

УДК 622.276

**М.Л. Карнаухов**, д.т.н., профессор, e-mail: karnauhov@front.ru; **Е.М. Пьянкова**, к.т.н.;  
**И.А. Синцов**, ivan\_sintsov@mail.ru, Тюменский государственный нефтегазовый университет

## РАЗРАБОТКА РЕШЕНИЯ ДЛЯ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ НЕПРОНИЦАЕМЫХ ГРАНИЦ НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СКВАЖИН

*Пересмотрены современные представления о влиянии границ, основанные на методе суперпозиции. Разработан алгоритм, позволяющий получить решение для учета влияния непроницаемых границ на производительность горизонтальных скважин. Полученный алгоритм апробирован на горизонтальной скважине Крайнего месторождения.*

Большинство запасов углеводородного сырья в России классифицируются как трудноизвлекаемые и характеризуются сложным геологическим строением, ухудшенными фильтрационно-емкостными свойствами. Эффективная разработка таких месторождений не может быть обеспечена строительством только наклонно-направленных скважин с вертикальным окончанием и требует массивного применения методов нефтедобычи, способных обеспечить повышенную производительность, интенсивные темпы отбора и высокую конечную нефтеотдачу при приемлемой рентабельности.

Одним из направлений совершенствования технологии добычи нефти является разработка нефтяных месторождений горизонтальными скважинами. Однако при этом стоит отметить, что для успешного осуществления данных мероприятий необходимо соблюдение ряда условий. В частности, горизонтальное бурение может оказаться относительно низкоэффективным на пластах с высокой неоднородностью, низкой вертикальной проницаемостью или большой мощностью. Таким образом, при бурении горизонтальных скважин первостепенное значение имеют геологические особенности коллектора. К факторам, осложняющим применение данного метода, также можно отнести наличие непроницаемых границ.

На данный момент основным решением, используемым для учета влияния границ, является метод суперпозиции. Вообще, метод суперпозиции был разработан для оценки взаимного влияния друг на друга соседних скважин. В дальнейшем, исходя из предположения, что линии тока между двумя равнодебитными скважинами можно условно разделить перпендикулярной границей, данное решение было применено и для учета непроницаемых границ. В работах В.Н. Щелкачева, например в [3], предложена формула для расчета дебита скважины  $q$  с учетом непроницаемой границы, которая получена на основе некоторых упрощений сложных зависимостей:

$$q = \frac{2\pi kh(P_e - D_n)}{\mu \ln \frac{R_e^2}{2\delta r_n^2}}, \quad (1)$$

где  $k$  – проницаемость,  $m^2$ ;

$h$  – толщина пласта,  $m$ ;

$\mu$  – вязкость нефти,  $Pa \cdot s$ ;

$P_e$  – давление на контуре питания,  $Pa$ ;

$P_n$  – давление на забое скважины,  $Pa$ ;

$R_e$  – расстояние до контура питания,  $m$ ;

$r_c$  – радиус скважины,  $m$ ;

$\delta$  – расстояние до непроницаемой границы,  $m$ .

Для оценки достоверности данного подхода и анализа влияния на дебит непроницаемой границы была построе-

на идеализированная гидродинамическая модель со скважиной в центре пласта и равноудаленным контуром питания в программном комплексе Tempest More. При моделировании были заданы следующие параметры:  $k = 10 \cdot 10^{-15} m^2$ ,  $h = 10 m$ ,  $\mu = 0,9 mPa \cdot s$ ,  $P_e = 30 MPa$ ,  $P_n = 20 MPa$ ,  $R_e = 1500 m$ ,  $r_c = 0,1 m$ . Данный вариант был принят за базовый, в котором был определен дебит скважины  $q$  в пласте, не имеющем геологических осложнений. Также было рассмотрено десять вариантов, в которых была добавлена непроницаемая граница, а расположение скважины  $\delta$  варьировалось от 0,1 до 540 м до нее. Дебиты  $q^*$ , полученные в данных вариантах, были соотнесены с базовым, в результате чего удалось найти процентное отношение эффективности работы скважины с наличием экрана и без него (рис. 1).

Аналогичные расчеты по тем же данным были проведены с использованием формулы (1). Из рисунка 1 видно, что кривые различаются очень значительно, имея удовлетворительную сходимость для данного случая лишь при расположении скважины на расстоянии 50–60 м до границы. Это говорит о том, что применением метода суперпозиции дает довольно высокую погрешность. Исходя из выше сказанного, можно предположить, что в корректировке нуждаются также и другие аналитические решения,

основанные на данном методе. В частности, пересмотра требуют решения, полученные для замкнутых пластов различной геометрии.

В связи с массовым применением горизонтальных скважин в последние годы интерес представляет влияние непроницаемых границ на работу этих скважин. Данная задача пока остается нерешенной. Несложно предположить, что степень влияния будет зависеть от геометрии и длины скважины, а также от расположения ее относительно границы. Как известно, отследить процесс влияния геометрии зоны дренирования возможно при помощи кривых восстановления давления (КВД), измеряемых в скважинах, которые отражают перераспределение давления в пласте. Очевидно, по виду получаемых кривых давления можно будет определить расположение границ и расстояние до них.

С одной стороны, данное решение можно получить в программах для обработки результатов гидродинамических исследований, таких как Ecrin Saphir, PanSystem. Однако стоит заметить, что для учета непроницаемых границ

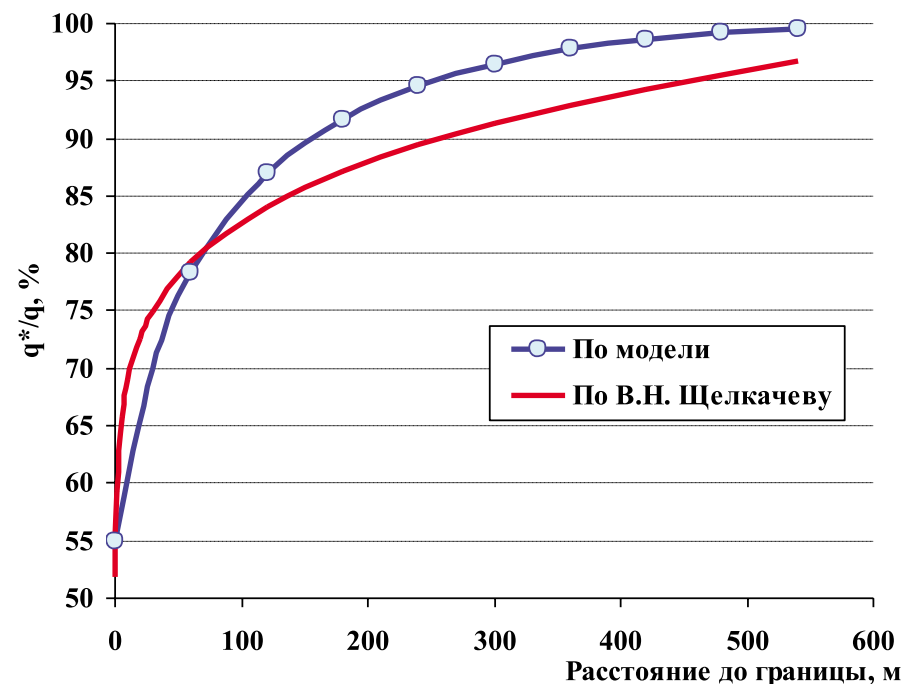


Рис. 1. Соотношение дебитов, полученных при гидродинамическом моделировании и по В.Н. Щелкачеву

в данных продуктах также рекомендуется применение метода суперпозиции, который, как мы отмечали выше, не позволяет получить удовлетворительного решения даже для вертикальных скважин.

С другой стороны, искомое решение можно получить с использованием гидродинамических симуляторов, таких как Tempest More и Eclipse. Они позволяют получить данные изменения давления после пуска или остановки



## УВАЖАЕМЫЕ РАБОТНИКИ И ВЕТЕРАНЫ НЕФТЯНОЙ И ГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ!

Примите самые искренние и теплые поздравления с профессиональным праздником!

Отрасль, в которой вы трудитесь – национальное достояние России. Она обеспечивает надёжную базу для развития экономики страны, является прочной основой социальной стабильности. Каждый из вас вносит свой вклад в большое и важное для страны дело, обеспечивая эффективное развитие нефтегазового комплекса и сохранение позиций России на мировых рынках. Желаем вам ставить перед собой самые амбициозные планы и добиваться их исполнения, побольше счастливых мгновений, которые приносит работа, давая возможность ощутить жизнь во всём её многообразии. Здоровья, успехов, оптимизма!

ГРУППА КОМПАНИЙ



**ЭЛЕКТРОСИТ**

ТМ САМАРА

Президент  
ЗАО "ГК "Электросит" – ТМ Самара"  
А.Е. Половинкин

на правах рекламы

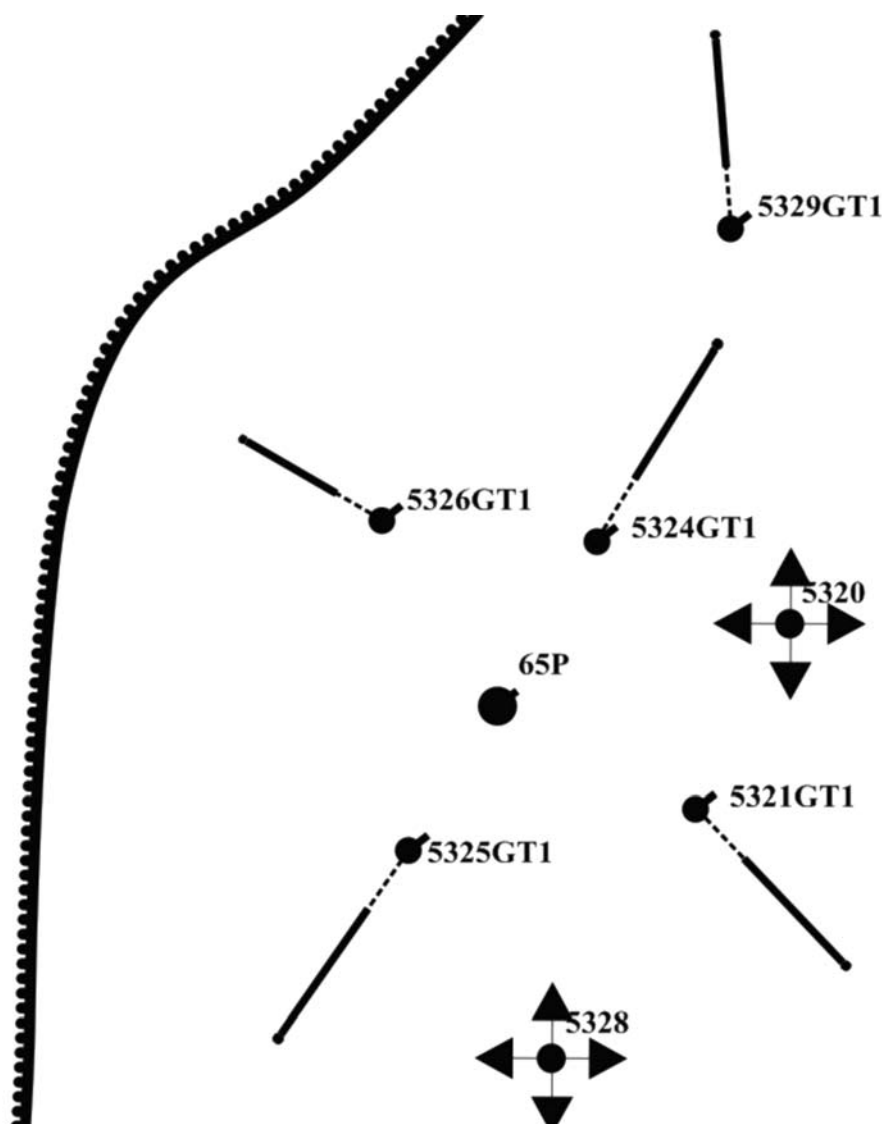


Рис. 2. Схематическое расположение скважины №5326 Крайнего месторождения

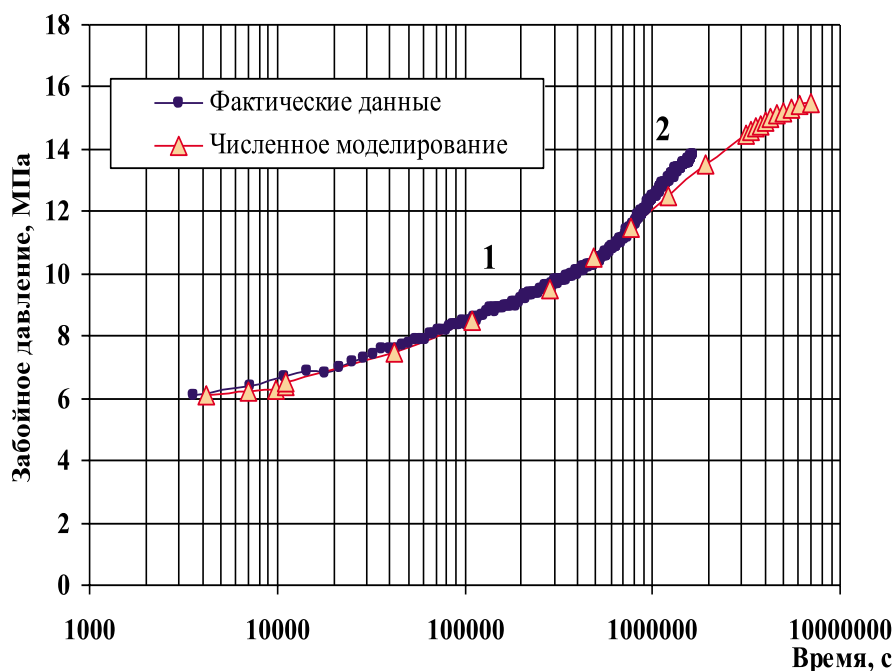


Рис. 3. Сопоставление фактической и смоделированной КВД

скважины. Однако заметим, что кривые давления наиболее информативны в координатах «давление – логарифм времени», то есть, другими словами, важными являются процессы, происходящие через 1, 10, 100, 1000, 10 000 секунд. В гидродинамических симуляторах минимальным шагом по времени являются одни сутки, что не позволяет построить информативную кривую.

Поскольку, как правило, определение свойств пласта ведется на основе исследования скважин с записью и интерпретацией КВД, то обычно этому предшествует этап отработки скважины. Метод Хорнера, наиболее популярный метод гидродинамических исследований, основан на применении принципа суперпозиции, когда функция притока является аналогом функции восстановления давления. Однако такой прием невозможен при попытке получения уравнений для условий пуска и остановки горизонтальной скважины при наличии в пласте непроницаемого барьера, поскольку в данном случае функция притока и восстановления давления не являются подобными.

Поэтому для получения достоверных решений поставленной задачи в данной работе предлагается применение численных методов решения уравнения диффузии, а сама задача сводится к двум этапам:

- 1) определяется распределение давления в пласте при отработке скважины до достижения стационарного состояния;
- 2) полученное распределение принимается во внимание в качестве начального условия, задача построения кривой восстановления давления решается с помощью метода последовательной смены стационарных состояний, описанного в [1].

Данный алгоритм был успешно реализован в программе «КС-метод» («Программа для решения нестационарной задачи фильтрации жидкости к горизонтальной скважине»), которая получила свидетельство о государственной регистрации в октябре 2010 года (свидетельство №2010616780). Первоначально программа разрабатывалась для изучения процессов фильтрации жидкости к горизонтальной скважине без геологических осложнений, однако после изучения проблемы влияния не-

проницаемых границ была доработана. На данный момент в программе реализованы только два случая расположения горизонтальной скважины относительно границы – параллельно и перпендикулярно.

В качестве примера была рассмотрена горизонтальная скважина №5326 Крайнего месторождения (рис. 2), вблизи которой имеется непроницаемая граница.

Длина горизонтального участка данной скважины составляет около 430 м. Примерно на таком же расстоянии от скважины находится непроницаемая граница. В программе «КС-метод» были заданы параметры продуктивного пласта, скважины, а также расстояние до границы. В итоге была построена расчетная кривая восстановления давления, которая в дальнейшем была сопоставлена с фактической КВД (рис. 3). Как видно из сопоставления, фактические и смоделированные точки начального участка КВД практически совпадают. Также можно увидеть, что изгиб, характеризующий начало влияние границы на обеих кривых также происходит одновременно, что подтверждает наличие границы на расстоянии порядка 400 м. Однако изменение фактического угла наклона касательной второго участка по отношению к первому составляет 2,8 раза, в то время как на смоделированной кривой – 2 раза. Соответственно, во столько же раз снижается продуктивность горизонтальной скважины. Разница в изменении углов наклонов объясняется тем, что скважина по отношению к границе не полностью перпендикулярна, а находится под небольшим углом, который еще более снижает продуктивные характеристики. Однако стоит отметить, что при расположении горизонтальной скважины параллельно экрану угол наклона касательной может изменяться более чем в 10 (!) раз.

Таким образом, в данной работе получено решение, позволяющее учитывать влияние границ на производительность горизонтальных скважин. Данное решение может также быть применено для вертикальных скважин и для замкнутых пластов с различной геометрией. На данный момент с высокой степенью достоверности удается оценить влияние границ, расположенных параллельно и перпендикулярно горизонтальной скважине, однако в дальнейшем планируется доработать алгоритм для учета влияния границ более сложной геометрии и расположенных под определенным углом к скважине.

#### Литература:

1. Баренблатт Г.И., Ентов В.М., Рыжик В.М. Движение жидкостей и газов в природных пластах. – М., Недра, 1984, 211 с.
2. Карнаухов М.Л. Гидродинамические исследования скважин испытателями пластов. – М., Недра, 1991, 209 с.
3. Щелкачев В.Н., Лапук Б.Б. Подземная гидравлика. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001, 736 с.
4. Matthews C.S., Russell D.G. Pressure Buildup and Flow Tests in Well. Henry L. New York, Dallas, Doherty Memorial Fund of AIME, 1967, 163 с.

**Ключевые слова:** непроницаемая граница, горизонтальная скважина, метод суперпозиции.



МБР-160

С ДНЁМ  
НЕФТЯНИКА!