликов и охвате дренирования по разрезу в ГС.

- Подтверждение работы второго цикла по результатам ГДИ позволило пересмотреть оптимальную стратегию разработки и внести ограничения в работу скважин с целью предотвращения преждевременного обводнения. Эффект от данных мероприятий оценивается в увеличении конечного КИГ на 5%.

### Литература

1. Medhat M. Kamal. Transient well testing. Richardson: Society of petroleum engineers, 2009, P. 75. (In Eng).
2. Houze Olivier, Viturat Didier, Fjare Ole. S. et al. Dynamic data analysis v5.45.01 Kappa, P. 362. (In Eng).
3. Bourdet D. Well test analysis: The use of advanced interpretation models. Amsterdam: Elsevier, 2002, P. 171. (In Eng).

## ENGLISH

### Results

In the course of the work, the pressure build-up was calculated using a numerical model for vertical and horizontal well options with barrier permeability values: 1 mD, 10 mD and 25 mD. To assess the influence of the gas-water contact, two simulation options were considered: without the influence of the aquifer and with the active influence of the aquifer. Based on the simulation results for a vertical well without the influence of an aquifer, the behavior of the derivative is similar to the analytical model of double permeability. In the considered ranges of barrier permeability, the deflection of the derivative is insignificant and can be hidden by noise. In the case of an active aquifer, a swift drop of the derivative occurs, which is not observed according to actual measurement data on vertical wells. Thus, the response without the influence of the aquifer is closer to the actual one. Simulation of a horizontal well showed similarity in the behavior of derivatives at the initial stage of the option with and without the influence of an aquifer. In case of the limited shut-in time, it is not possible to determine the reasons for the derivative drop in the late time period. However, the active influence of the aquifer is excluded by the results of pressure build-up analysis in vertical wells that penetrated the formation in the immediate vicinity of the contact.

### References

1. Medhat M. Kamal. Transient well testing. Richardson: Society of petroleum engineers, 2009, P. 75. (In Eng).
2. Houze Olivier, Viturat Didier, Fjare Ole. S. et al. Dynamic data analysis v5.45.01 Kappa, P. 362. (In Eng).
3. Bourdet D. Well test analysis: The use

### Conclusions

- One of the key problems in interpreting pressure build-up from Cenomanian reservoir is the high noise level of pressure data, which does not allow one to unambiguously recognize the nature of the recorded responses.
- Exploitation the reservoir by horizontal wells in case of uncertainties of vertical drainage features affects on the quality of the interpretation results.
- It is possible to clarify the features vertical drainage with help of comparative analysis of the results of pressure build-up in vertical wells. Carrying out numerical simulation with variations in the properties of the productive formation allowed to revise previously made conclusions about the nature of the responses and the vertical drainage in the horizontal well.
- Provement of the drainage of the second layer made it possible to revise the optimal development strategy and make the restrictions on the operation of wells in order to prevent premature watering. The effect of these activities is in increase of the final gas recovery factor by 5%.

of advanced interpretation models. Amsterdam: Elsevier, 2002, P. 171. (In Eng).

## ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Аккерман Анель Шалхаровна**, специалист  
ООО «Тюменский нефтяной научный центр», Тюмень, Россия  
Для контактов: [asdautbekova@tnnc.rosneft.ru](mailto:asdautbekova@tnnc.rosneft.ru)

**Akkerman Anel Shalkharovna**, specialist  
“Tyumen petroleum research center” LLC, Tyumen, Russia  
Corresponding author: [asdautbekova@tnnc.rosneft.ru](mailto:asdautbekova@tnnc.rosneft.ru)