

СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ ГЛУБИННОСТИ ИССЛЕДОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЛАСТОИСПЫТАТЕЛЯ И ВЕРТИКАЛЬНОГО ГИДРОПРОСЛУШИВАНИЯ

Т.Н. Цаган-Манджиев
ИПНГ РАН, E-mail: ts-mandzhiev@mail.ru

Гидродинамические исследования скважин являются одним из главных инструментов для определения вертикальной проницаемости пласта и оценки его фильтрационно-емкостных параметров. На данный момент существует небольшое количество методов для оценки вертикальной проницаемости. К примеру, в работе [1] представлен обзор гидродинамических методов. Однако указанные исследования касаются практически только случая однородного анизотропного пласта. Отдельные работы связаны с предельными вариантами слоистой неоднородности или с интерпретацией данных исследований слоисто-неоднородных отложений с использованием пластоиспытателей. На практике именно такие исследования являются наиболее распространенными для оценки вертикальной проницаемости.

В настоящей статье особое внимание уделено работе [2], поскольку в ней используется процедура идентификации отдельно вертикальной и горизонтальной проницаемостей на основе данных исследования вертикальных скважин с использованием пластоиспытателя и регистрацией изменения давления в двух точках, вертикально отдаленных друг от друга.

На наш взгляд, перспективной методикой оценки вертикальной проницаемости является технология вертикального гидропрослушивания.

Математическая модель

Вертикальное гидропрослушивание подразумевает создание возмущения за счёт отбора или закачки флюида в активном интервале и регистрацию изменения давления как в активном, так и в реагирующем интервалах. Оба интервала размещаются в пределах одной, обсаженной или необсаженной, скважины, но с разнесением по разрезу пласта (один – у кровли пласта с сообщением по затрубью, другой, связанный с насосно-компрессорными трубами (НКТ), – у подошвы). Интервалы изолируются с помощью одного или двух пакеров. В данной статье, для определенности, рассматривается случай возбуждения путем отбора нефти из пласта. При этом активный интервал располагается у подошвы, реагирующий – у кровли пласта.

Для описанной процедуры исследования прямая задача состоит в моделировании однофазной фильтрации с учетом гравитации в радиальной 2D постановке. Уравнение фильтрации, в предположении упругого режима, в r - z координатах записывается следующим образом [3]:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k_r r \frac{\partial p}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_b \frac{\partial p}{\partial z} \right) = \mu \beta^* \frac{\partial p}{\partial t} - 2g\rho_0 \beta_{жс} k_b \frac{\partial p}{\partial z}. \quad (1)$$

Здесь k_r и k_b – коэффициенты эффективной проницаемости (проницаемости для нефти при остаточной водонасыщенности) в горизонтальном и вертикальном направлениях, μ – коэффициент вязкости флюида (нефти), $\beta^* = \beta_c + m_0 \beta_{жс}$ – коэффициент упругоэластичности пласта, m_0 – коэффициент эффективной пористости пласта при начальном давлении, $\beta_{жс}$ и β_c – коэффициенты сжимаемости (упругости) жидкости (нефти) и эффективной пористой среды (с учетом остаточной водонасыщенности) соответственно [2], ρ_0 – плотность нефти при начальном давлении.

Граничные условия к уравнению (1) соответствуют отсутствию потока флюида через верхнюю и нижнюю границы пласта и через условную круговую внешнюю границу, а также заданному дебиту (расходу) на активном интервале скважины. Начальное условие предполагает заданное (например, невозмущенное гидростатическое) распределение давления в пределах моделируемого участка на начало исследования. Прямая задача решается численно на основе метода конечных разностей. Шаг расчетной сетки вдоль горизонтальной оси логарифмически увеличивается для более точного воспроизведения пространственного распределения давления.

Общая постановка прямой задачи позволяет, в том числе, обрабатывать результаты исследований по методике статьи [2]. Поэтому представляют интерес независимая обработка данных статьи [2] с использованием нашего алгоритма и сравнение результатов с результатами, полученными в статье [2].

Отметим, что принципиальное отличие работы [2] от рассматриваемой нами схемы исследования состоит в технологической процедуре проведения исследования и величине вертикального разнесения активного и реагирующего интервалов. Вертикальное гидропрослушивание подразумевает проведение возмущающего воздействия и регистрацию отклика возмущения с помощью двух интервалов вскрытия пласта в

вертикальной скважине, разнесенных по толщине пласта и изолированных с помощью одного или двух пакеров; в то время как в статье [2] используется пластоиспытатель, т.е. разнесение по вертикали имеет ограниченную величину (1–1,5 м) (рис. 1). Оценим далее глубинность такого исследования, т.е. его чувствительность к величине вертикальной и горизонтальной проницаемостей зон пласта на различном удалении от стенки скважины.

Для первого примера возьмем исходные данные, указанные в табл. 1 [2]; из неё же в дальнейших расчетах будут использоваться параметры пласта, флюида и пластоиспытателя. Прежде всего, необходимо добиться идентичности результатов решения прямой задачи с результатами авторов статьи. В исходных данных указано на наличие скин-зоны с величиной скин-фактора, равной 1. При этом не сказано, как учитывается влияние скин-зоны при решении прямой и обратной задач. Поэтому нами задание скин-зоны рассматривалось в двух конфигурациях. В первом случае цилиндрическая область с измененной проницаемостью расположена только вблизи пластоиспытателя (ограничена по высоте), во втором – распространяется на всю толщину пласта.

Таблица 1

Исходные данные синтетического теста №1

Толщина пласта h , м	21,5	Эффективная пористость пласта при нач.давл., доли ед.	0,2
Радиус скважины, м	0,1	Вязкость нефти, сПз	1
Гориз.проницаемость k_r , мД	20	Общая сжимаемость, Па ⁻¹	$1,45 \cdot 10^{-9}$
Верт. проницаемость k_v , мД	5	Скин-фактор, доли ед.	1
Дебит, м ³ /сут	1,6	Нач. пласт.давление, атм	344,5

В обоих случаях установлено (рис. 2), что при задании проницаемости скин-зоны из расчета эквивалентного значения скин-фактора, равного 1, рассчитанные падения давления для активного интервала несколько превышают приведенные в статье [2] (5,8 и 5,6 бар вместо 5,4 бар на конец отбора), а для реагирующего интервала – несколько занижены (0,24 бар вместо 0,26 бар на конец отбора). Видимо, это связано с различным способом учета скин-эффекта в методике авторов [2] и в нашем алгоритме. Тем не менее, вследствие не столь существенных различий в динамиках давлений для двух вариантов, дальнейшие расчеты проводились при задании скин-зоны размером 0,14 м на всю

толщину пласта. Тогда при значении скин-фактора, равном 1, проницаемости скин-зоны и пласта соответственно задавались равными 9,36 и 20 мД в горизонтальном направлении и 2,34 и 5 мД – в вертикальном.

Оценим глубинность исследования с использованием пластоиспытателя, т.е. его чувствительность к величине вертикальной и горизонтальной проницаемостей зон на различном удалении от стенки скважины. Выделим помимо скин-зоны две вертикальные области с различающимися проницаемостями. Размер первой зоны будет варьироваться. К другой зоне отнесём оставшуюся часть пласта. С учетом логарифмического разгона шага сетки вдоль горизонтальной оси, при условном радиусе контура 500 м и 15 ячейках вдоль оси R, ширина ближней зоны изменяется в дальнейших исследованиях от 0,2 м (одна ячейка) до 8 м (6 ячеек).

Далее для оценки глубинности исследования выполнялось решение прямой задачи при одном из зафиксированных значений протяженности ближней зоны. При этом повариантно изменялось отношение вертикальных проницаемостей ближней и дальней зон, при одинаковых значениях горизонтальной проницаемости. Так, в качестве базового расчета был выбран случай с одинаковыми вертикальными проницаемостями ближней ($k_{в1}$) и дальней ($k_{в2}$) зон. В двух других вариантах вдвое увеличивалась проницаемость либо только ближней, либо только дальней зоны.

На рис. 3–4 показаны изменения давления на активном и реагирующем интервалах при размере ближней зоны пласта 0,24 м. Горизонтальные проницаемости зон равны $k_{г1} = k_{г2} = 20$ мД. Скин-зона имеет размер 0,14 м, проницаемости скин-зоны равны $k_{гс} = 9,3$ мД, $k_{вс} = 2,33$ мД. Вертикальные проницаемости ближней и дальней зон в трех случаях соответственно заданы соотношениями: $k_{в1} = k_{в2} = 5$ мД (базовый вариант), $k_{в1} = 2k_{в2} = 10$ мД и $2k_{в1} = k_{в2} = 10$ мД.

Рис. 5–6 соответствуют дальнейшему увеличению размера ближней зоны до 8 м.

Из рис. 3–6 видно, что при увеличении протяженности ближней зоны влияние вертикальной проницаемости дальней зоны пласта на падение давления на активном интервале заметно уменьшается. Также видим, что и на реагирующем, и на активном интервале при протяженности ближней зоны около 8 м влияние $k_{в}$ дальней части пласта на изменение давления становится практически неразличимым.

Для исключения влияния численных эффектов на полученные оценки глубинности исследования также проведены расчеты при более мелкой сетке по оси R. Вдоль

горизонтальной оси число ячеек принято равным 25 вместо 15. При этом, как следует из рис. 7–8, подтвердился размер зоны чувствительности исследования к вертикальной проницаемости около 8 м.

Так, на рис. 7 и 8, наряду с базовым вариантом единой величины вертикальной проницаемости ближней и дальней зон, изображены случаи, когда протяженность ближней зоны составляет 2,5 и 8 м соответственно. При этом проницаемость дальней зоны больше в два раза проницаемости ближней зоны. Из рис. 8 видно, что при размере ближней зоны меньше 8 м на реагирующем интервале ещё видны отличия от кривой падения давления для базового варианта, а при 8 м кривые полностью совпадают.

Таким образом, исследование с использованием пластоиспытателя при указанных, достаточно типичных, параметрах проведения исследования и рассматриваемых геометрических и фильтрационно-емкостных параметрах пласта позволяет “прослушать” лишь 8 м вблизи скважины по параметру вертикальной проницаемости. Следовательно, получаемую оценку вертикальной проницаемости следует относить к этой 8-метровой зоне. Данное значение размера области влияния (8 м) получено для конкретной постановки задачи и конкретных значений фильтрационно-емкостных параметров, но по порядку величины характеризует в целом глубинность исследования с применением пластоиспытателя.

Отметим также, что данное исследование проводится в открытом стволе, когда скважина еще не освоена. Это означает, что в пласте имеется зона проникновения фильтрата бурового раствора (ФБР) с существенно измененным насыщением пласта и его фильтрационными свойствами. Глубина зоны проникновения от стенки скважины может достигать нескольких метров и, следовательно, существенно сказываться на результатах оценки вертикальной проницаемости при глубинности исследования в пределах 10 м.

Аналогичным образом оценена и глубинность исследования по горизонтальной проницаемости ближней и дальней от пластоиспытателя зон.

Для этого в пласте выделены три зоны – скин-зона размером 0,14 м, ближняя к пластоиспытателю зона изменяемого размера и оставшаяся часть пласта. Выбрана сетка с достаточным дроблением шага вдоль горизонтальной оси, чтобы было удобно варьировать протяженность ближней к испытателю зоны. Число ячеек вдоль горизонтальной оси было выбрано равным 25. С учетом глубинности по вертикальной проницаемости ширина ближней зоны изменялась от 7,5 м (10 ячеек) до 15 м (12 ячеек).

Горизонтальные проницаемости задавались равными по вариантам: 1) $k_{r1}=k_{r2}=20$ мД 2) $k_{r1}=2k_{r2}=40$ мД 3) $k_{r2}=2k_{r1}=40$ мД. Вертикальные проницаемости зон для всех трех случаев были равны $k_{в1}=k_{в2}=5$ мД, проницаемости скин-зоны $k_{r3}=9,3$ мД, $k_{в3}=2,33$ мД.

На рис. 9–10 представлены результаты расчетов для протяженности ближней зоны в 7,5 м, на рис. 13–14 – в 15 м.

Из рис. 11 и 12 видно, что область влияния горизонтальной проницаемости для реагирующего интервала не превышает 15 м, так как изменение горизонтальной проницаемости дальней зоны не привело к изменению кривой падения давления. Для активного интервала уже при размере дальней зоны в 7,5 м от скважины исчезают различия между кривыми (рис. 9).

Таким образом, пластоиспытатель в данном случае позволяет прослушать 15 м от ствола скважины по параметру горизонтальной проницаемости и 8 м по параметру вертикальной проницаемости.

Для оценки интегральной чувствительности рассматриваемого исследования дополнительные расчеты выполнены при изменении как вертикальной, так и горизонтальной проницаемостей пласта за пределами 15 м (рис. 13–14).

Проницаемости зон задавались равными 1) $k_{r1}=k_{r2}=20$ мД, $k_{в1}=k_{в2}=5$ мД 2) $k_{r1}=20$ мД, $k_{в1}=5$ мД, $k_{r2}=1$ мД, $k_{в2}=1$ мД. Проницаемость скин-зоны в обоих случаях равна $k_{r3}=9,3$ мД, $k_{в3}=2,3$ мД.

Из рис. 13–14 видно, что влияние изменения проницаемости дальней зоны на динамики давления на активном и реагирующем интервалах практически отсутствует. Отличия для реагирующего интервала имеют порядок сотых долей атмосферы и проявляются только за счет большого изменения параметров дальней зоны в примере. Если рассматривать переход от ближней к дальней зоне как вертикальную слабопроницаемую границу (поскольку проницаемость дальней зоны в данном примере значительно ниже, чем проницаемость ближней зоны), то можно оценить время достижения возбуждением от пластоиспытателя условной границы. С использованием оценочной формулы [2] время распространения регистрируемого сигнала на удаление 15 м от пластоиспытателя в пласте с приведенными параметрами составляет около 5000 с, что примерно совпадает (рис. 14) с моментом времени на графике, когда кривые начинают различаться.

Таким образом, подтверждаются оценки протяженности зоны чувствительности исследования с использованием пластоиспытателя.

Влияние зоны проникновения фильтрата бурового раствора на результаты исследований с использованием пластоиспытателя

Как отмечено выше, проведение рассматриваемого типа исследования предполагает спуск пластоиспытателя на кабеле в открытом стволе скважины, то есть до ее освоения. Это означает, что в пласте ещё присутствует не только глинистая “корка” и зона кольматации и связанный с ними скин-эффект, но и гораздо более протяженная зона проникновения ФБР с существенно измененным насыщением флюидами и, соответственно, фильтрационными свойствами. Выше отмечалось, что вследствие ограниченной глубинности исследования с использованием пластоиспытателя зона проникновения может оказывать существенное влияние на получаемые с его помощью оценки вертикальной и латеральной проницаемостей пласта. Целесообразно количественно оценить данное влияние.

Как показано, например, в работе [4], в процессе бурения ФБР проникает в пласт и перераспределяется в области размером до 1,5–2 м и более. Оценим, сколько флюида необходимо отобрать в процессе исследования (без освоения скважины), чтобы отобрать из пласта ФБР и приблизиться к начальному насыщению коллектора. Если глубина зоны проникновения равна приблизительно 2 м, то для “прочистки” от фильтрата основной зоны исследования необходимо отобрать никак не менее, чем объем флюида из цилиндра радиусом 2 м и высотой около 4 м (1 м – активный интервал пластоиспытателя, плюс симметрично – два расстояния вверх и вниз до реагирующего интервала, в нашем случае по 1,5 м). Получим, что $V_{\text{цил}} = \pi R^2 H \approx 3,14 \cdot 2^2 \cdot 4 = 50,24 \text{ м}^3$. Принимая в среднем значение динамической пористости за 0,1, получим, что надо отобрать не менее 5 м^3 флюида, чтобы очистить от ФБР хотя бы основную зону, влияющую на измерения в процессе исследования. В эксперименте же, например, статьи [2] пластоиспытателем осуществляется отбор с дебитом 10 баррелей/сут в течение 1 часа, т.е. отобранный объем равен $V_{\text{отобр}} \approx 0,08 \text{ м}^3$, что значительно меньше требуемого. Отсюда можно сделать вывод, что в процессе исследования с использованием пластоиспытателя зона проникновения фильтрата в существенной степени сохраняется и оказывает влияние на наблюдаемые динамики давления.

Оценим далее, насколько сильное влияние на динамику изменения давления при исследовании оказывают вертикальная и горизонтальная (фазовые) проницаемости в пределах зоны проникновения ФБР. Это влияние необходимо сравнить с влиянием характеризующих пласт величин вертикальной и горизонтальной эффективных проницаемостей за пределами зоны проникновения, но в пределах области чувствительности исследования.

Проведем сначала оценку влияния вертикальной проницаемости (область чувствительности исследования при этом составляет 8 м). Выделим в пласте четыре радиальные области: скин-зону (0,14 м непосредственно возле скважины), зону проникновения ФБР (до 2 м от пластоиспытателя), область чувствительности исследования (до 8 м от пластоиспытателя) и оставшуюся часть пласта. Соответственно обозначим их: s – область скин-зоны, 1 – зона проникновения ФБР, 2 – зона чувствительности исследования, 3 – дальняя часть пласта.

Для базового случая зададим горизонтальные проницаемости этих зон равными $k_{гs}=9,3$ мД, $k_{г1}=13,5$ мД, $k_{г2}=20$ мД, $k_{г3}=20$ мД; вертикальные – $k_{вs}=2,3$ мД, $k_{в1}=3$ мД, $k_{в2}=5$ мД и $k_{в3}=5$ мД. Здесь принято во внимание, что фазовая проницаемость для фильтра в зоне проникновения должна быть ниже, чем эффективная проницаемость (по нефти) пласта. Далее при фиксированных значениях горизонтальной проницаемости проварьируем вертикальную проницаемость области проникновения $k_{в1}$ и области чувствительности теста $k_{в2}$ в нескольких вариантах: 1), 2) изменим только $k_{в1}$ (уменьшим и увеличим) и 3) одновременно изменим, например увеличим, оба $k_{в1}$ и $k_{в2}$. Результаты расчетов показаны на рис. 15–16.

Из рис. 15 и 16 следует, что изменение вертикальной проницаемости $k_{в1}$ области проникновения бурового фильтра ФБР значительно влияет на падение давления как на активном, так и на реагирующем интервале. При этом изменение проницаемости $k_{в2}$ почти незаметно (рис. 16) для динамики изменения давления на активном интервале, и оно слабо влияет на динамику падения давления на реагирующем интервале.

Для горизонтальной проницаемости областью чувствительности исследования, как определено ранее, является зона протяженностью 15 м. Выделим в пласте 4 вертикальные зоны – скин-зону (0,14 м непосредственно возле скважины), зону проникновения ФБР (до 2 м от пластоиспытателя), область чувствительности исследования (до 15 м от пластоиспытателя) и оставшуюся часть пласта. Соответственно обозначим их: s – область

скин-зоны, 1 – зона проникновения ФБР, 2 – зона чувствительности исследования, 3 – дальняя часть пласта. Для базового случая зададим горизонтальные проницаемости этих зон равными $k_{г3}=9,3$ мД, $k_{г1}=13,5$ мД, $k_{г2}=20$ мД, $k_{г3}=20$ мД; вертикальные – $k_{в3}=2,3$ мД, $k_{в1}=3$ мД, $k_{в2}=5$ мД и $k_{в3}=5$ мД. Далее при фиксированных значениях вертикальной проницаемости проварьируем горизонтальную проницаемость области проникновения бурового фильтрата $k_{г1}$ и области чувствительности теста $k_{г2}$ в нескольких вариантах: 1), 2) изменим только $k_{г1}$ (уменьшим и увеличим), 3) одновременно изменим $k_{г1}$ и $k_{г2}$. Результаты расчетов для описанных вариантов показаны на рис. 17–18.

Как видно из рис. 17 и 18, получаем аналогичный результат и для горизонтальной проницаемости: область проникновения ФБР гораздо сильнее влияет на результаты исследования, чем не затронутая проникновением область пласта.

Таким образом, при проведении исследования в открытом стволе скважины параметры зоны проникновения ФБР значительно влияют на получаемые результаты. В существующих методиках интерпретации таких исследований зона проникновения отдельно не учитывается. Следовательно, оценки проницаемости соответствуют неким осредненным характеристикам зоны проникновения и не затронутого проникновением пласта. Причем в рассмотренном типичном случае вклад последнего в определяемые величины незначителен. Иными словами, исследование с использованием пластоиспытателя в открытом стволе и существующие методики его интерпретации неинформативны в отношении характеристик пласта за пределами зоны проникновения.

Следует также отметить, что пластовая система в зоне проникновения отличается не только фильтрационными свойствами, но и свойствами флюида, что также не учитывается в существующих моделях интерпретации.

Для повышения достоверности оценки вертикальной и горизонтальной проницаемостей пласта целесообразны следующие решения.

1) Реализация больших объемов отборов на источнике возбуждения пласта или же проведение более длительного исследования. Иначе, как было показано, прослушивается лишь ограниченная область, преимущественно зона проникновения, и оценки проницаемостей не характеризуют параметры пласта.

2) При моделировании и интерпретации исследования необходимо уделять внимание скин-зоне, поскольку в реальных условиях при бурении скважины образуется

невымываемая глинистая “корка”, как правило, с сильно ухудшенными фильтрационными свойствами. А также формируется зона кольматации.

3) В случае неосвоенной скважины требуется отдельно учитывать зону проникновения ФБР, поскольку она оказывает заметное влияние на динамики давления и результаты интерпретации. Но учет зоны проникновения осложняется необходимостью оценки ее протяженности и параметров.

4) При планировании исследования и интерпретации полученных результатов целесообразно проводить оценку области влияния для контроля размеров характеризующейся исследованием зоны пласта.

5) Указанные выше рекомендации невозможно реализовать на основе пластоиспытателя и существующих методик интерпретации. Перспективной в этом отношении, по нашему мнению, является процедура вертикального гидропрослушивания [5]. Она характеризуется не только большим охватом пласта исследованием по толщине и глубине, но и предполагает исследование скважины после полного освоения, т.е. после отбора из пласта подвижного ФБР.

Разработанная численная процедура решения прямой и обратной задач вертикального гидропрослушивания позволяет учитывать различие свойств зон пласта по мере удаления от ствола скважины и осуществлять оценку зоны чувствительности исследования.

Промысловый пример

Рассмотренные выше расчеты и выводы получены на основе варьирования исходных данных из синтетического примера работы [2]. Аналогичный анализ проведен также на основе данных промыслового примера Field Example 1 [2]. Основные параметры пласта приведены в табл. 2 из статьи [2], режимы работы и дебиты скважины (пластоиспытателя) отражены на рис. 19 (также из [2]). В данном примере используется такой же по размерам пластоиспытатель, как и в синтетическом тесте №1 (см. рис. 1). Точка прослушивания (реагирующая) находится практически на таком же расстоянии от активного источника испытателя (около 2 м). В этой связи можно предположить, что результаты проверки на пространственную чувствительность исследования дадут аналогичные результаты.

Для получения достоверных выводов необходимо сначала обеспечить совпадение решения прямой задачи по нашему алгоритму с результатами решения авторов статьи. В исходных данных статьи [2] не указано о наличии/отсутствии скин-зоны, но при бурении

скважин практически всегда образуется зона с измененными фильтрационными параметрами, поэтому пласт моделировался нами как пласт со скин-зоной с ухудшенными фильтрационными свойствами. Задавалась скин-зона размером 0,14 м с проницаемостью, заниженной в 2,1 раза по сравнению с основной частью пласта. Расстояние до условного контура пласта составляет 500 м. Таким образом, пласт разделен на 2 части – скин-зону с проницаемостями $k_{гс}=0,4$ мД, $k_{вс}=0,27$ мД и основную часть пласта с проницаемостями $k_{г}=0,84$ мД, $k_{в}=0,58$ мД в горизонтальном и вертикальном направлениях соответственно.

Таблица 2

Исходные данные промыслового примера

Толщина пласта h , м	35	Эффективная пористость пласта при нач. давл., доли ед.	0,2
Радиус скважины, м	0,1	Вязкость нефти, сПз	0,5
Сжимаемость флюида, Па ⁻¹	$8,7 \cdot 10^{-11}$	Начальное пласт. давление, атм	140

Задание скин-зоны приводит к отличию в результатах решения прямой задачи от результатов работы [2]. Но если задать пласт без скин-зоны, то получается схожая динамика падения давления (максимум 37 бар на активном интервале вместо 30 бар и 3,5 бар вместо 3 бар на реагирующем интервале). Это указывает, по-видимому, на отсутствие учета скин-эффекта авторами [2].

По аналогии с синтетическим примером, теперь разобьем пласт на скин-зону, ближнюю и дальнюю зоны и рассмотрим влияние вертикальной проницаемости ближней и дальней от пластоиспытателя зон на результаты решения прямой задачи. Размер дальней зоны будет варьироваться в пределах 8 м. Для этого будем варьировать значения вертикальных проницаемостей $k_{в1}$, $k_{в2}$ ближней и дальней зон при одинаковых значениях горизонтальных проницаемостей $k_{г1}$, $k_{г2}$.

На рис. 20–21 показаны динамики изменения давления на активном и реагирующем интервалах при размере ближней зоны пласта 5,5 м, на рис. 22–23 – 7,7 м. В обоих случаях протяженностей зон горизонтальные проницаемости равны $k_{г1}=k_{г2}=0,84$ мД. Скин-зона имеет размер 0,14 м, её проницаемости равны $k_{гс}=0,4$ мД, $k_{вс}=0,27$ мД. Вертикальные проницаемости ближней и дальней зон в трех случаях задавались: 1) $k_{в1}=k_{в2}=0,58$ мД (базовый вариант), 2) $k_{в1}=1$ мД, $k_{в2}=0,58$ мД и 3) $k_{в1}=0,58$ мД, $k_{в2}=1$ мД.

Как видно из рисунков 20–23, варьирование вертикальной проницаемости дальней зоны не приводит к изменению графика падения давления. Следовательно, размер зоны

чувствительности промыслового исследования к параметру вертикальной проницаемости также составляет около 8 м.

Аналогично оценим глубину исследования по параметру горизонтальной проницаемости. Выделим для этого в пласте три зоны – скин-зону размером 0,14 м, ближнюю к пластоиспытателю зону и оставшуюся часть пласта. Проницаемости скин-зоны равны $k_{гс}=0,4$ мД, $k_{вс}=0,27$ мД. Вертикальные проницаемости зон равны $k_{в1}=k_{в2}=0,58$ мД, горизонтальные проницаемости задавались равными: 1) $k_{г1}=k_{г2}=0,84$ мД (базовый вариант), 2) $k_{г1}=2$ мД, $k_{г2}=0,84$ мД и 3) $k_{г1}=0,84$ мД, $k_{г2}=2$ мД.

На рис. 24–25 представлены результаты расчетов при протяженности ближней зоны 10 м, на рис. 26–27 – 15 м.

Видно, что при размерах ближней зоны порядка 15 м влияние горизонтальной проницаемости дальней зоны на результаты решения прямой задачи становится пренебрежимо малым. На реагирующем интервале не достигнуто полное совпадение графиков изменения давления, т.е. чувствительность по горизонтальной проницаемости несколько превышает 15 м.

Таким образом, получили, что и для промыслового примера область чувствительности исследования по параметру вертикальной проницаемости составляет 8 м, горизонтальной – несколько более 15 м.

Проверим далее, по аналогии с синтетическим примером, будет ли областью чувствительности интегрального параметра проницаемости зона в 15 м вблизи пластоиспытателя. Для этого проведем расчет при изменении одновременно горизонтальной и вертикальной проницаемостей пласта за пределами 15 м от пластоиспытателя (рис. 28–29). Проницаемости зон принимались равными 1) $k_{г1}=k_{г2}=0,84$ мД, $k_{в1}=k_{в2}=0,58$ мД, 2) $k_{г1}=0,84$ мД, $k_{г2}=2$ мД, $k_{в1}=0,58$ мД, $k_{в2}=1$ мД. Скин-зона в обоих случаях имеет проницаемость $k_{гс}=0,4$ мД, $k_{вс}=0,27$ мД.

Видно, что варьирование проницаемости дальней зоны практически не влияет на динамику изменения давления. При этом на реагирующем интервале заметны небольшие различия в кривых, которые отражают некоторое превышение 15 м размером зоны чувствительности по горизонтальной проницаемости.

Таким образом, пространственные оценки глубины исследования практически полностью подтвердились и для промыслового примера. То есть они определяются не столько свойствами пласта, сколько взаимным положением элементов пластоиспытателя

(его размерами). В частности, все выводы, сделанные для синтетического примера в отношении существенного влияния зоны ФБР, остаются верными и для промысловых исследований с использованием пластоиспытателя.

Глубинность исследования вертикального гидропрослушивания

В заключение приведем результаты оценки глубинности исследования вертикального гидропрослушивания. По аналогии с примерами для исследований с помощью пластоиспытателей были получены оценки чувствительности исследования вертикального гидропрослушивания к параметрам вертикальной и горизонтальной проницаемостей.

Разобьем пласт на скин-зону, ближнюю и дальнюю зоны и рассмотрим влияние вертикальной проницаемости ближней и дальней от скважины зон на результаты решения прямой задачи. Размер дальней зоны будет варьироваться в пределах 31 м. Для этого будем варьировать значения вертикальных проницаемостей $k_{в1}$, $k_{в2}$ ближней и дальней зоны при одинаковых значениях горизонтальных проницаемостей $k_{г1}$, $k_{г2}$.

На рис. 30–31 показаны изменения давления на активном и реагирующем интервалах при размере ближней зоны пласта в 2,5 м, на рис. 32–33 – в 31 м. Исходные данные взяты из табл. 2. В обоих случаях протяженностей зон горизонтальные проницаемости равны $k_{г1}=k_{г2}=5$ мД. Скин-зона имеет размер 0,14 м, её проницаемости равны $k_{гс}=2$ мД, $k_{вс}=1$ мД. Вертикальные проницаемости ближней и дальней зон в трех случаях задавались: 1) $k_{в1}=k_{в2}=3$ мД (базовый вариант), 2) $k_{в1}=10$ мД, $k_{в2}=3$ мД и 3) $k_{в1}=3$ мД, $k_{в2}=10$ мД.

Из рис. 32–33 видно, что при протяженности ближней зоны 31 м изменение вертикальной проницаемости дальней зоны перестает влиять на изменения давления на активном и реагирующем интервалах. Следовательно, вертикальное гидропрослушивание при указанных параметрах проведения исследования и рассматриваемых геометрических и фильтрационно-емкостных параметрах пласта позволяет “прослушать” 31 м вблизи ствола скважины.

Аналогично оценим глубинность исследования по параметру горизонтальной проницаемости. Выделим для этого в пласте три зоны – скин-зону размером 0,14 м, ближнюю к пластоиспытателю зону и оставшуюся часть пласта. Проницаемости скин-зоны равны $k_{гс}=2$ мД, $k_{вс}=1$ мД. Вертикальные проницаемости зон равны $k_{в1}=k_{в2}=3$ мД,

горизонтальные проницаемости задавались равными: 1) $k_{r1} = k_{r2} = 5$ мД (базовый вариант), 2) $k_{r1} = 2k_{r2} = 10$ мД и 3) $k_{r2} = 2k_{r1} = 10$ мД.

На рис. 34–35 представлены результаты расчетов при протяженности ближней зоны 31 м, на рис. 36–37 – 250 м.

Откуда можем сделать вывод о том, что вертикальное гидропрослушивание позволяет "прослушать" 250 м вблизи скважины по параметру горизонтальной проницаемости.

Аналогичным образом было установлено, что интегральная чувствительность рассматриваемого исследования составляет 250 м.

Таким образом, видим, что вертикальное гидропрослушивание позволяет охватить гораздо более протяженные зоны пласта для оценки его фильтрационных свойств. Поскольку исследования вертикальной проницаемости производятся в уже освоенных пластах, зона проникновения фильтрата бурового раствора уже не оказывает значительного влияния на результаты гидропрослушивания. Кроме того, вертикальное гидропрослушивание не ограничено по объемам отбора флюида и временным рамкам проведения исследования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Kamal M.M.* (editor). Transient well testing. – SPE Monograph; Vol. 23, Henry L. Doherty Series, Society of Petroleum Engineers, Richardson, Texas, USA, 2009. 849 p.
2. *Onur M., Hegeman P.S., Gok I.M., Kuchuk F.J.* A novel analysis procedure for estimating thickness-independent horizontal and vertical permeabilities from pressure data at an observation probe acquired by packer-probe wireline formation testers. // International Petroleum Technology Conference. Doha, Qatar, 7–9 December 2009.
3. *Лейбензон Л.С.* Движение природных жидкостей и газов в пористой среде. М.: ОГИЗ, 1947. 244 с.
4. *Tobola D.P., Holdich S.A.* Determination of reservoir permeability from repeated induction logging // SPEFE. March 1991. N 20.
5. *Закиров С.Н., Индрупский И.М., Закиров Э.С., Закиров И.С.* и др. Новые принципы и технологии разработки месторождений нефти и газа. Ч. 2. М.-Ижевск: Ин-т компьют. исслед., 2009. 484 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ

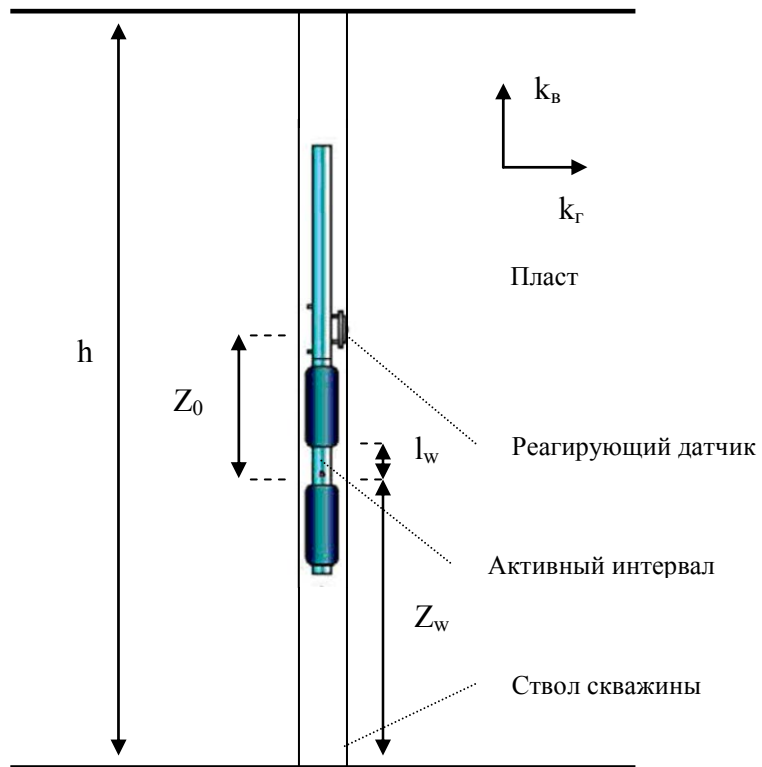


Рис. 1. Конфигурация пластоиспытателя (обозначения согласно [2])

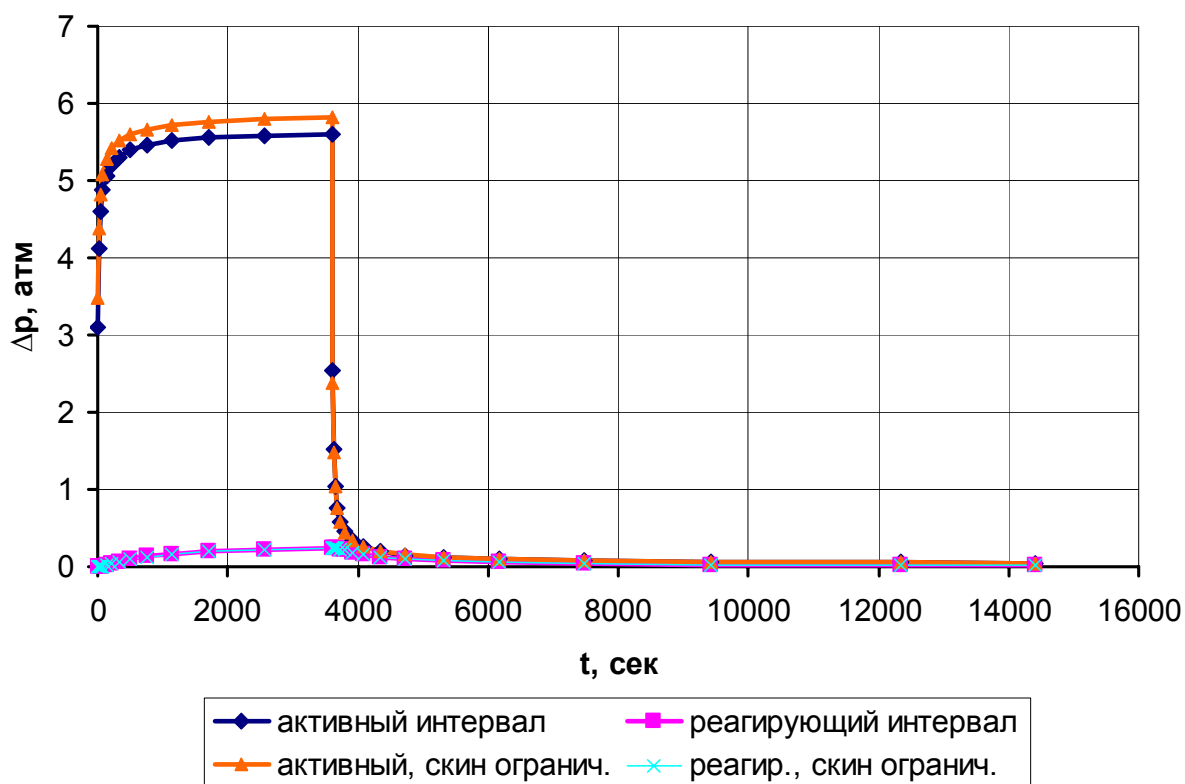


Рис. 2. График зависимости изменения давления от времени

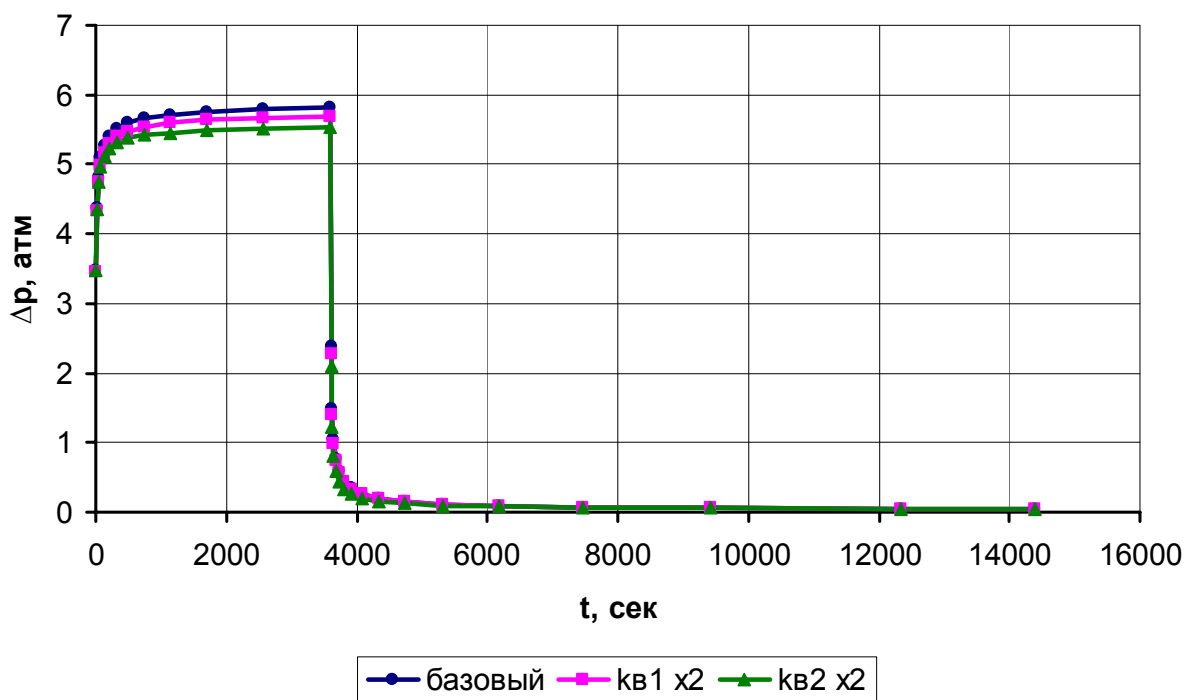


Рис. 3. Изменения давления на активном интервале при протяженности ближней зоны 0,2 м

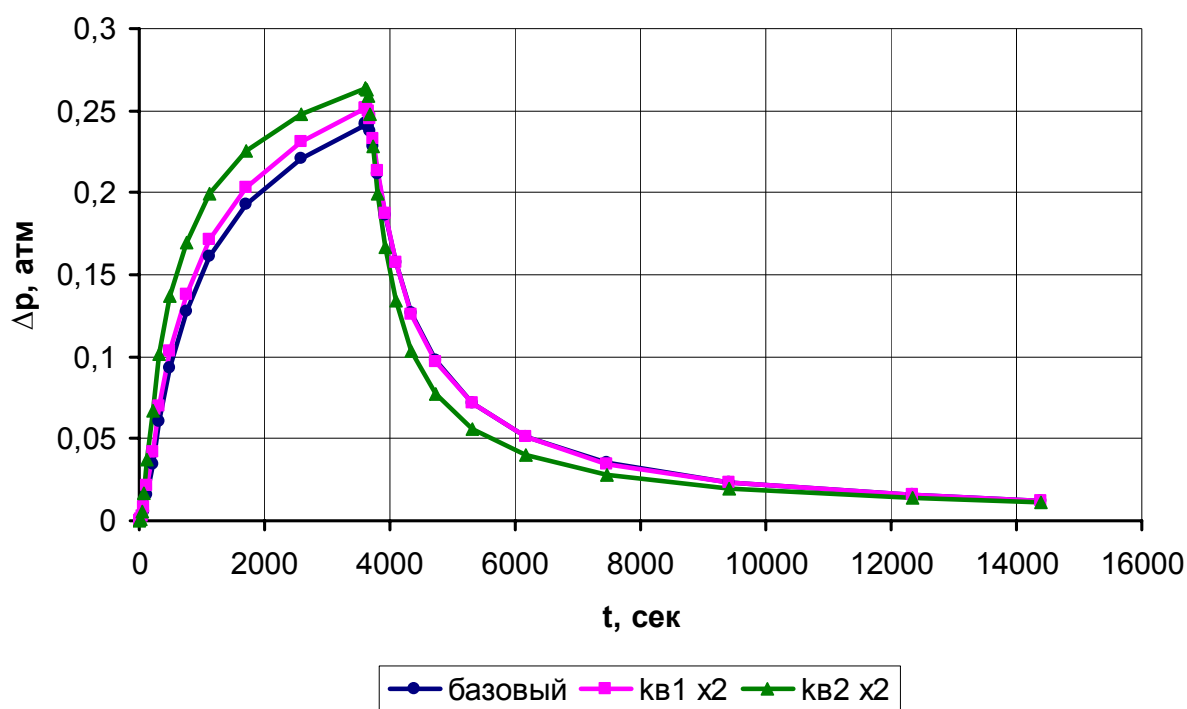


Рис. 4. Изменения давления на реагирующем интервале при протяженности ближней зоны 0,2 м

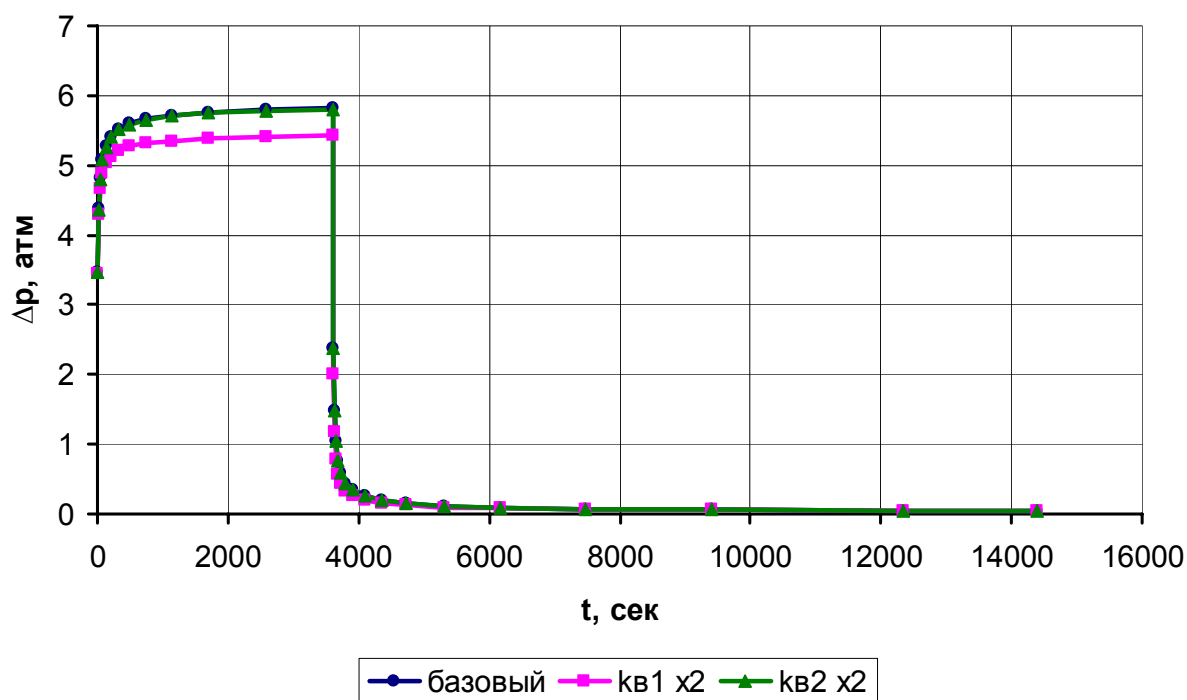


Рис. 5. Изменения давления на активном интервале при протяженности ближней зоны 8 м

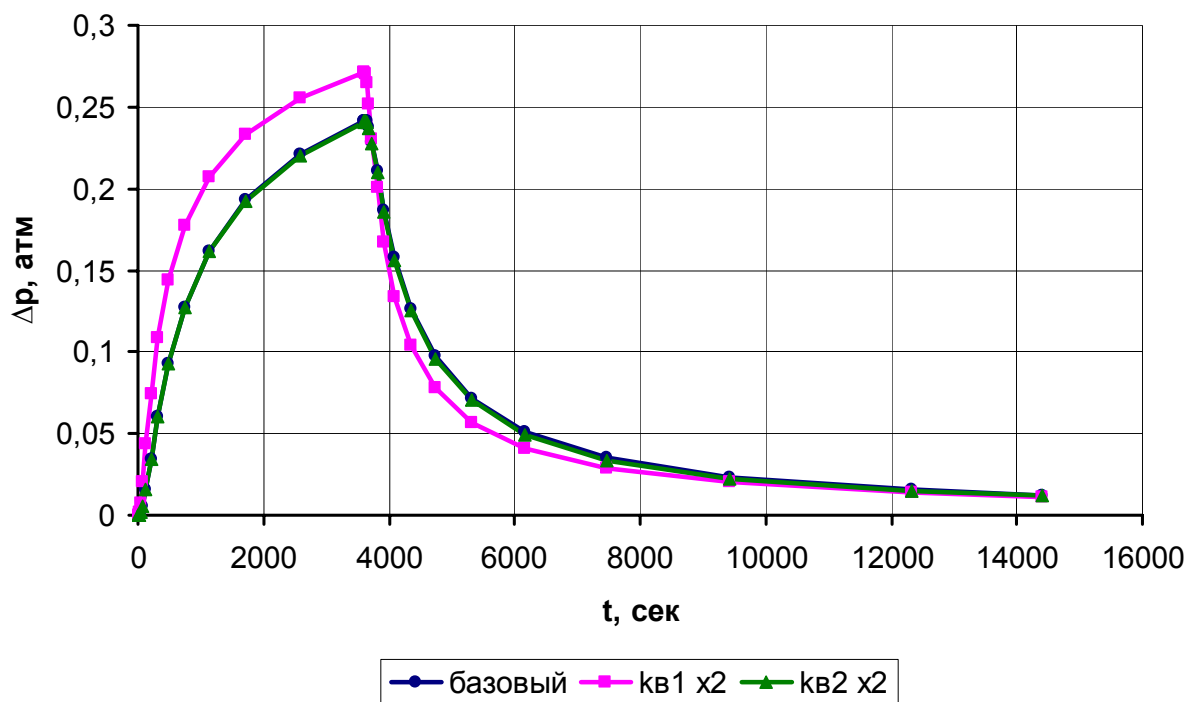


Рис. 6. Изменения давления на реагирующем интервале при протяженности ближней зоны 8 м

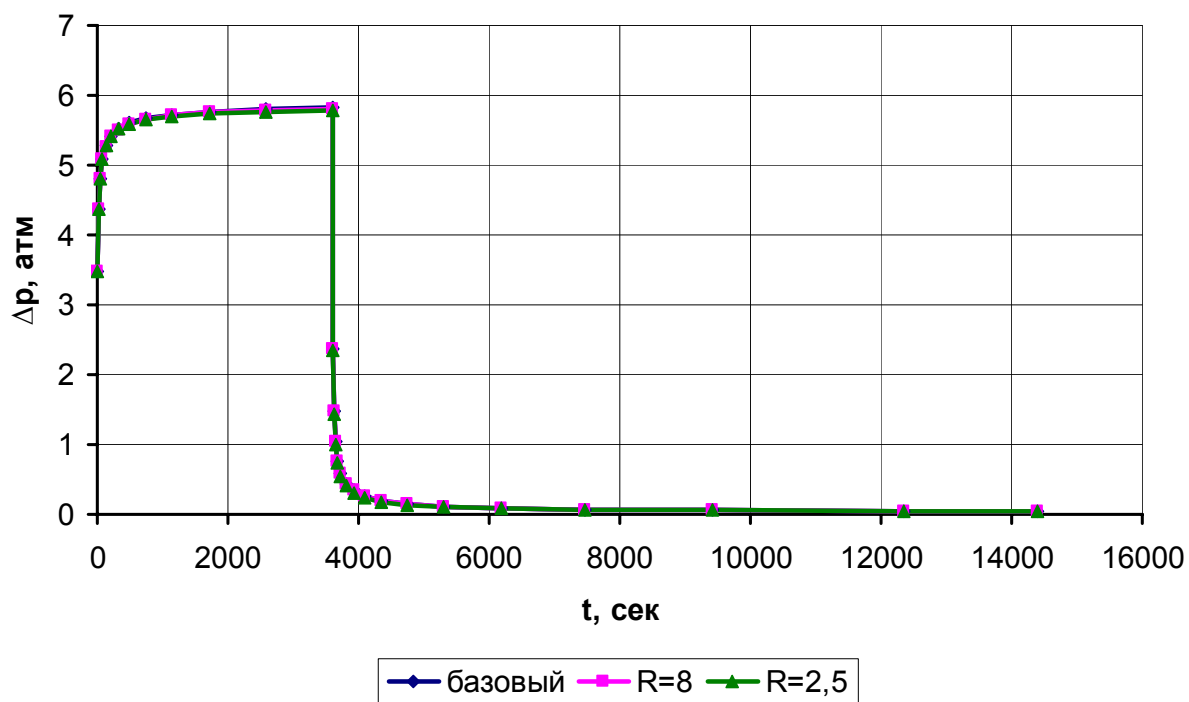


Рис. 7. Изменения давления на активном интервале при варьировании протяженности ближней зоны от 2,5 до 8 м

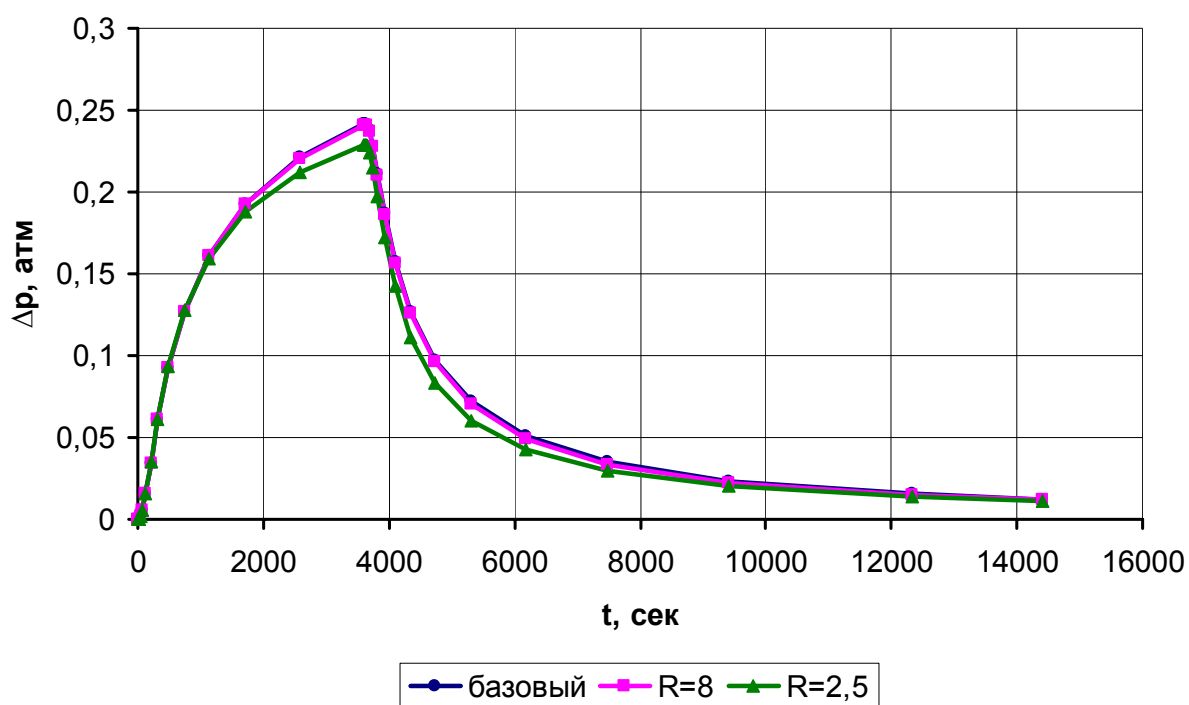


Рис. 8. Изменения давления на реагирующем интервале при варьировании протяженности ближней зоны от 2,5 до 8 м

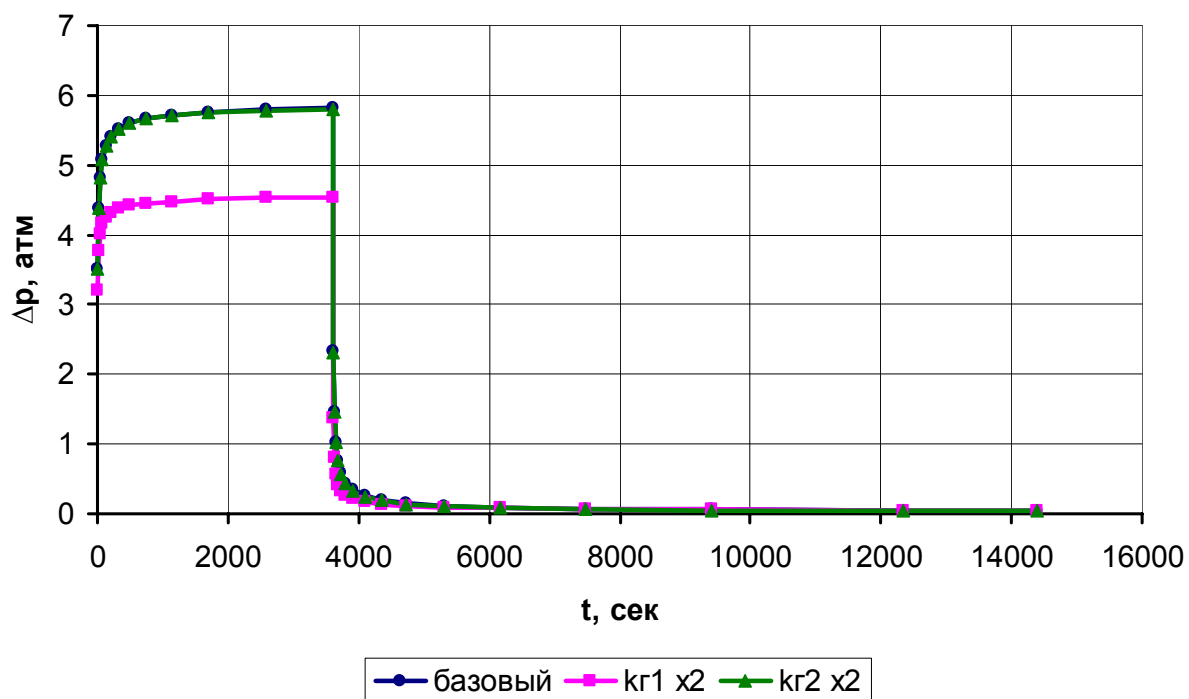


Рис. 9. Изменения давления на активном интервале при протяженности ближней зоны 7,5 м

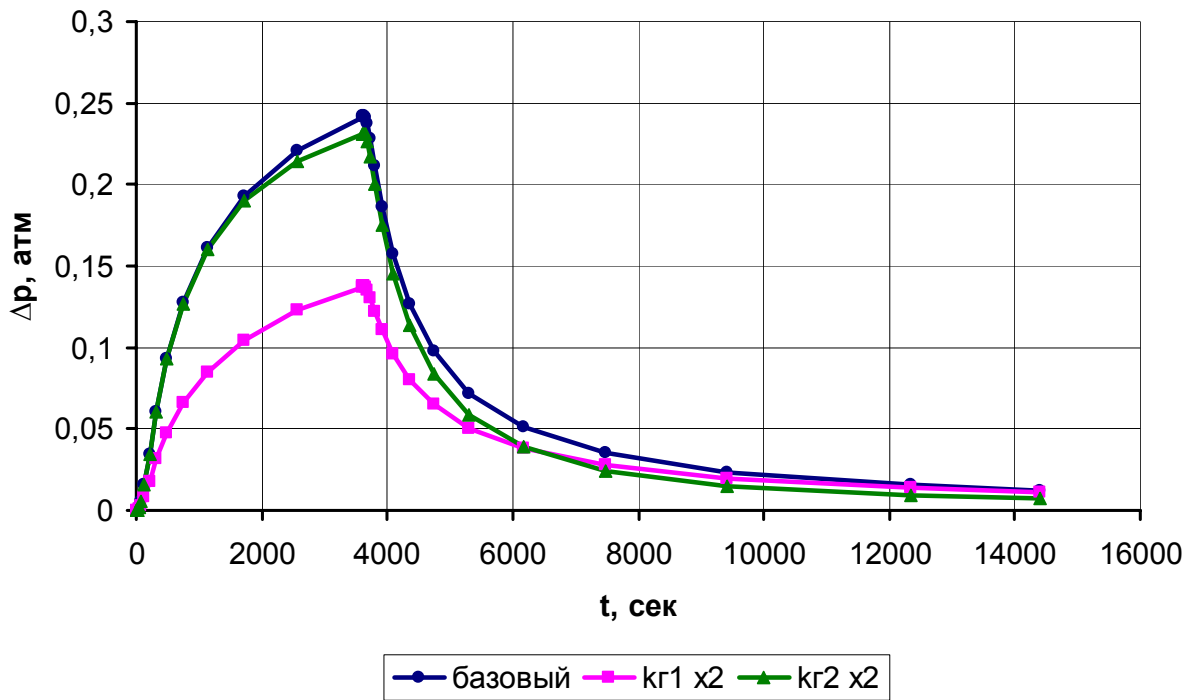


Рис. 10. Изменения давления на реагирующем интервале при протяженности ближней зоны 7,5 м

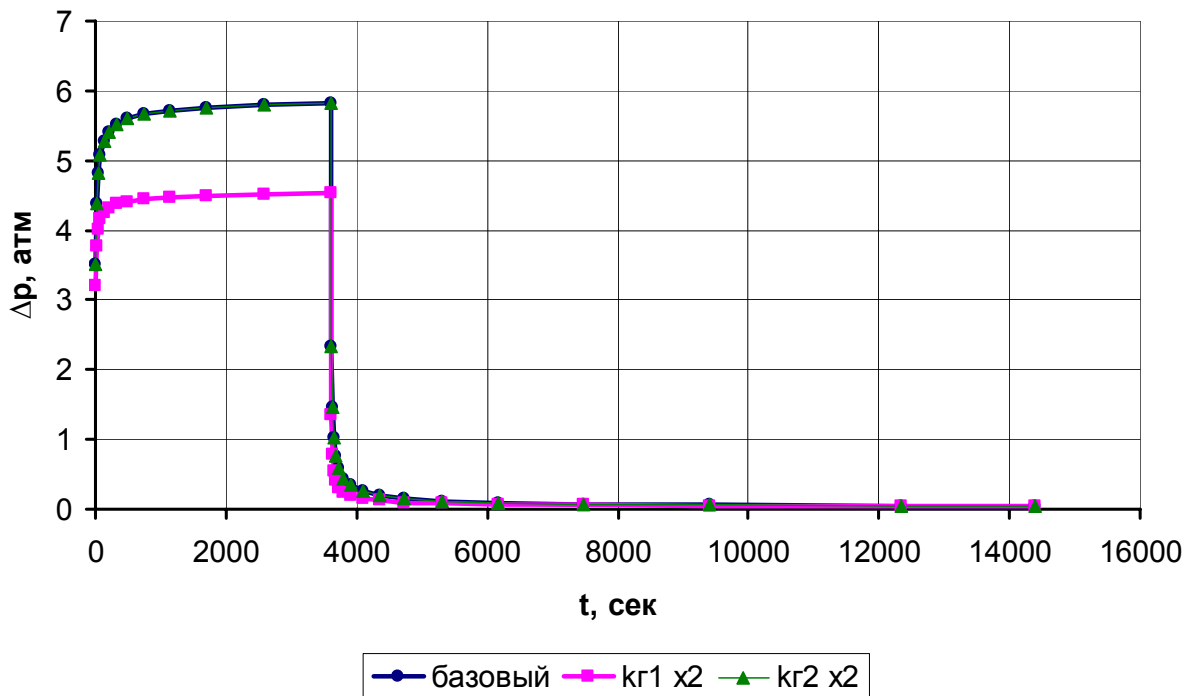


Рис. 11. Изменения давления на активном интервале при протяженности ближней зоны 15 м

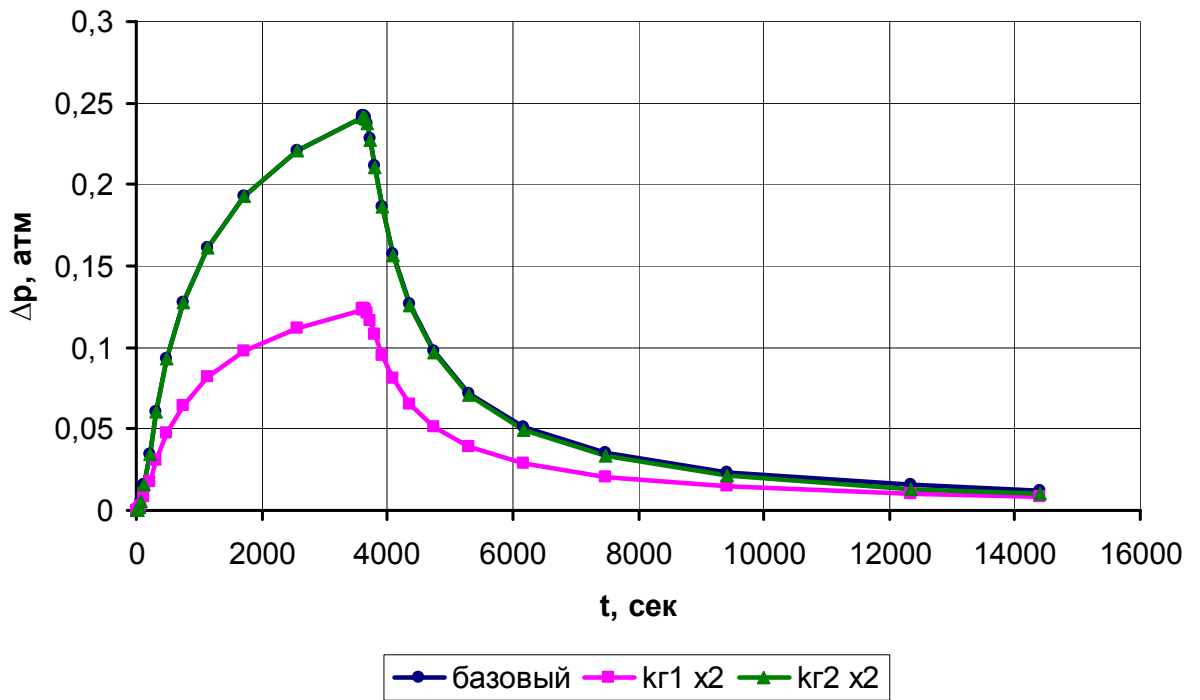


Рис. 12. Изменения давления на реагирующем интервале при протяженности ближней зоны 15 м

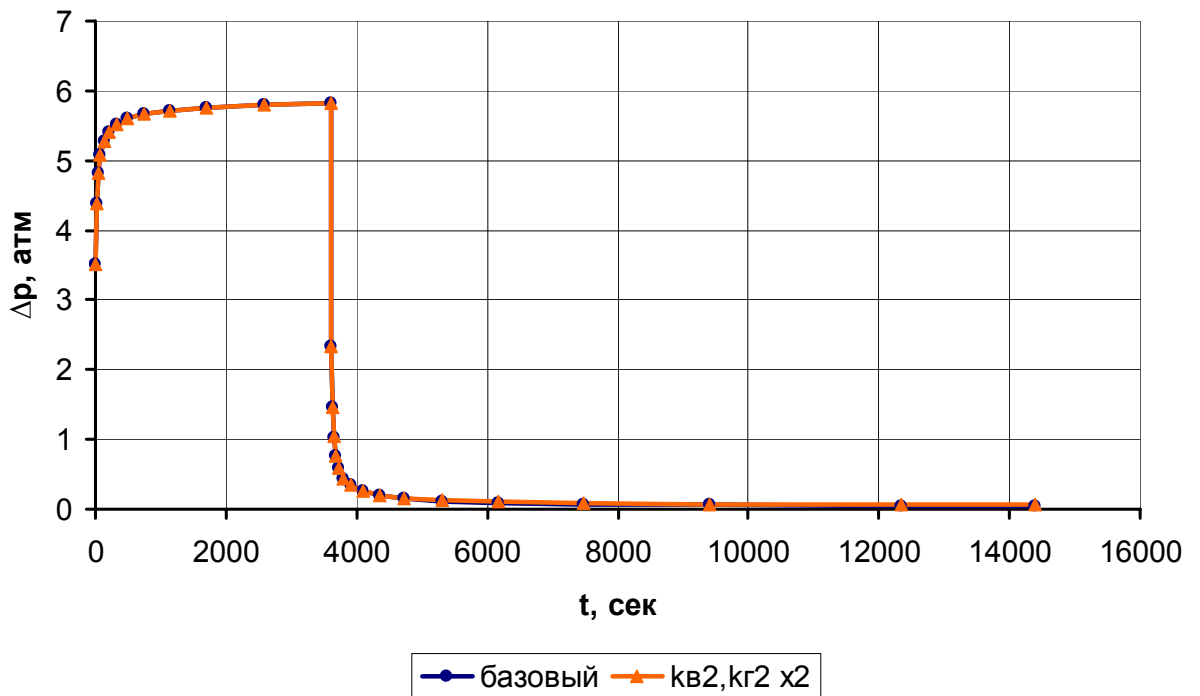


Рис. 13. Изменения давления на активном интервале при протяженности ближней зоны 15 м

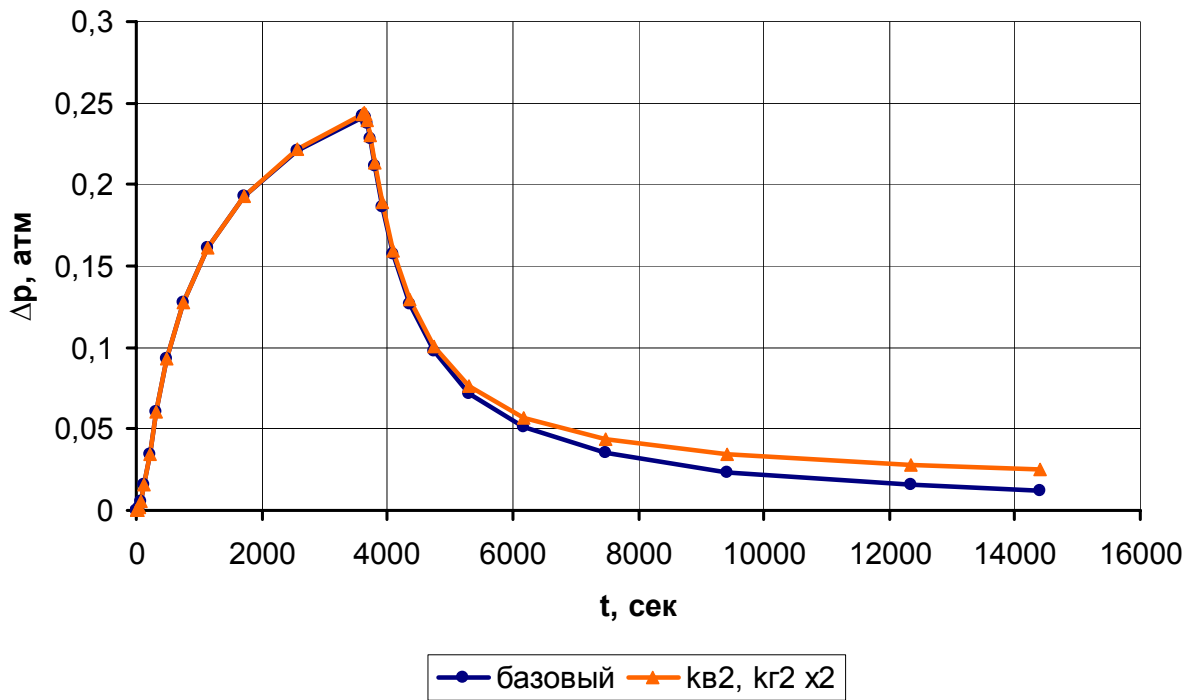


Рис. 14. Изменения давления на реагирующем интервале при протяженности ближней зоны 15 м

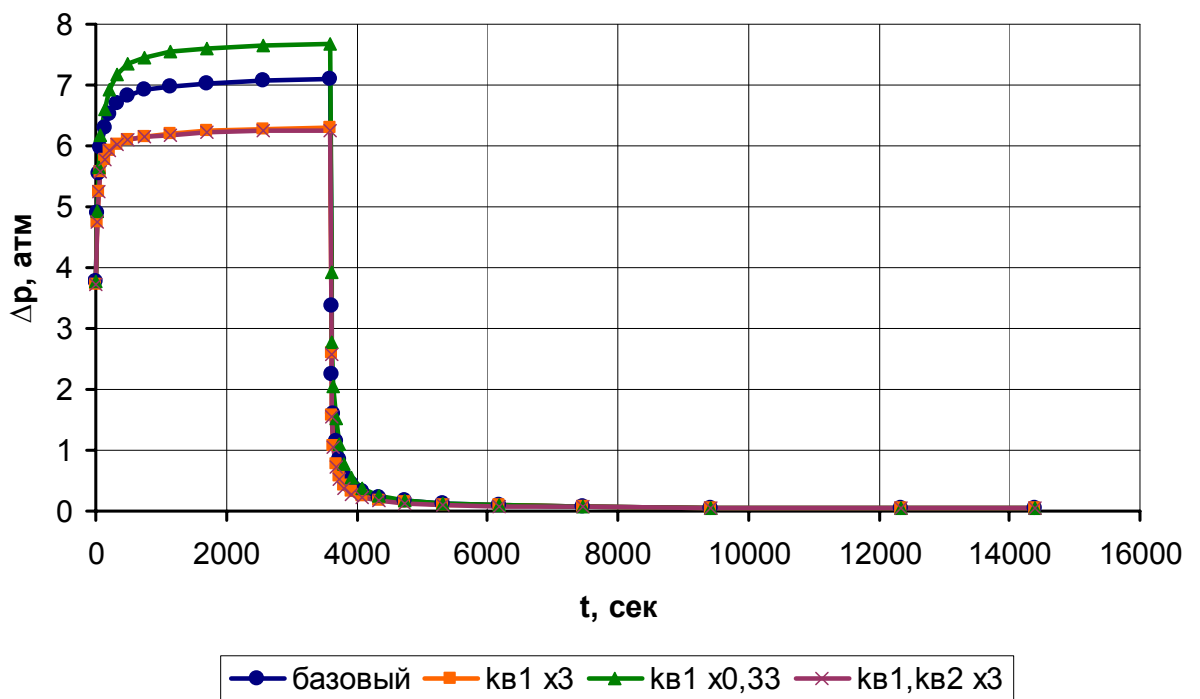


Рис. 15. Изменения давления на активном интервале при протяженности зоны ФБР 1,9 м и зоны чувствительности исследования до 8 м

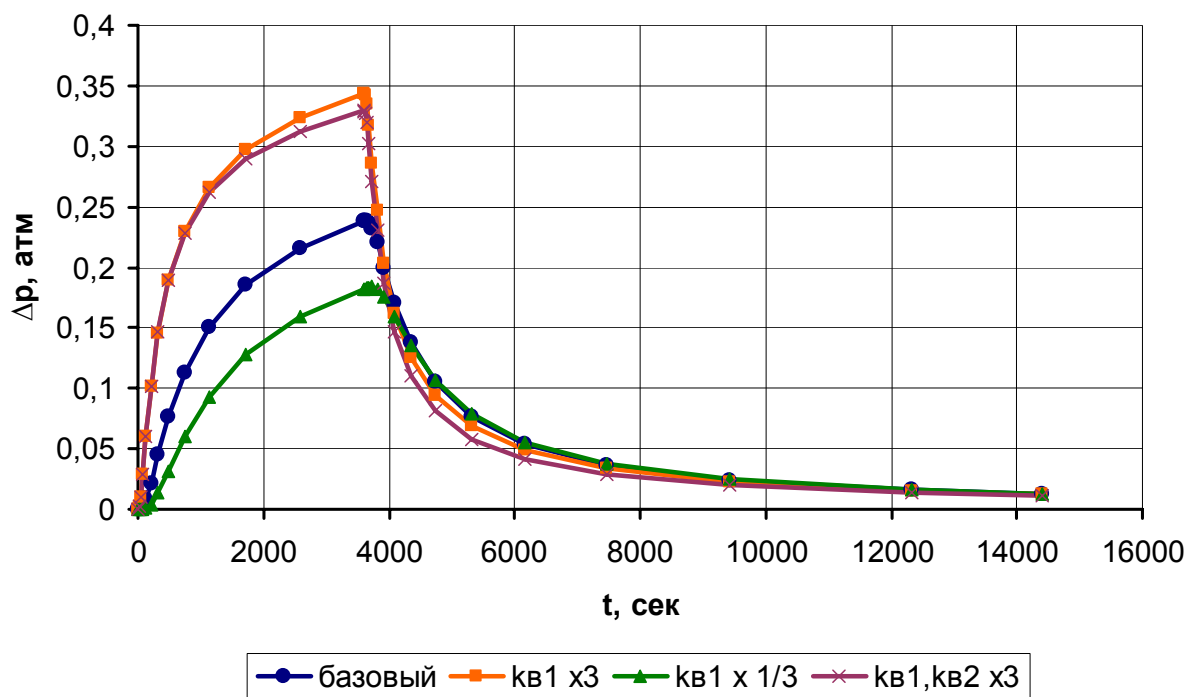


Рис. 16. Изменения давления на реагирующем интервале при протяженности зоны ФБР 1,9 м и зоны чувствительности исследования до 8 м

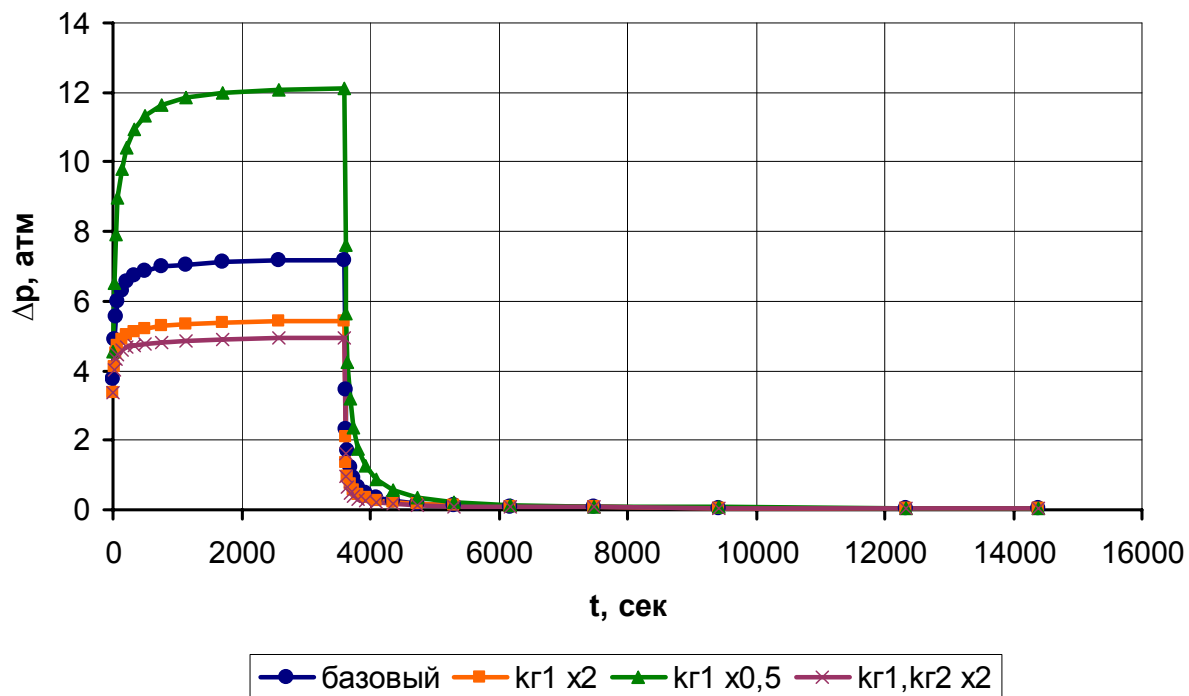


Рис. 17. Изменения давления на активном интервале при протяженности зоны ФБР 1,9 м и зоны чувствительности исследования до 15 м

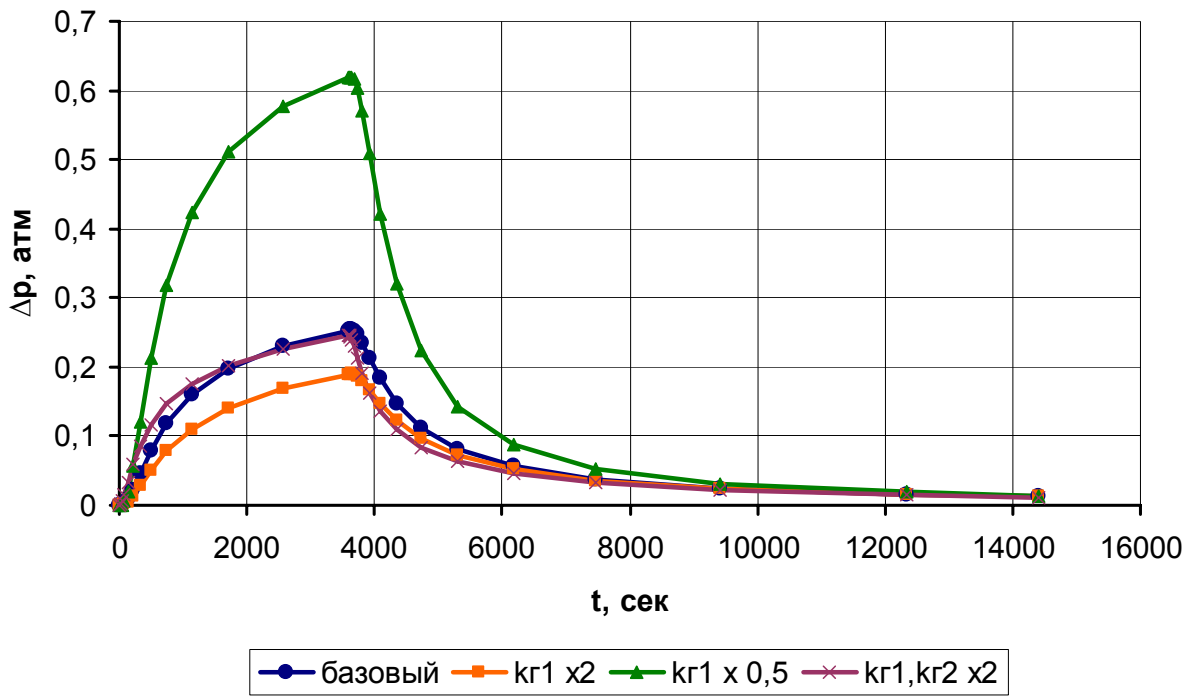


Рис. 18. Изменения давления на реагирующем интервале при протяженности зоны ФБР 1,9 м и зоны чувствительности исследования до 15 м

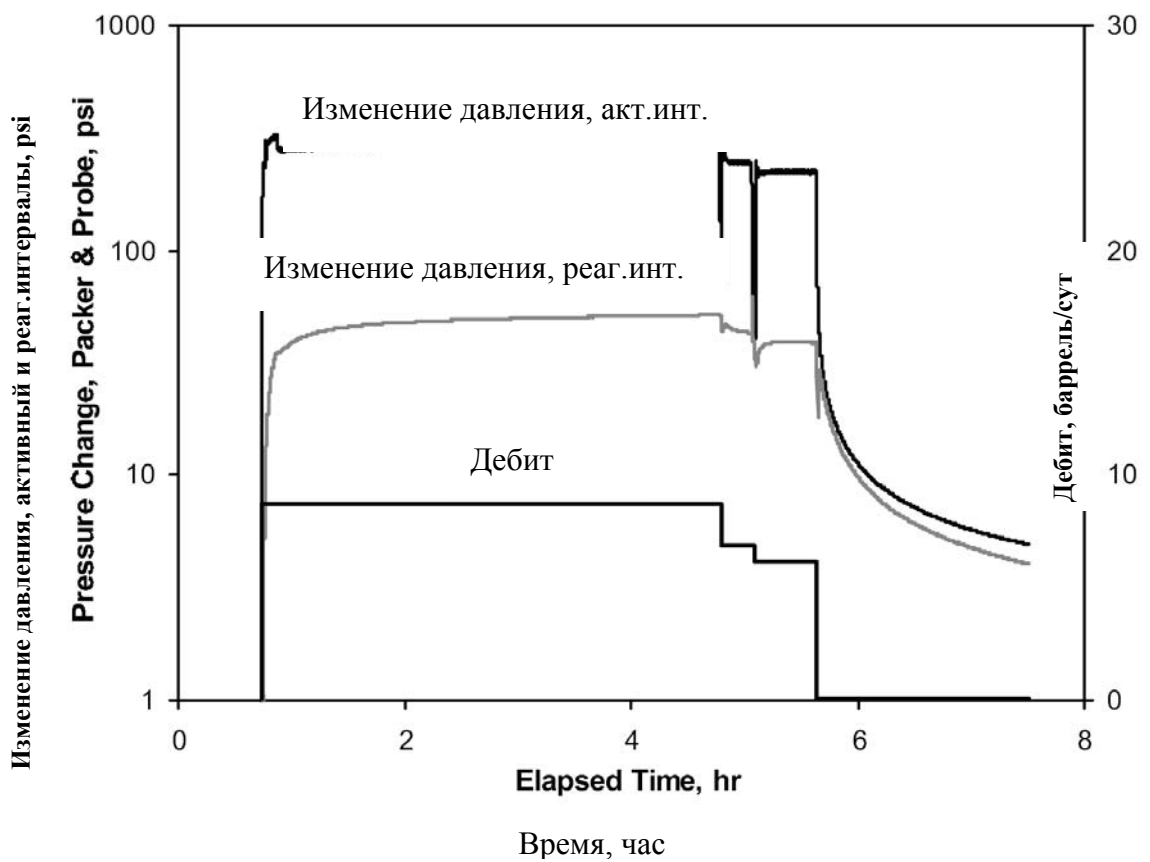


Рис. 19. Зависимости дебита и изменения давления от времени

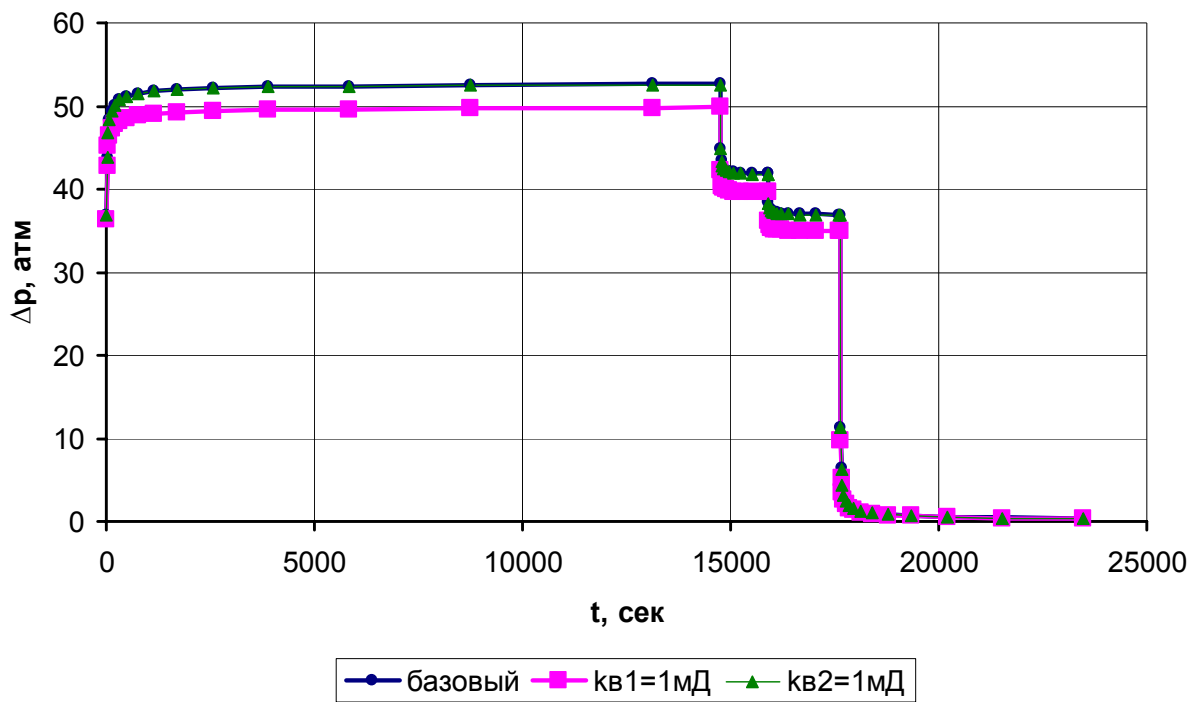


Рис. 20. Изменения давления на активном интервале при протяженности ближней зоны 5,5 м

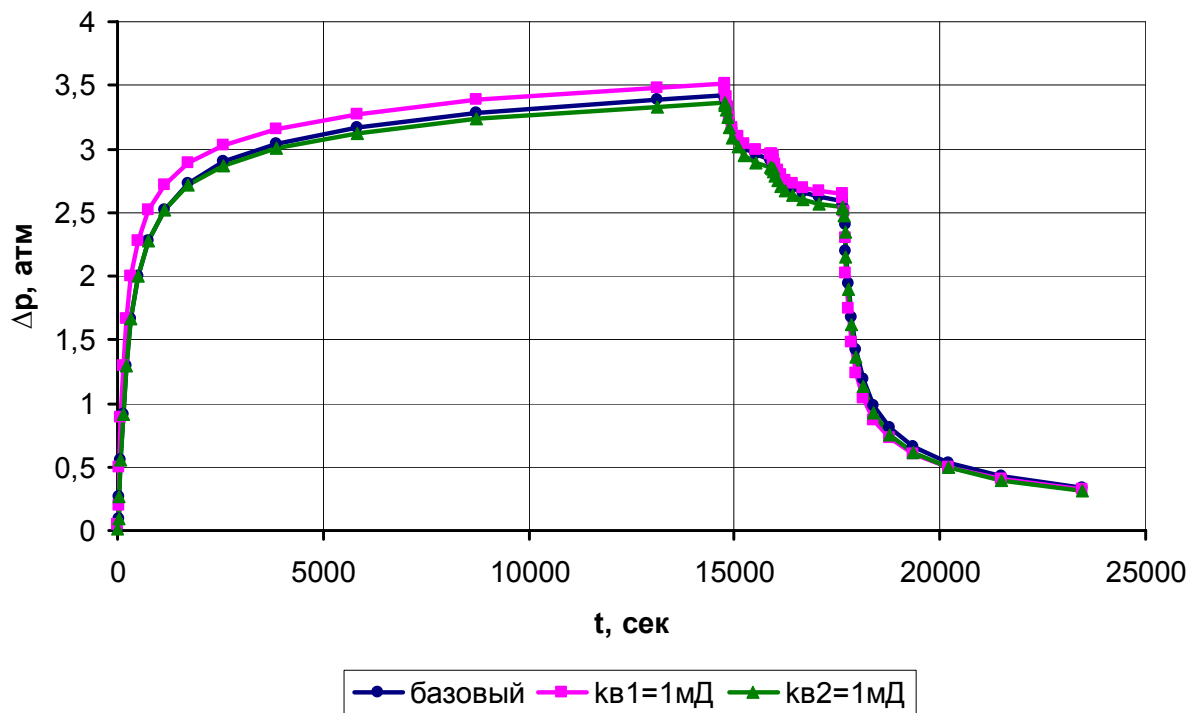


Рис. 21 Изменения давления на реагирующем интервале при протяженности ближней зоны 5,5 м

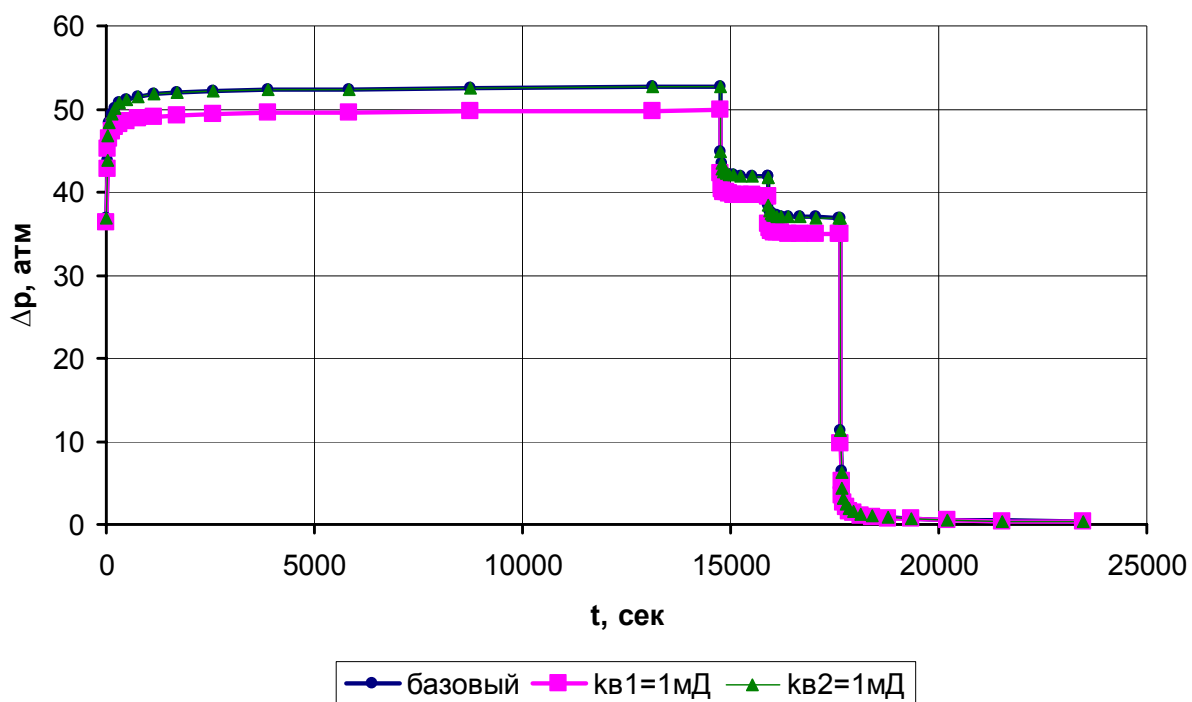


Рис. 22. Изменения давления на активном интервале при протяженности ближней зоны 7,7 м

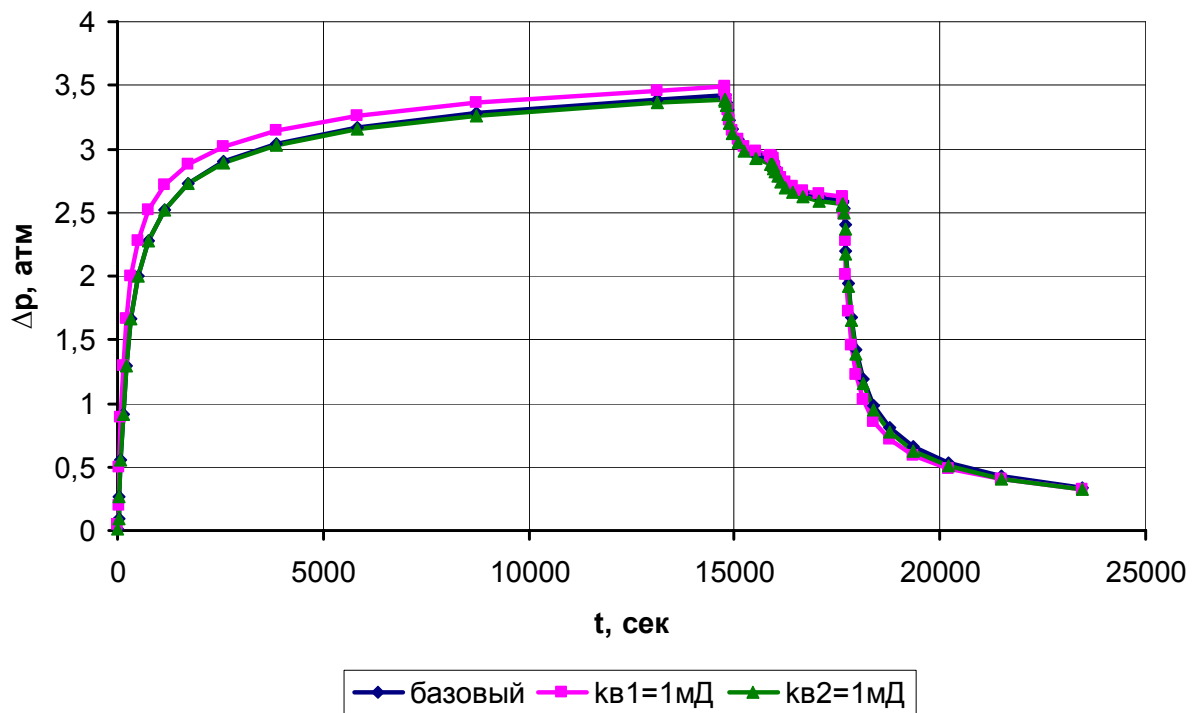


Рис. 23. Изменения давления на реагирующем интервале при протяженности ближней зоны 7,7 м

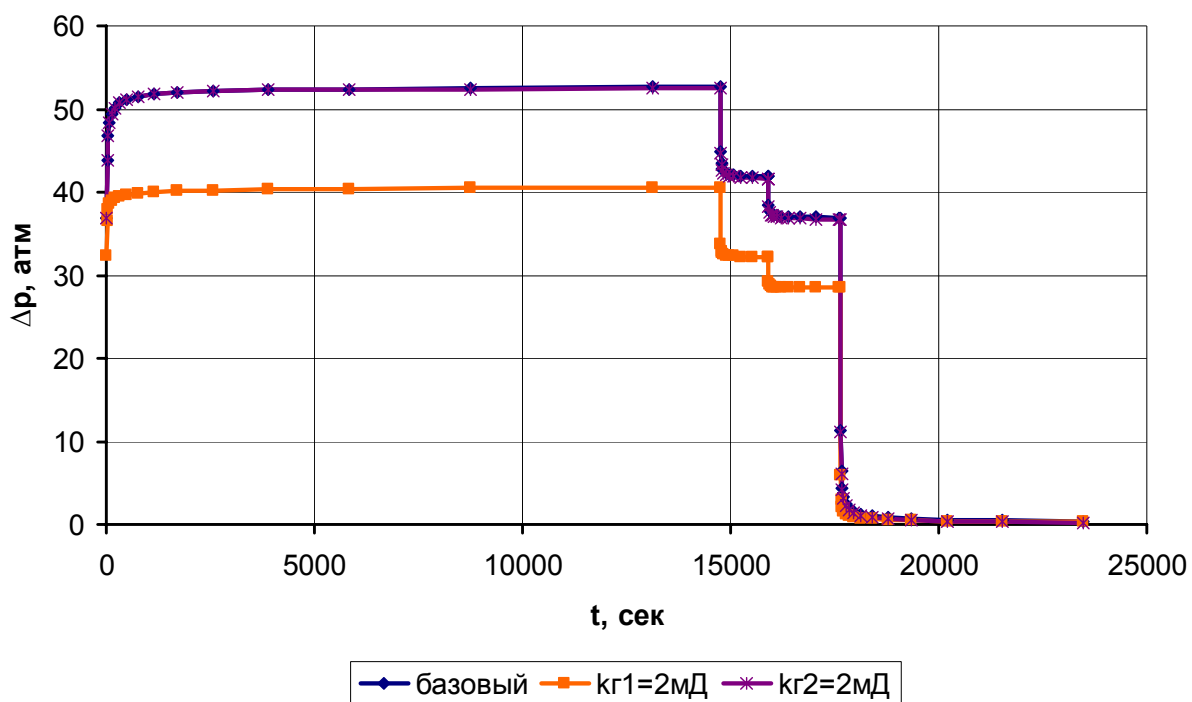


Рис. 24. Изменения давления на активном интервале при протяженности ближней зоны 10 м

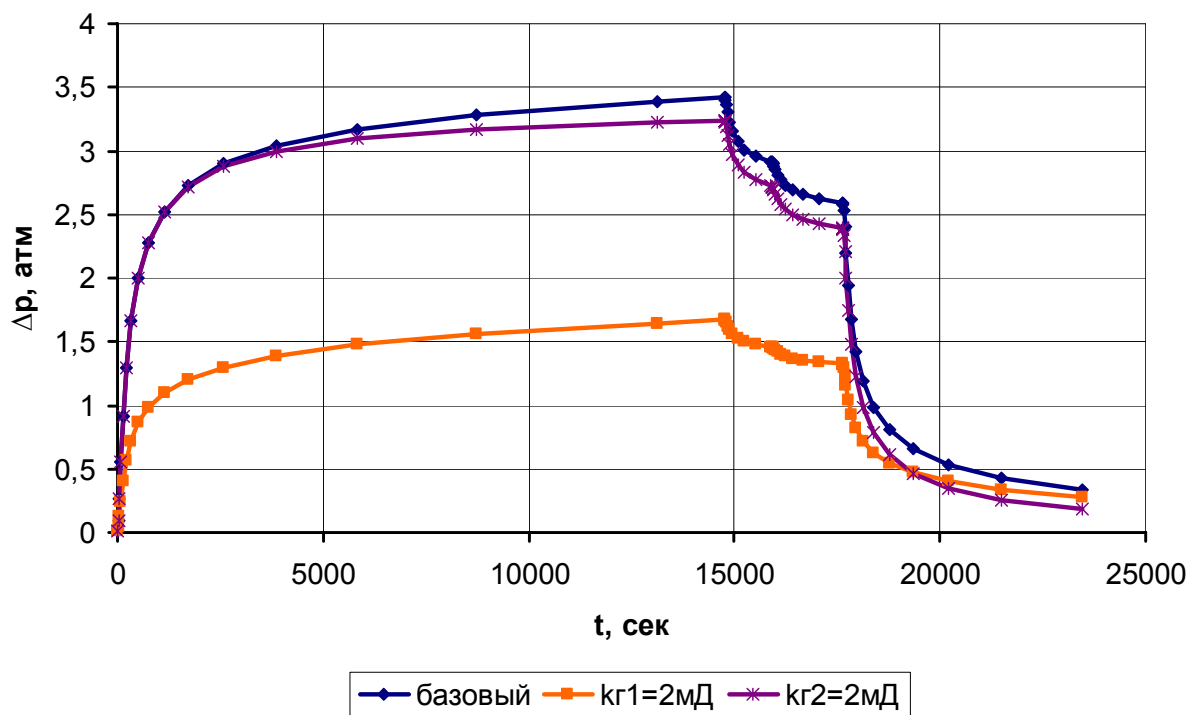


Рис. 25. Изменения давления на реагирующем интервале при протяженности ближней зоны 10 м

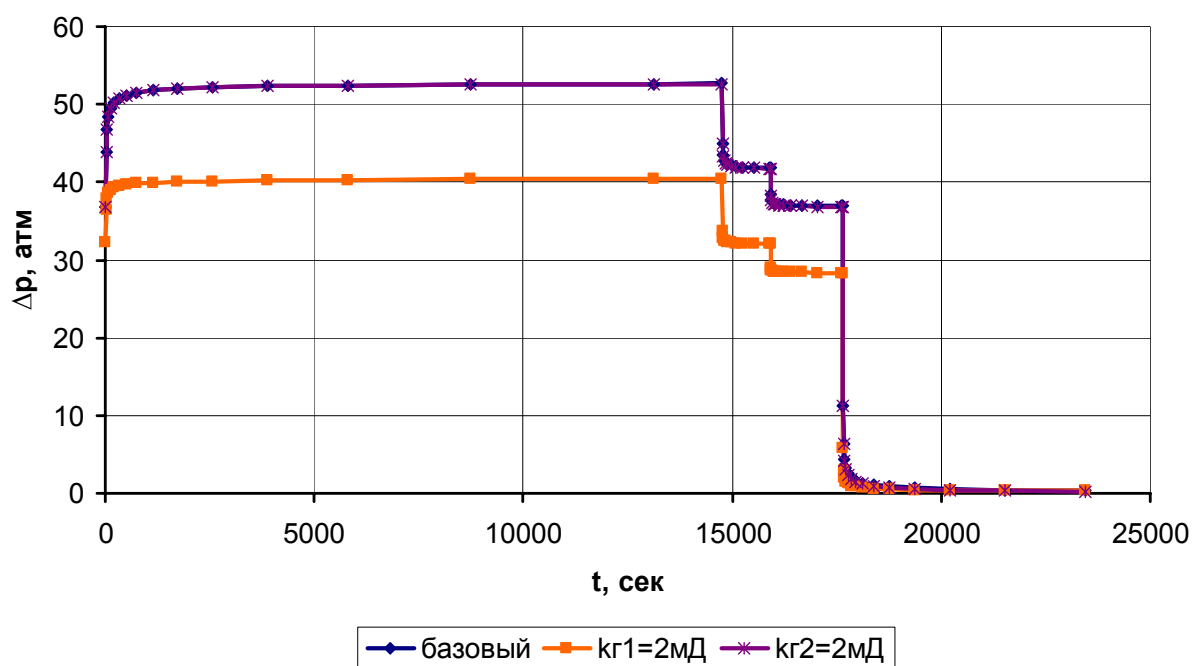


Рис. 26. Изменения давления на активном интервале при протяженности ближней зоны 15 м

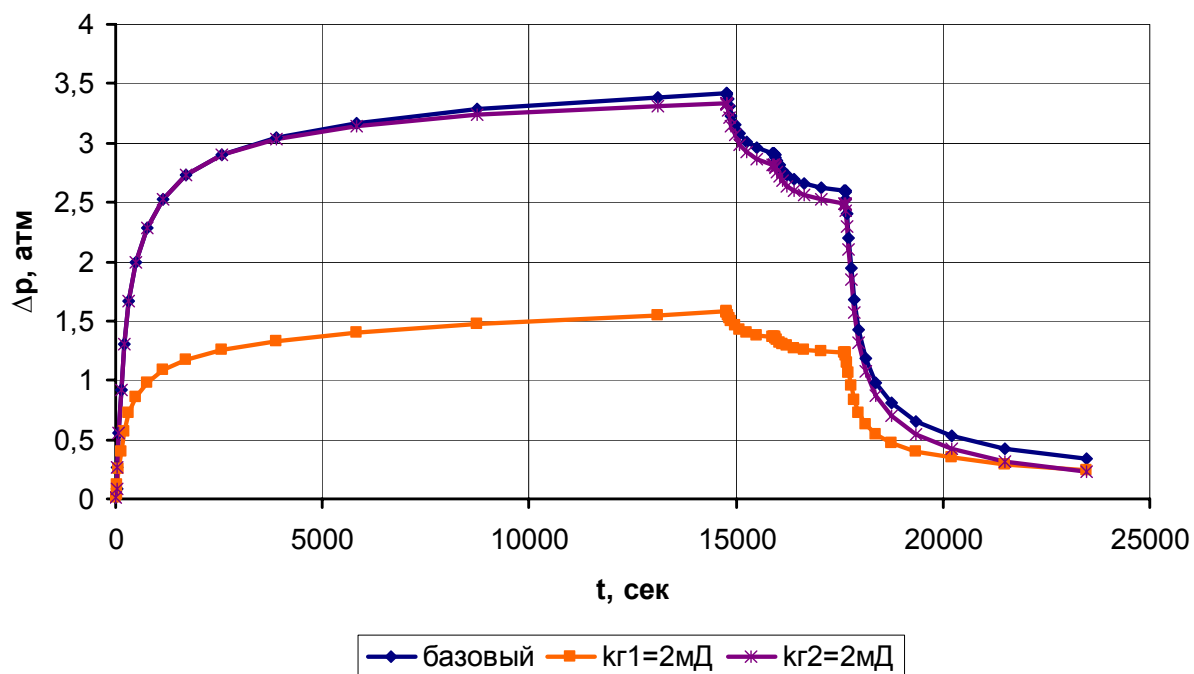


Рис. 27. Изменения давления на реагирующем интервале при протяженности ближней зоны 15 м

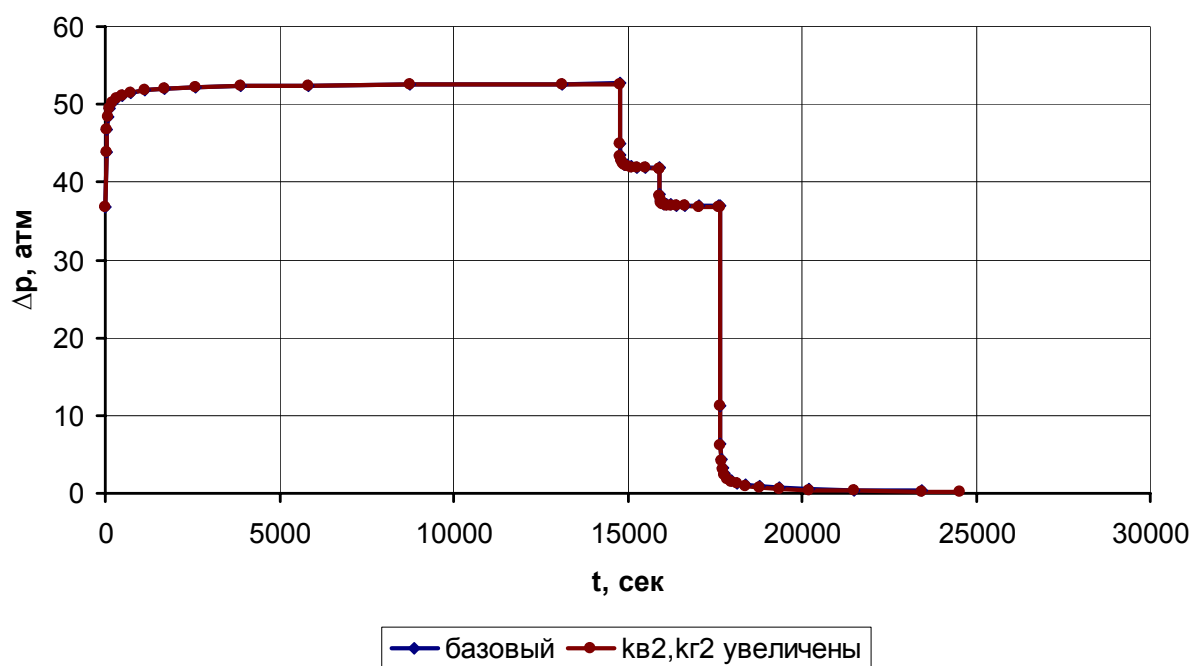


Рис. 28. Изменения давления на активном интервале при протяженности ближней зоны 15 м

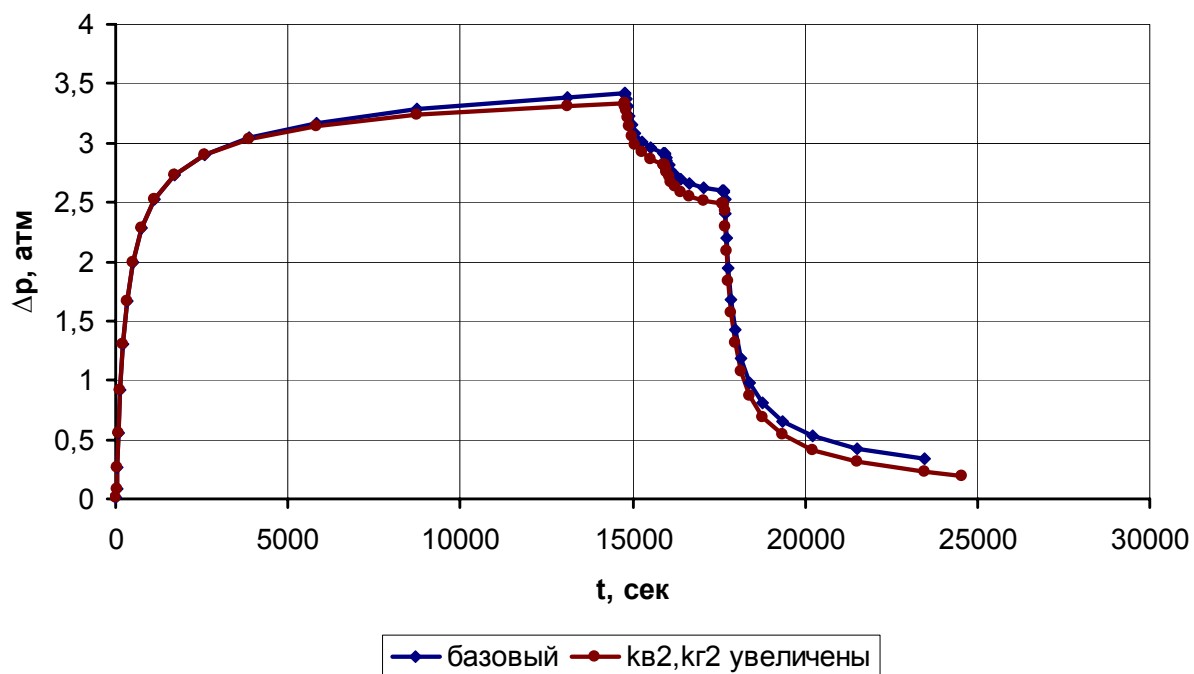


Рис. 29. Изменения давления на реагирующем интервале при протяженности ближней зоны 15 м

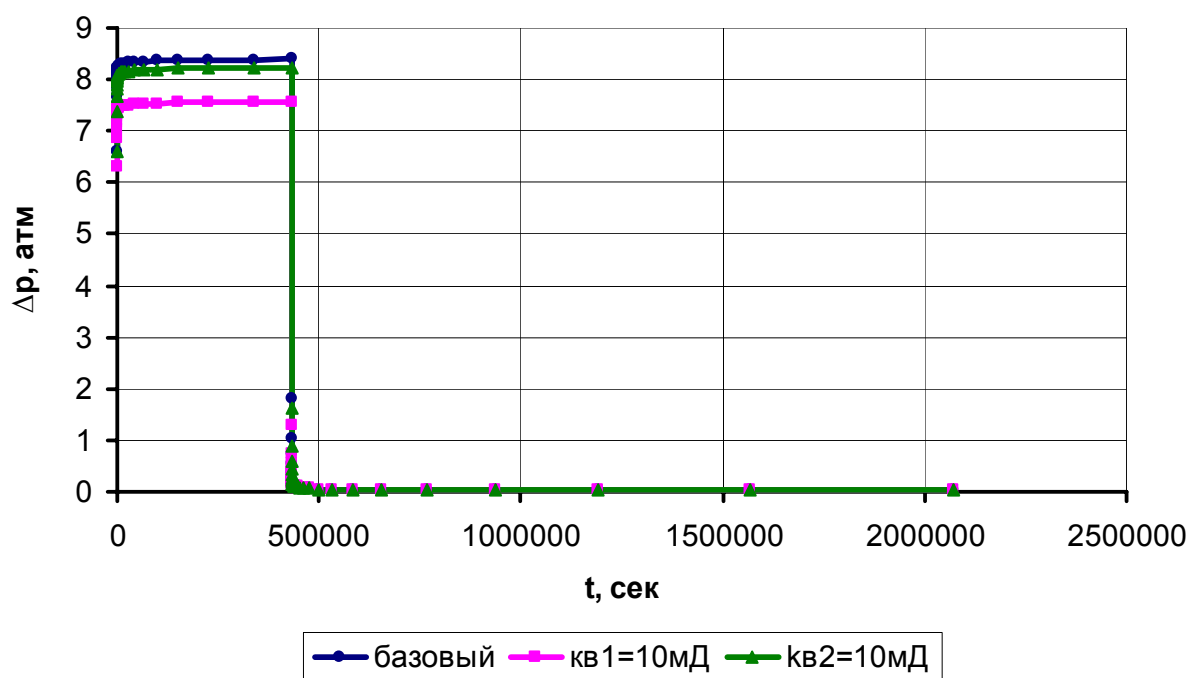


Рис. 30. Изменения давления на активном интервале при протяженности ближней зоны 2,5 м

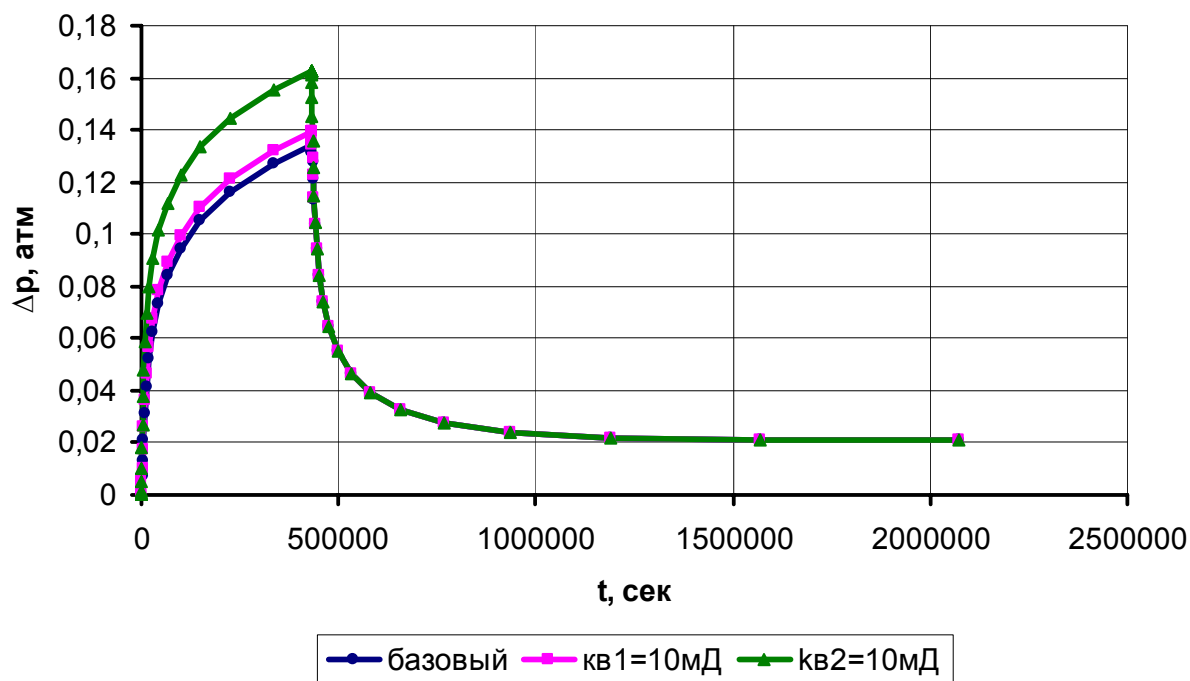


Рис. 31. Изменения давления на реагирующем интервале при протяженности ближней зоны 2,5 м

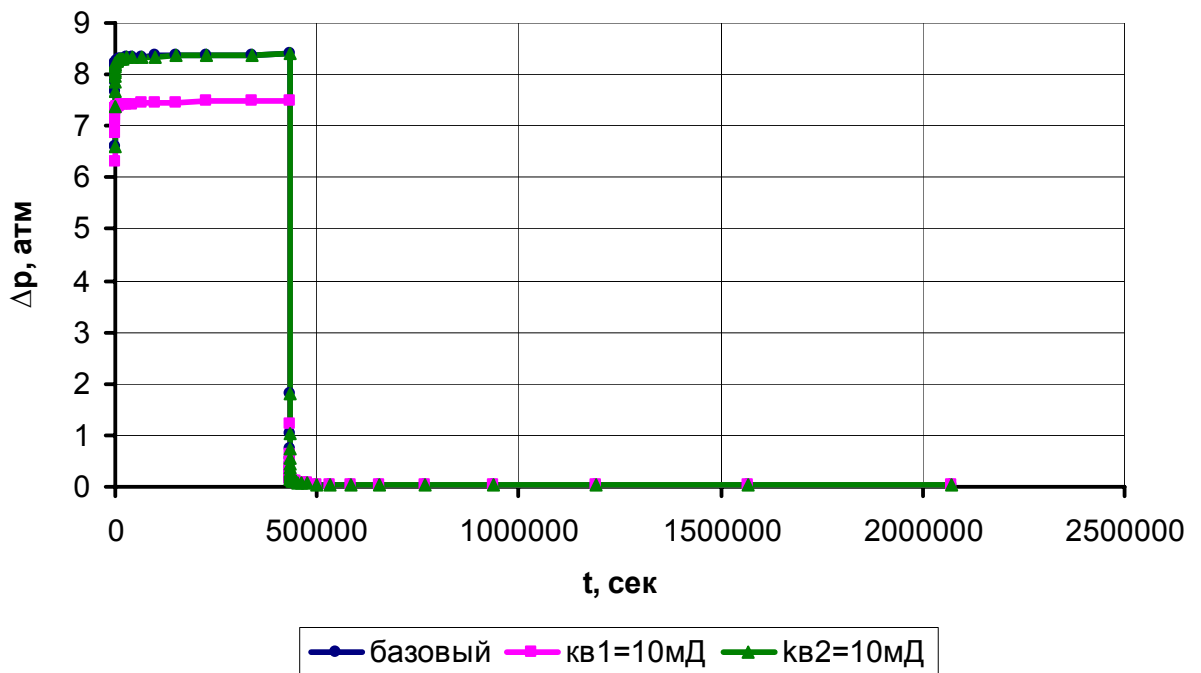


Рис. 32. Изменения давления на активном интервале при протяженности ближней зоны 31 м

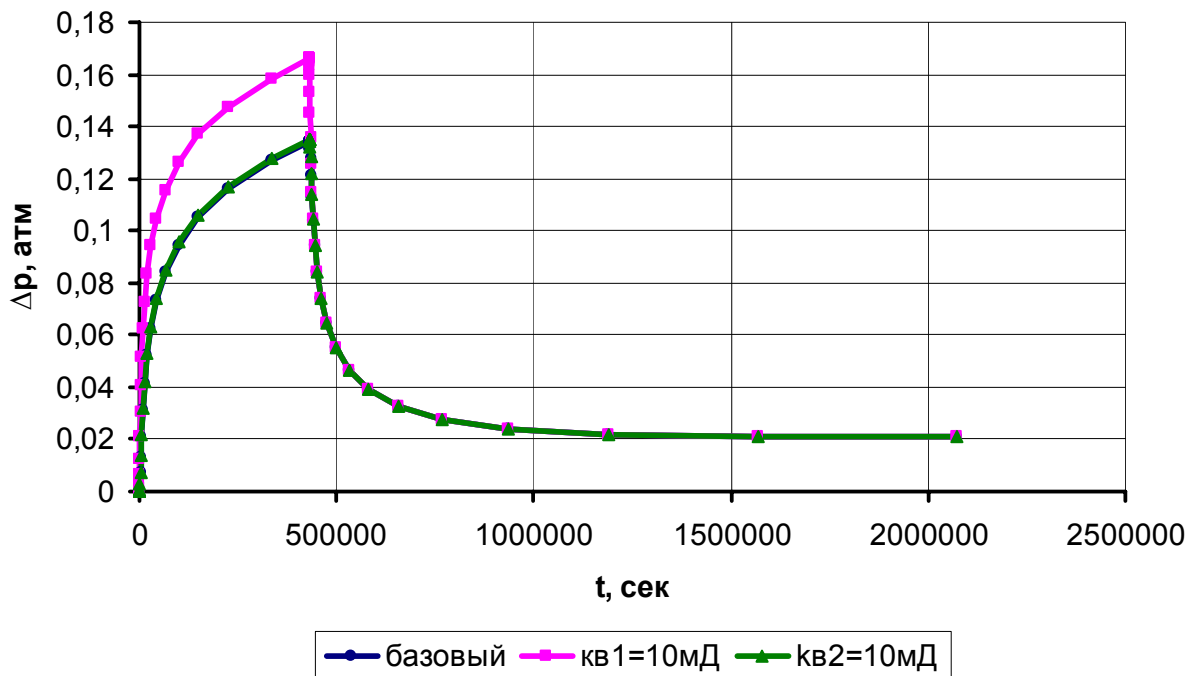


Рис. 33. Изменения давления на реагирующем интервале при протяженности ближней зоны 31 м

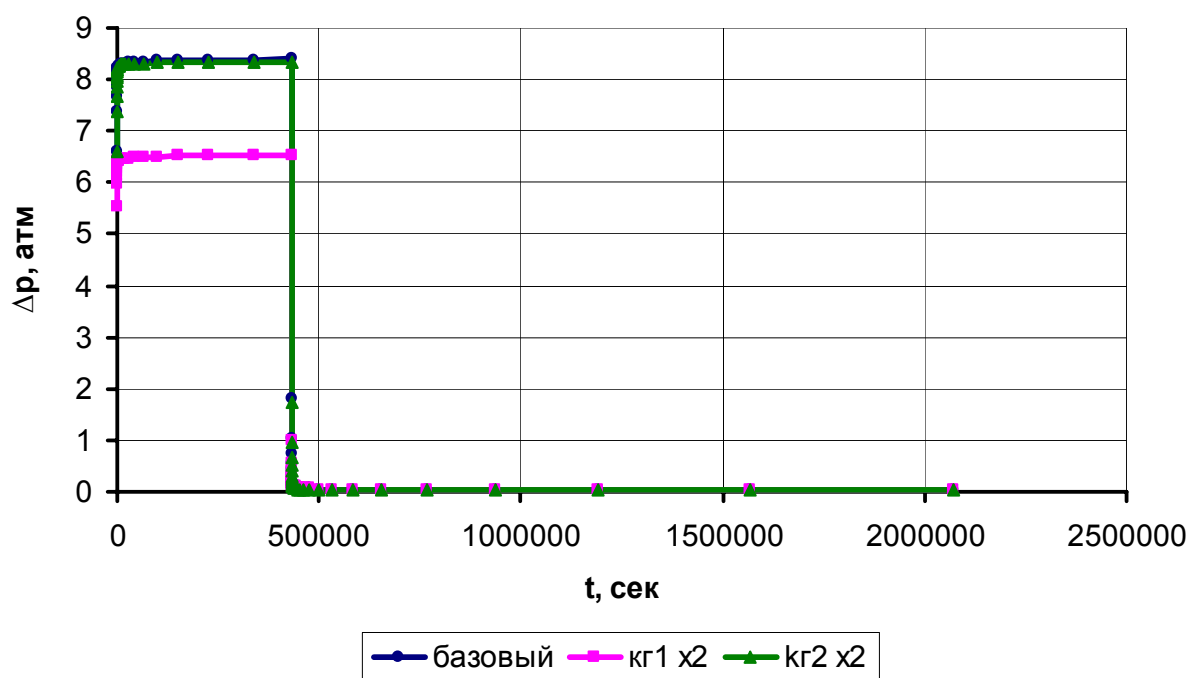


Рис. 34. Изменения давления на активном интервале при протяженности ближней зоны 31 м

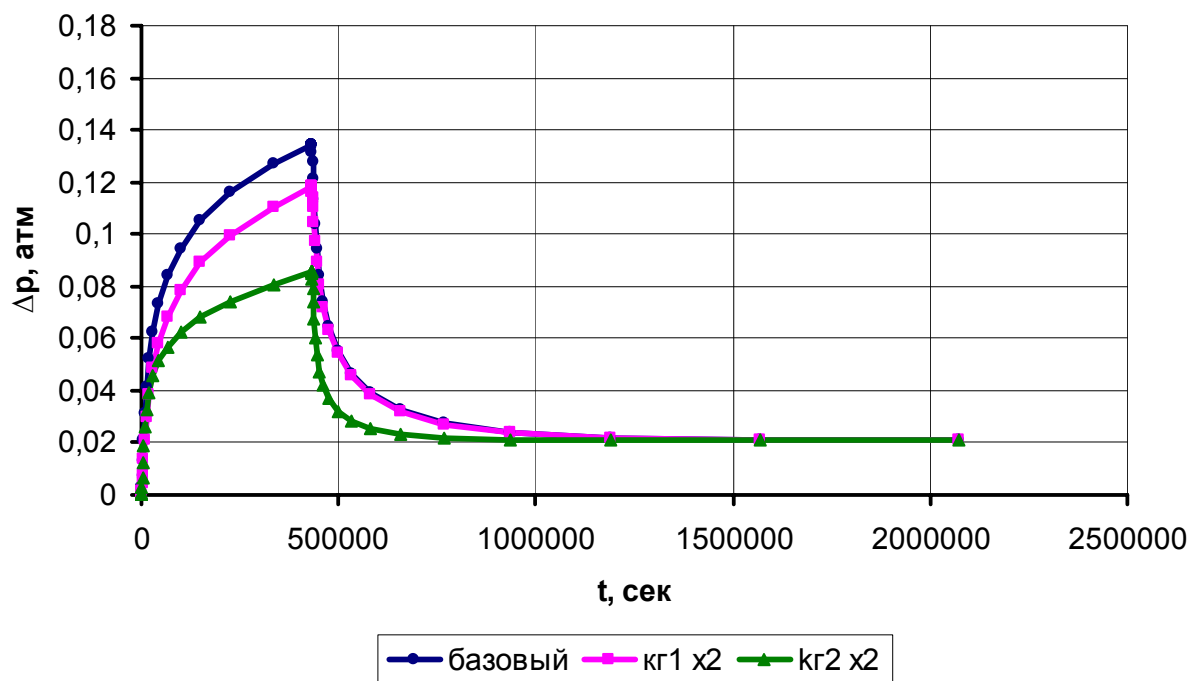


Рис. 35. Изменения давления на реагирующем интервале при протяженности ближней зоны 31 м

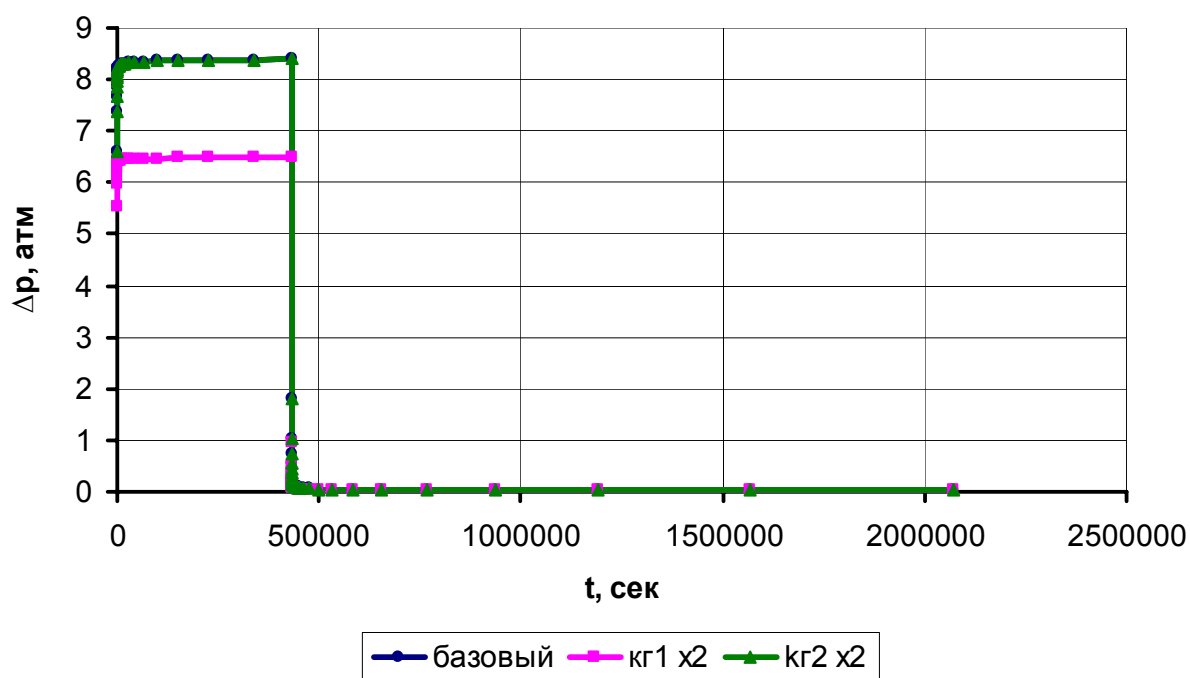


Рис. 36. Изменения давления на активном интервале при протяженности ближней зоны 250 м

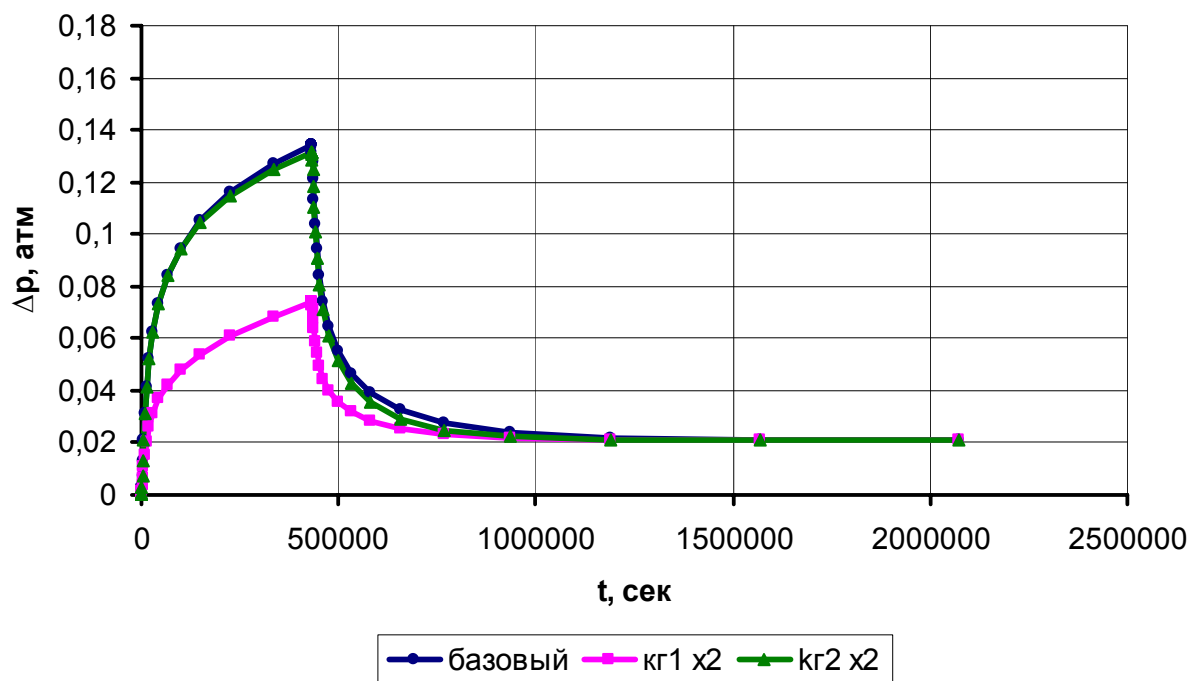


Рис. 37. Изменения давления на реагирующем интервале при протяженности ближней зоны 250 м