

Определение гидравлического трения жидкости по фактическим данным давления гидроудара

Г. А. Макеев

ООО «РН-Технологии»

Рассматриваются постановка задачи о гидроударе в трубе как затухающих акустических колебаниях со степенной моделью гидравлического трения, а также особенности распространения колебаний гидроудара при различных граничных условиях, определяющих процесс инициации гидроудара. Приведена простая методика оценки коэффициента и модели гидравлического трения по наклону кривой падения давления после ухода первой волны гидроудара. Проводятся верификация методики с помощью численных экспериментов, а также валидация её на фактических данных гидроудара в процессе операции гидроразрыва пласта.

Гидроудар; коэффициент гидравлического трения; обратная задача.

ВВЕДЕНИЕ

Гидравлический удар (гидроудар, хаммер-эффект) – это резкие колебания давления в закрытой протяжённой гидравлической системе, вызванные резкими изменениями скорости движения жидкости. В индустрии нефтегазодобычи под гидроударом понимают колебания устьевого и забойного давления, возникающие после остановки насосов или резкого изменения скорости течения жидкости в стволе скважины в процессе различных технологических операций, например, в процессе гидроразрыва пласта (ГРП). Как показал Н. Е. Жуковский больше 120 лет назад [Жук49], причиной гидроудара является инерция движущейся жидкости, которая не может мгновенно остановиться или ускориться. Резкие колебания давления во время гидроудара являются нежелательными потому, что могут повредить технологическое оборудование. С другой стороны, гидроудар как явление переносит со скоростью звука в среде информацию о неизвестных параметрах скважины, трещины ГРП и породы. Амплитуда колебаний гидроудара, как правило, на устье скважины гораздо больше, чем на забое, но мнения о причине таких отличий разнятся. Также общепринятым мнением является то, что продолжительный гидроудар говорит о хорошей связи между скважиной и трещиной/пластом. Считается, что по форме колебаний гидроудара, его продолжительности, динамике затухания амплитуды можно судить не только о свойствах трубы, но и о геометрии трещины и свойствах породы. Однако фактические данные показывают (рис. 1), что гидроудар (удвоенной частоты) возникает и в том случае, когда скважина вообще не соединена с пластом. Такие колебания не могут нести информацию о породе или трещине ГРП в ней.

Однако можно ожидать, что колебания давления при гидроударе несут информацию о стволе скважины, насосно-компрессорных трубах (НКТ) и жидкости, их заполняющей. Общие принципы математического моделирования требуют выбирать более сложную математическую модель только тогда, когда более простая модель не может успешно воспроизвести

Макеев Г. А. Определение гидравлического трения жидкости по фактическим данным давления гидроудара // СИИТ. 2026. Т. 8, № 2(26). С. 59-74. DOI: [10.54708/SIIT-2026-no2-p59](https://doi.org/10.54708/SIIT-2026-no2-p59). EDN: VIFEIR.

Makeev G. A. "Determining hydraulic friction of a fluid using water hammer pressure actual data" // SIIT. 2026. Vol. 8, no. 2(26), pp. 59-74. DOI: [10.54708/SIIT-2026-no2-p59](https://doi.org/10.54708/SIIT-2026-no2-p59). EDN: VIFEIR. (In Russian).

и объяснить имеющиеся фактические данные. В этой работе будет показано, какие эффекты успешно описывает простая модель акустических колебаний в стволе, учитывающая гидравлические потери давления на трение в стволе и потери давления в интервале перфорации (ИП), а также показано, как можно такую модель использовать для решения обратных задач.

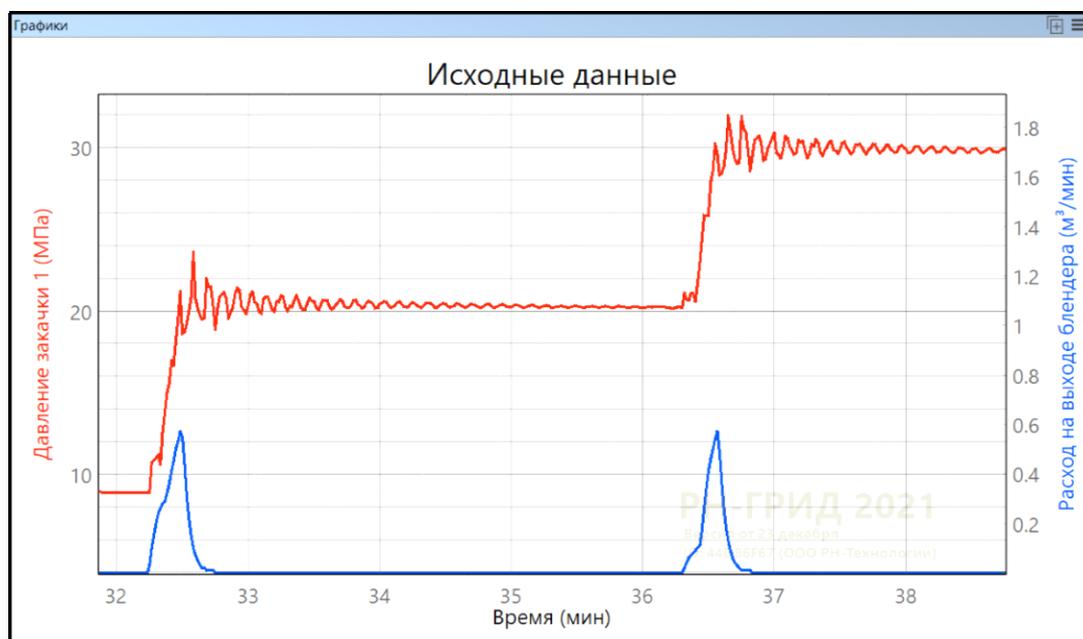


Рис. 1 Гидроудар в скважине, не соединённой с пластом

Известные подходы к анализу гидроудара

Существуют различные подходы к анализу гидроудара, которые отличаются в первую очередь тем, как интерпретировать сами колебания давления при гидроударе. В рамках одного подхода считается, что регистрируемые колебания давления – это акустические колебания давления в стволе, которые отражаются от входа в открытую трещину. В другом подходе принято считать, что волны давления заходят из ствола в трещину, распространяются по ней и отражаются от её границы, возвращаясь в ствол. Третий подход утверждает, что колебания давления – это упругие колебания объёма самой трещины ГРП. В соответствии с выбранным подходом используется математическая модель, адаптируемая на имеющиеся фактические данные.

В работе [Pat98] для контроля трещин авто-ГРП на нагнетательных скважинах для исследования импеданса трубы и трещины генерируются, регистрируются и исследуются волны, которые рассматриваются как волны Стоунли, поверхностные акустические волны.

Обзорная статья [Ghi05] описывает историю и текущее (на 2005 год) состояние в области анализа гидроудара. Приводится классический вывод уравнения одномерного гидроудара в трубе из транспортной теоремы Рейнольдса. Рассматриваются разные модели гидравлического трения (стационарные и нет) на стенке трубы для разных режимов. Приводится обзор численных методов расчёта гидроудара, включая метод характеристик как основной, приводятся детали его реализации и также другие схемы, явные и неявные, их особенности, оценка и учёт дисперсии и диссипации. Приводится обзор 11 различных программных продуктов для расчёта гидроудара в различных технических областях. Приводятся эксперименты по гидроудару с высокочастотными генераторами и приёмниками для восстановления неизвестных параметров труб. Отмечается проблема высокой стоимости точных расходомеров, а также рассматриваются разные подходы к решению обратных задач гидроудара.

В работах [Wan08, Лян18] для анализа фактических данных гидроудара, записанных тремя различными датчиками на разных глубинах, используется модель системы «скважина–

перфорация–трещина». Авторы приходят к выводу о том, что динамика давления на всех трёх датчиках полностью описывается только акустическими колебаниями в трубе и между низом трубы и перфорацией. Успешно совмещаются модельные и фактические данные давления высокой дискретизации, включая колебания высокой частоты, возникающие в нижней части скважины. В работе подчёркивается, что, если бы давление фиксировалось не с частотой 100 Гц, а с частотой 0.2 Гц, то не только амплитуда, но и фиксируемая частота фактических колебаний гидроудара была бы совсем другой.

В представительной работе [Car15] используется полная математическая модель системы «скважина–перфорация–трещина». При этом используется электрическая RCI-аналогия для описания перфорации, призабойной зоны пласта (ПЗП) и трещины, модель вынужденных колебаний в стволе решается численно, и подбираются неизвестные параметры R , C , I , из которых выражается, в том числе, и геометрия трещины. В отличие от [Wan08, Ляп18] здесь, напротив, используются данные давления обычной дискретизации (1 Гц), но авторам также успешно удаётся совместить модельные и фактические данные давления.

В работе [Иль17] моделируется гидравлический импеданс для неустановившихся течений в системе скважина–трещина. Также рассматривается электроакустическая аналогия для идентификации параметров собственных колебаний трещины как затухающих гармонических колебаний для восстановления модуля Юнга породы и геометрии трещины. Продолжением этой работы является статья [Бай18], где приводится модель для собственных колебаний трещины ГРП для оценки геометрии трещины.

В работе [Шар20] рассматриваются модель акустических колебаний в скважине, связанной с пластом, реологическая модель трения на стенке скважины и фильтрация по закону Дарси в пласте. Решение для колебаний ищется в виде гармонических собственных колебаний стоячих волн. В работе [Баш25] рассматриваются фактические высокочастотные данные давления закачки, ищется решение, описывающее собственные затухающие гармонические колебания как функцию, в том числе проницаемости пласта и проводимости трещины, а также упоминается, но не описывается метод определения скорости распространения звуковой волны по данным давления и известной конструкции скважины.

Наконец, в последние годы появляются работы, в которых заявляется использование высокочастотных данных давления для анализа потерь давления на трение в трубе и перфорации. В известной работе [Dun23] рассматривается ограничение стандартной методики исследования кривой давления методом «step-down-тест», который не может разделить трения в трубе и на перфорации в случае, если они оба квадратично зависят от расхода. Описывается метод такого разделения с помощью анализа гидроудара акустическим датчиком давления высокой частоты при закачках воды. Упоминается восстановление коэффициента трения по наклону первой «полочки» давления без приведения конкретной формулы. В работе утверждается, что можно проверить полученный коэффициент трения по падению давления в момент остановки насосов, но для приведённого самими авторами примера этого не сделано. Утверждается также, что можно сопоставить полученную модель трения с моделью трения известной жидкости, и это было в работе сделано, но результаты такого сравнения не приведены. В работе [Dun24] показывается, как обрабатывать дополнительные отражения, возникающие в точках изменения диаметра трубы, а также проводится валидация метода восстановления трений в трубах с использованием данных забойного манометра. Показано, как, восстанавливая трения с помощью частичного гидроудара при периодическом сбросе расхода, можно успешно получать информацию о текущем забойном давлении без забойного датчика. В работе [McF25] предлагается, периодически снижая расход, анализируя возникающий при этом гидроудар, восстанавливать и трение в трубе (по наклону кривой восстановления давления), и трение на перфорации (по восстановлению амплитуды первой возвращённой волны), однако методики не раскрываются. В статье также упоминается о закрытой коммерческой модели, с помощью которой по данным давления восстанавливаются и высота, и длина трещины ГРП.

Анализ работ [Dun23, Dun24, McF25] показывает, что в актуальной научной литературе отсутствует описание конкретных методик, с помощью которых можно было бы восстанавливать гидравлические трения в трубах по данным гидроудара; при этом демонстрируется, что это возможно.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГИДРОУДАРА КАК АКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ТРУБЕ

Постановка задачи распространения акустических волн

Рассмотрим одномерное изотермическое течение в насосно-компрессорной трубе постоянного внутреннего радиуса R длиной L . Кривизной трубы по сравнению с её длиной можно пренебречь, поэтому будем использовать одномерную систему координат, связанную с осью трубы. Материал стенок трубы будем считать неэластичным.

В левый конец трубы, называемый устьем, подаётся насосом с линейной скоростью v_0 жидкость плотностью ρ и сжимаемостью β . Жидкость движется по трубе и через отверстия интервала перфорации на правом конце поступает в резервуар в виде открытой в породе трещины. Рассмотрим функции скорости $V(x, t)$ и давления $P(x, t)$ в каждой точке трубы в каждый момент времени. Ось x направлена от устья к забою, геометрия трубы описывается зенитным углом (углом между осью скважины и вертикалью) $\alpha(x)$ или функцией $h_{tvd}(x)$, сопоставляющей истинную вертикальную глубину h_{tvd} измеренной глубине вдоль ствола x .

Движению жидкости по трубе препятствует вязкое трение. Потери давления на трение, приведённые к единице длины ствола, будем описывать с помощью степенной зависимости от скорости течения V в виде $F \cdot V^f$. При проходе через отверстия перфорации жидкость также испытывает трение, приводящее к дополнительному перепаду давления $k_{\text{perf}} V^2$, учитываемому в граничных условиях. В этих условиях динамику давления и скорости в слабосжимаемой жидкости можно описывать системой (в разных постановках: [Ghi05, Car15, Dun23]):

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x} - F \text{sign}(V) V^f + \rho g \cos(\alpha), \\ \frac{\partial P}{\partial t} = -\frac{1}{\beta} \frac{\partial V}{\partial x}. \end{cases} \quad (1)$$

Во многих источниках член $\rho g \cos(\alpha)$, определяющий вклад гидростатического давления для ускорения свободного падения g , опускают, рассматривая в линейном приближении не полное давление $P(x, t)$, а его разницу с гидростатическим давлением на соответствующей глубине.

Граничные и начальные условия

На устье насосы поддерживают требуемую скорость закачки $v(t)$, которая в задаче будет левым граничным условием. На забое труба через отверстия перфорации соединена с трещиной, объём которой будем считать достаточно большим, чтобы поддерживать постоянное давление P_0 , которое вместе с перепадом давления на отверстиях перфорации будет определять правое граничное условие, следовательно граничные условия для задачи таковы:

$$\begin{cases} V(0, t) = v(t), \\ P(L, t) = P_0 + k_{\text{perf}} \text{sign}(V(L, t)) V(L, t)^2. \end{cases} \quad (2)$$

Будем считать, что в начальный рассматриваемый момент времени $V(x, 0) = v_0$ и в трубе имеет место установившийся режим течения, а следовательно, начальные условия таковы:

$$\begin{cases} V(x, 0) = v_0, \\ P(x, 0) = P_0 + k_{\text{perf}} v_0^2 + (L - x)F v_0^f - \rho g (h_{tvd}(L) - h_{tvd}(x)). \end{cases} \quad (3)$$

Для моделирования гидроудара будем считать, что в момент времени $t = 0$ начинается процесс отключения насосов. Часто при решении задачи расчёта параметров гидроудара рас-

сматривается разрыв скорости, соответствующий мгновенной остановке насоса или мгновенному закрытию задвижки, и рассматривается задача распада разрыва. В реальных условиях мгновенная остановка насосов технически невозможна, и этот переходный процесс будем моделировать, задавая функцию $v(t)$ в виде (непрерывной и дифференцируемой сигмоиды фиксированной амплитуды Δv_0 и длительности Δt_{v_0} (рис. 2).

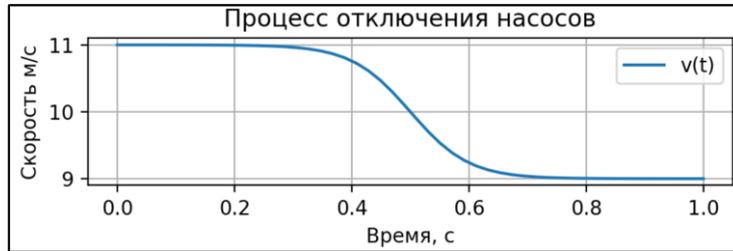


Рис. 2 Функция $v(t)$ левого граничного условия на скорость

Численное решение

Система (1) с условиями (2) и (3) описывает распространение акустических волн скоростью $c_0 = (\rho\beta)^{-0.5}$. Для её решения в различных начальных и граничных условиях использовалась явная численная схема с контролем условия Куранта. Исходные данные, использованные в решении, приведены в табл. 1 и соответствуют (кроме длительности) типовому ГРП.

Таблица 1

Входные данные для расчёта

Величина	Название	Значение	Единицы измерения
L	Длина трубы	2500	м
T	Время моделирования	15	с
ρ	Плотность жидкости	1000	кг/м ³
β	Сжимаемость жидкости	$1/(2.2 \times 10^9)$	1/Па
F	Коэффициент для модели трения в трубе	70	$\frac{\text{Па}}{\text{м}} \left(\frac{\text{с}}{\text{м}}\right)^f$
f	Степень для модели трения	1.5	ед
k_{perf}	Коэффициент для модели трения в перфорации	3.0×10^4	$\text{Па} \left(\frac{\text{с}}{\text{м}}\right)^2$
dx	Дискретизация численной схемы по пространству	0.5	м
dt	Дискретизация численной схемы по времени	0.0001	с
v_0	Начальная постоянная скорость закачки	11	м/с
Δv_0	Амплитуда падения скорости закачки	11	м/с
Δt_{v_0}	Длительность переходного процесса закачки	1.0	с
P_0	Постоянное давление в трещине	48	МПа

Полученная динамика давления и скорости на устье и забое приведена на рис. 3. Величина падения давления в первом фронте соответствует формуле Жуковского $\rho c_0 \Delta v_0$, затем давление продолжает падать с динамикой, близкой к линейной. При этом волна давления ещё не достигла забоя и не вернулась, поэтому на данном этапе характер поведения давления не зависит от конструкции трубы на забое, свойств перфорации, породы и трещины.

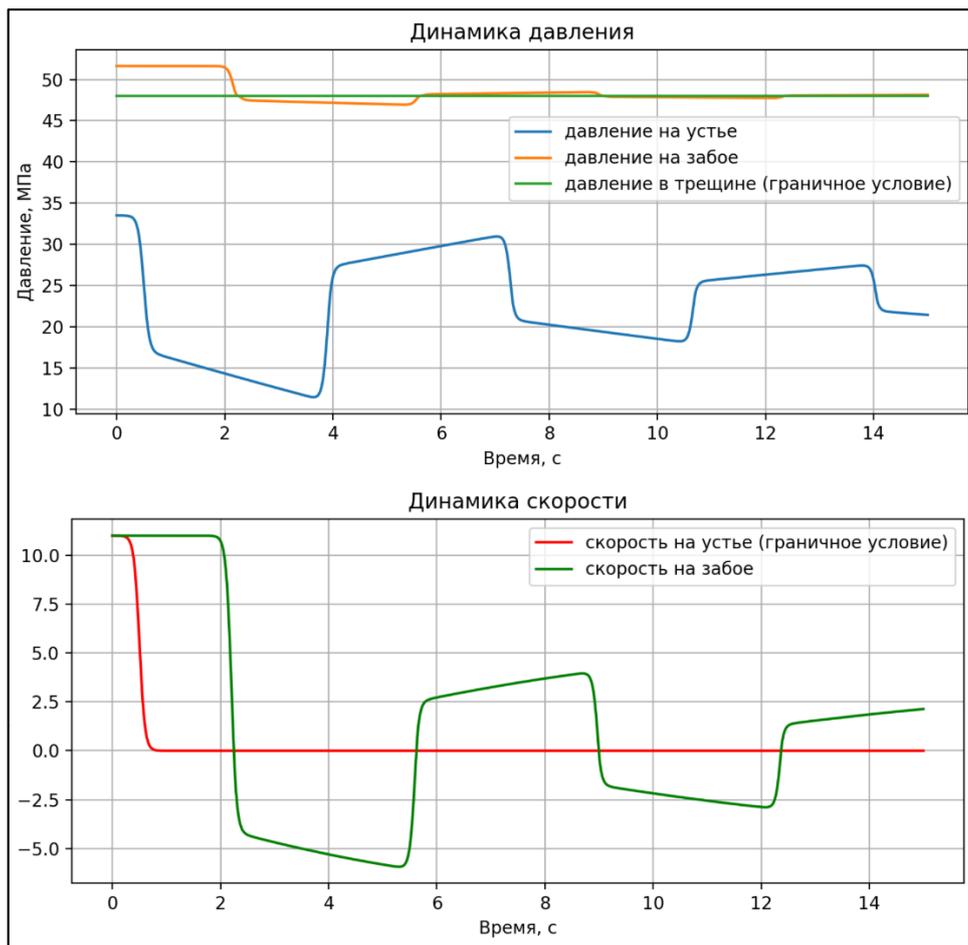


Рис. 3 Динамика скорости и давления при полной остановке закачки

Давление на устье демонстрирует ожидаемые затухающие колебания с периодом, соответствующим четырём пробегам волны от устья до забоя. Измерение периода колебаний при известной плотности и сжимаемости жидкости позволяет решать обратную задачу определения расстояния до источника отражения волны, что для чёткой регистрируемой волновой картины не требует спектрального анализа.

Характер колебаний существенно отличается от гармонического: они представляют собой последовательную смену «полочек» (близких к линейным участкам), которые переходят друг в друга, а характер и скорость переходного процесса определяются динамикой отключения насосов $v(t)$. Колебания постепенно затухают. Скорость затухания тем больше, чем больше коэффициенты и показатели модели гидравлического трения F , f и k_{perf} .

Время переходного процесса на скорость (время отключения насосов) сильно влияет на характер получаемых колебаний, как показано на рис. 4. При резком скачке скорости на устье фронты всех волн получаются крутыми, а «полочки» между ними – близкими к линейным. По мере приближения времени отключения насосов Δt_{v0} к критерию Жуковского (времени путешествия волны от устья до забоя и обратно, 3.4 с для приведённого примера), не только фронты размываются, но и сами «полочки» теряют линейный характер. Видно, что для длительного (10 с) процесса отключения насосов получаемая динамика устьевого давления становится всё более похожей на то, что в индустрии ГРП принято называть «затухающей синусоидой хаммер-эффекта».

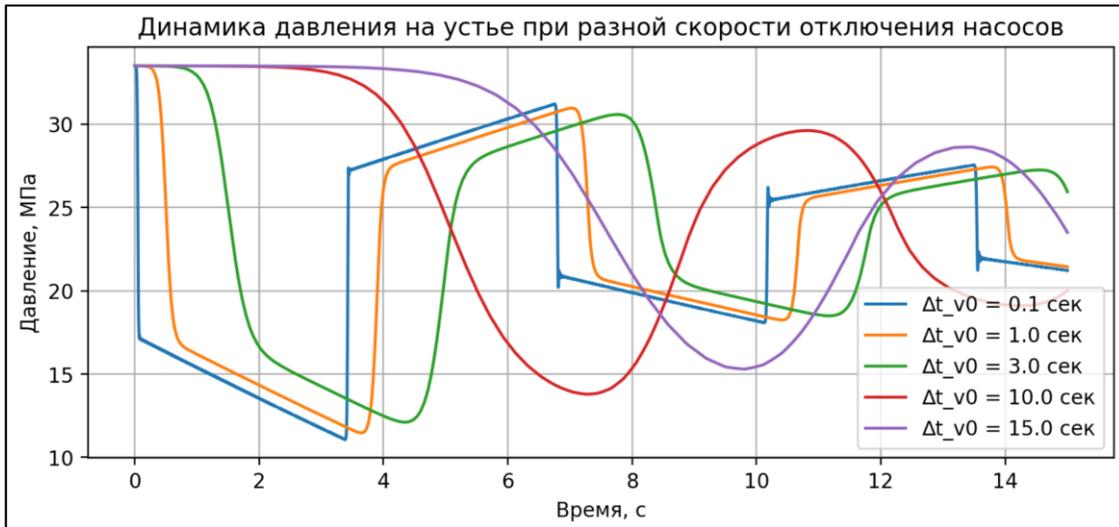


Рис. 4 Влияние длительности переходного процесса

При этом некорректно говорить о гармонических колебаниях устьевого давления как проявлении собственных колебаний трещины. Кроме этого, такая «затухающая синусоида» не может нести никакой информации о породе, в которой находится трещина, или о её геометрических свойствах, потому что они в данной модели отсутствуют. Эта «затухающая синусоида» является следствием сложной суперпозиции волн при длительном переходном процессе, который эти волны вызывает.

Наличие в трубе сегментов различного диаметра (и различной скоростью движения в соответствии с законом Бернулли), а также наличие нескольких открытых трещин усложняет отражённую волновую картину и затрудняет решение обратных задач.

Влияние гидравлического трения на динамику давления

Скорость изменения давления между приходами волновых фронтов (наблюдаемые «полочки» давления) зависит от трения жидкости в трубе, как показано на рис. 5.

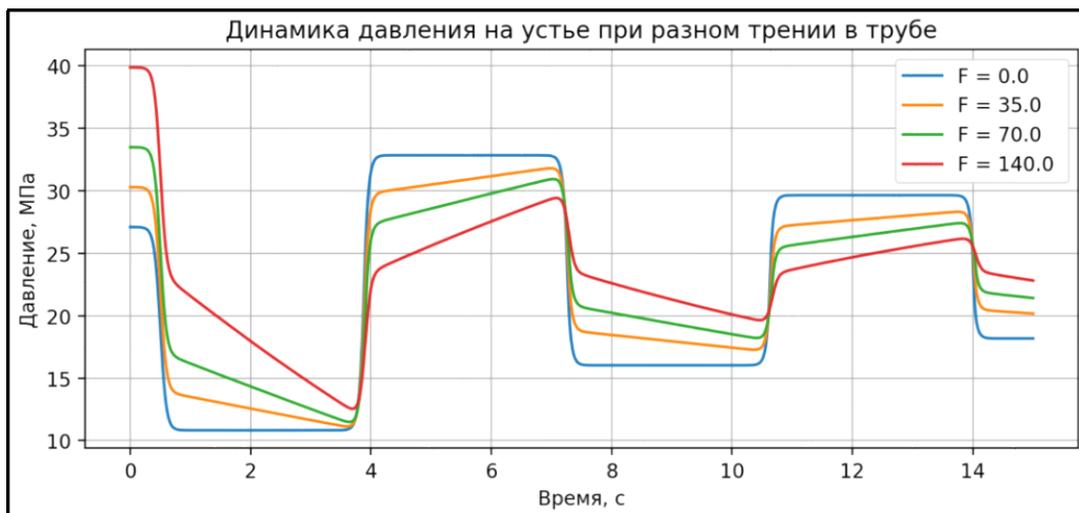


Рис. 5 Динамика устьевого давления при разных коэффициентах трения в трубе

В отсутствие такого трения наклон «полочек» будет нулевым, и он будет тем больше, чем больше трение по величине. Высокие по относительной величине трения, а также высокий показатель степени у модели трения приводят к существенной нелинейности «полочек» давления между приходами волновых фронтов (наряду с ускоренным затуханием колебаний).

Так, на рис. 6 видно, что при показателе степени у модели трения, близком к 2 (соответствует маловязкой жидкости, текущей в турбулентном режиме, например, воде), линейность «полочек» нарушается, особенно начиная со второго фронта. В этих условиях потери давления на трение по всей длине трубы сравнимы или превосходят перепад давления гидроудара по формуле Жуковского, что может быть выражено критерием подобия K в формуле (4), большим единицы.

$$K = \frac{LFv_0^f}{\rho c \Delta v_0} \quad (4)$$

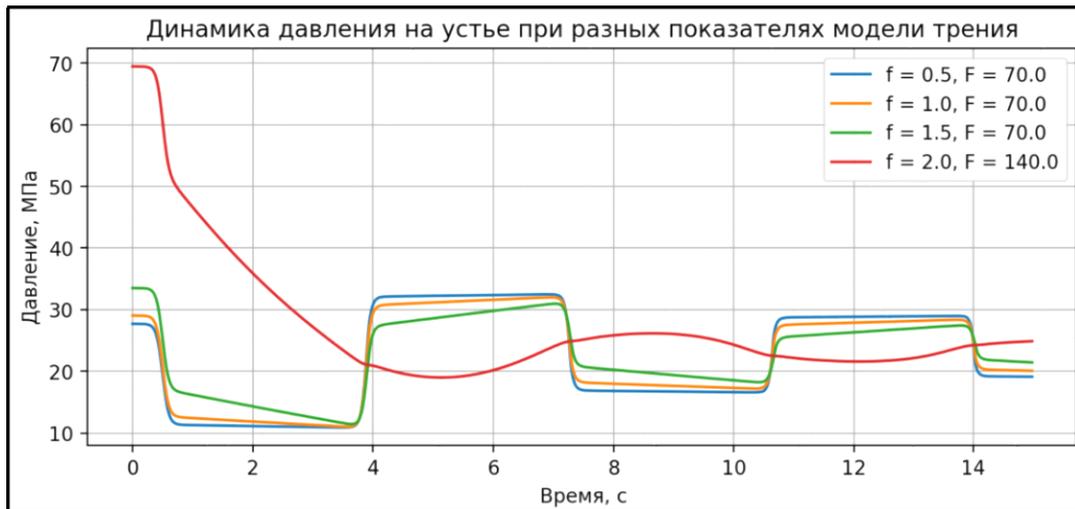


Рис. 6 Динамика устьевого давления при разных показателях степени модели трения в трубе

Трение на перфорации также ожидается влияет на динамику давления. На рис. 7 приведена динамика устьевого давления при различных коэффициентах k_{perf} , при этом для удобства сравнения приведено отношение изменения устьевого давления к давлению гидроудара $\rho c \Delta v_0$. Видно, что трение на перфорации ускоряет затухание амплитуды колебаний, но не влияет на ту часть кривой давления, которая описывает время до прихода отражённой волны.

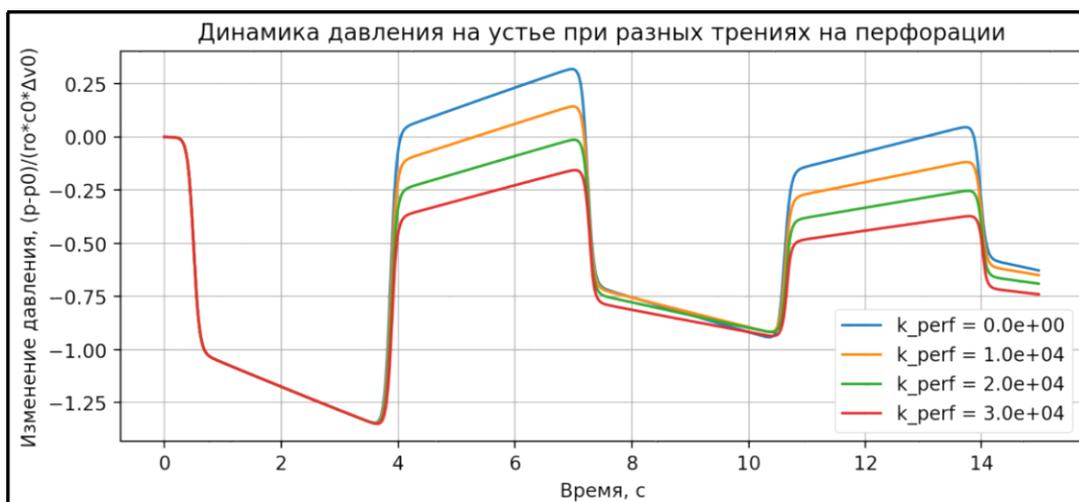


Рис. 7 Динамика устьевого давления при разных трениях на перфорации

Следовательно, динамика устьевого давления при соблюдении условий задачи в такой постановке может стать источником информации о гидравлическом трении в трубе и на перфорации.

ОБРАТНЫЕ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛИ ТРЕНИЯ

Численный и феноменологический подход

В численных экспериментах предыдущего раздела было показано, что наклон первой «полочки» является самым удобным индикатором для определения трения в трубе. Используя численную схему для решения прямой задачи, фактические измеренные данные давления, можно сформулировать обратную задачу, поставив целью определение таких параметров модели трения в трубе, которые минимизируют целевую функцию. Такой целевой мерой может стать невязка во временном (сумма квадратов разницы модельных и фактических данных) или частотном (разница спектров модельного и фактического сигнала). Используя любой подходящий метод оптимизации произвольно заданной целевой функции, можно для имеющейся динамики устьевого давления найти параметры модели трения, которые наилучшим образом ей соответствуют. Именно такой подход применяется ко всей динамике давления в процессе закачки в работе [Мак24].

Рассмотрим альтернативный феноменологический подход, использующий анализ размерностей. Наклон «полочки» устьевого давления имеет размерность МПа/с. Ранее мы показали, что этот наклон является следствием гидравлического трения в части трубы, находящейся между устьем и фронтом ушедшей к забою волны. Следовательно, можно предположить, что этот наклон может быть связан с градиентом потерь давления на трение, имеющим размерность МПа/м. Используя анализ размерностей можно предположить, что эти две величины, МПа/с и МПа/м, могут быть связаны множителем, который должен иметь в этом случае размерность м/с. Естественно предположить, что такой скоростью может быть скорость звука.

Численные эксперименты показывают, что в рассматриваемых условиях с точностью 90–99 % можно использовать следующую оценку для градиента давления (его части, обусловленной трением):

$$F v_0 f = - \frac{\partial P}{\partial t} \cdot \frac{1}{c_0/2}. \quad (5)$$

При этом параметры используемой степенной модели гидравлического трения F и f остаются неразделёнными: фактические данные позволяют оценить только сам градиент давления трения для начальной скорости v_0 . Если повторить эксперимент с остановкой насосов для одной и той же жидкости, но с разным начальным расходом установившегося режима, можно получить градиент давления для разных скоростей и восстановить неизвестные F и f , которые можно будет использовать для прогноза трения при других расходах. Однако часто производить остановку закачки нецелесообразно по технологическим причинам: в случае, если в трубе находится высоковязкая жидкость (сшитый гель), к тому же потенциально обладающая начальным сдвиговым напряжением, повторная её мобилизация после остановки может оказаться невозможной. В связи с этим имеет смысл рассмотреть модификацию исходной задачи, в которой левое граничное условие $v(t)$ описывает не полную остановку, а резкое снижение расхода с величины v_0 до величины $v_0 - \Delta v_0$ (возможно с последующим восстановлением). На рис. 8 приведены результаты моделирования гидроудара при снижении скорости закачки на 18 %.

Численные эксперименты показывают, что в рассматриваемых условиях с удовлетворительной точностью можно использовать следующую оценку для градиента давления (его части, обусловленной трением):

$$F v_0 f = - \frac{\partial P}{\partial t} \cdot \frac{1}{c_0/2} \cdot \frac{1}{1 - (1 - \frac{\Delta v_0}{v_0})^f}. \quad (6)$$

Для случая полной остановки закачки $\Delta v_0 = v_0$, и формула (6) сводится к формуле (5). Для случая ламинарного течения ньютоновской жидкости, когда в соответствии с законом Пуазейля $f = 1$, формула (6) также упрощается:

$$F v_0 = -\frac{\partial P}{\partial t} \cdot \frac{1}{c_0/2} \cdot \frac{v_0}{\Delta v_0} \quad (7)$$

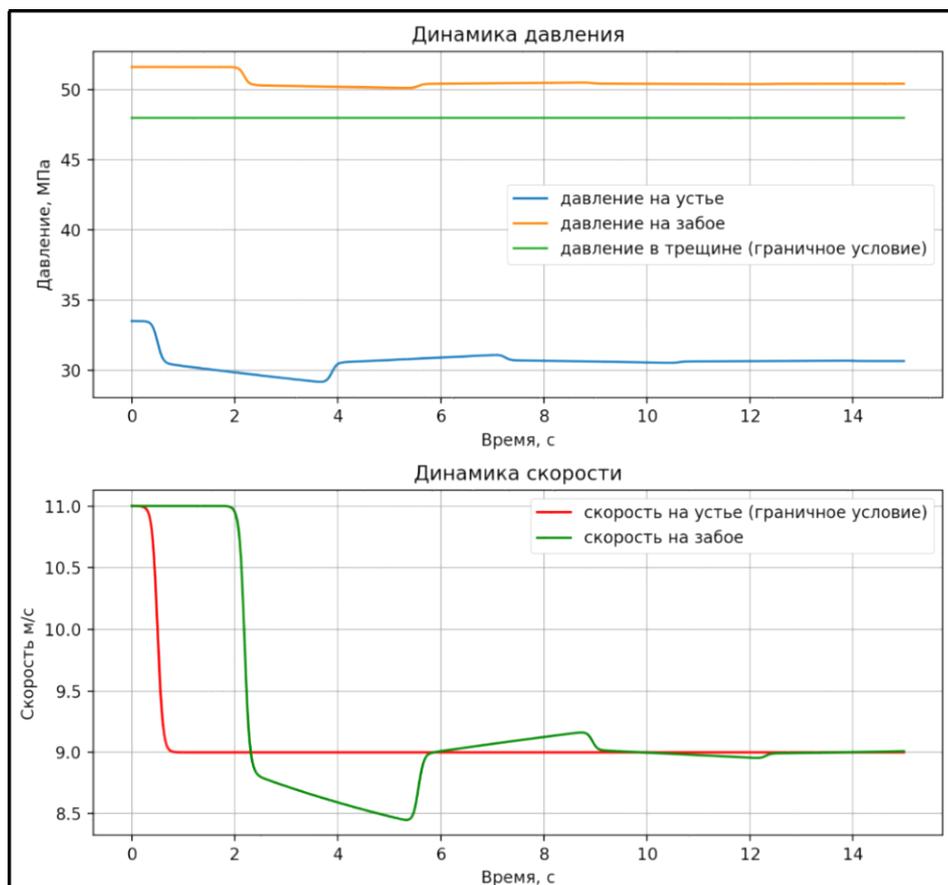


Рис. 8 Динамика скорости и давления при снижении скорости закачки

Основной недостаток формулы (6) заключается в том, что она содержит f в правой части, а значит, в этом случае для интерпретации динамики давления требуется заранее знать показатель степени в модели трения для закачиваемой жидкости. В этом случае для известного f можно непосредственно получить и F .

Валидация на фактических данных

Рассмотрим типовую операцию ГРП длительностью более 2 часов, на стадии продавки которой, после окончания подачи пропанта, труба заполняется линейным гелем, и затем закачка останавливается (рис. 9). Фактические данные, включая данные устьевого давления, записаны на станции управления ГРП с частотой 1 Гц. Данных забойного манометра в данной закачке нет.

Полные потери давления на трение в процессе закачки могут быть оценены как перепад между давлением закачки перед остановкой насосов и стабилизировавшимся устьевым давлением после окончания колебаний гидроудара. В этой закачке они составили 10.65 МПа. Они включают в себя потери давления на трение в трубе и на перфорациях.

Длительность заметных колебаний гидроудара после остановки насосов занимает несколько десятков секунд, и для их анализа требуются данные давления повышенной частоты (50–100 Гц). Анализ приведён на рис. 10. Наклон первой «полочки» давления составил -1.89 МПа/с. Скорость звука в условиях закачки оценена в 1480 м/с. Период колебаний гидроудара составил 9.75 с, что в соответствии с оценкой скорости звука даёт $9.75 \times 1480 / 4 = 3608$ м от устья до трещины.

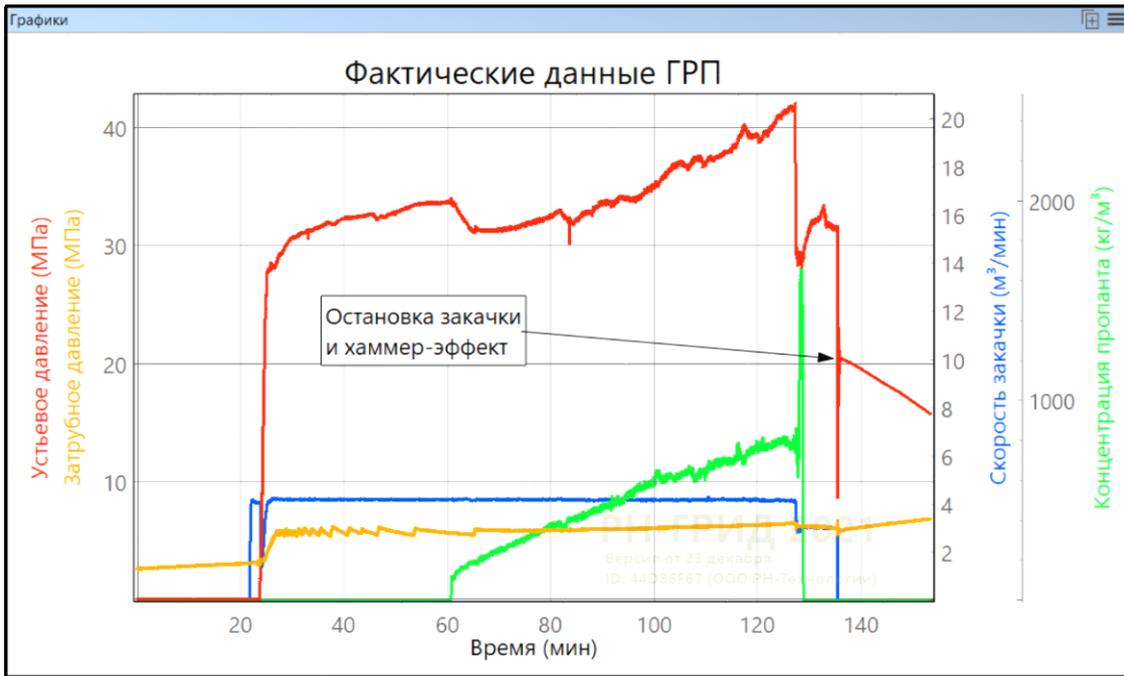


Рис. 9 Типовая операция ГРП, фактические данные давления, расхода и концентрации



Рис. 10 Анализ гидроудара после остановки насосов

Согласно формуле (5), оценка градиента потерь давления на трение составляет $1.89 \times 10^6 / (1480/2) = 2554$ Па/м. Следовательно, оценка для потерь давления на трение в трубе составляет $2554 \times 3608 / 10^6 = 9.2$ МПа, и оценка потерь на трение в перфорации, определяемая разницей полного трения и трения в трубе, составляет $10.65 - 9.2 = 1.45$ МПа. Эта оценка соответствует ожидаемым потерям в перфорации, поэтому можно считать, что оценка трения в трубе по формуле (5) хорошо согласуется с фактическими данными, а данный метод можно использовать не только для оценки трения в трубе, но и для оценки трения в перфорации.

Валидация предложенной методики проводится в симуляторе ГРП «РН-ГРИД» ([Ахт18]), как показано на рис. 11.

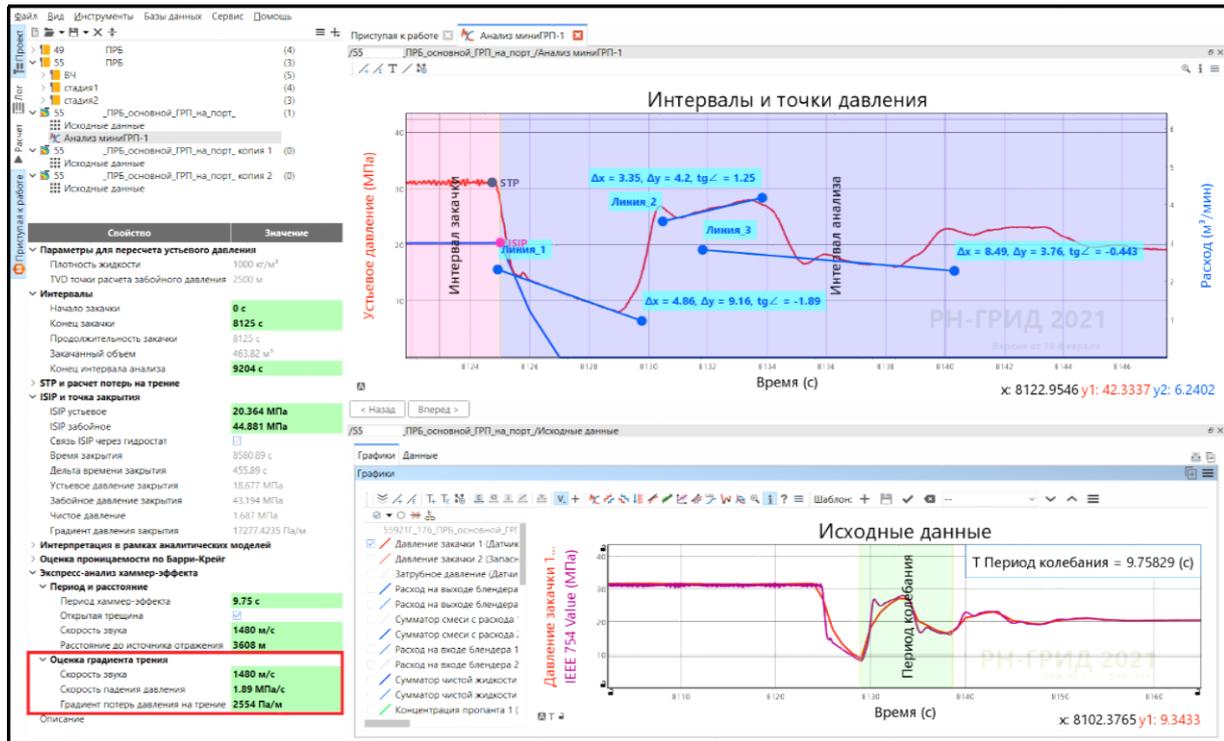


Рис. 11 Валидация методики в симуляторе ГРП «РН-ГРИД»

Полученные результаты говорят о том, что фактически наблюдавшаяся в этой закачке волновая картина полностью описывается моделью акустических колебаний в стволе без привлечения сложной модели собственных колебаний открытой трещины.

Проблема некондиционных фактических данных для решения обратных задач

Процесс прохождения волны гидроудара занимает считанные секунды, поэтому принято (справедливо) считать, что его анализ требует наличия данных давления повышенной частоты. Если не рассматривать анализ вторичных волн, возникающих из-за множественных отражений между участками составной трубы (например, наличие подпакерного пространства большего диаметра, но кратно меньшей протяжённости, где формируются волны кратно более высокой частоты, как показано в статье [Wan08]), то для анализа колебаний главной частоты гидроудара достаточно замеров давления частотой 20–100 Гц.

На рис. 12 показаны совмещённые графики устьевого давления, построенные по данным, собираемым с разных манометров, частотой 1 и 50 Гц. Графики показывают, что стандартный манометр 1 Гц, во-первых, сильно сглаживает реальную динамику давления, не успевая «поймать» резкий фронт волны, во-вторых, запаздывает или упреждает реальные события (скорее всего, это артефакт обработки данных контроллером станции управления), в-третьих, снижает видимую амплитуду колебаний (что подтверждается в [Wan08]). Данные 1 Гц могут не показывать «полочку» давления, даже если она есть. С другой стороны, совмещение данных 1 и 50 Гц на рис. 12 показывает, что для анализа главной частоты колебаний может быть достаточно данных 1 Гц. При этом измерять периоды по данным 1 Гц, лучше опираясь не на центры «горбов», а на выраженные точки начала волнового фронта (точки 1 и 2 на рис. 12).

Оценка трения в трубе по формуле (5) требует наличия явно выраженной «полочки», линейного участка на фактическом графике давления после остановки закачки. Для операции ГРП, рассматриваемой в этой статье, такие «полочки» присутствовали только на 1 из 5 закачек. На рис. 13 приведены графики давления (частоты 50 Гц) на 3 других закачках через ту же трубу (для удобства графики совмещены по горизонтали и вертикали). Видно, что на них отсутствуют «полочки», пригодные для анализа по формуле (4), а имеющаяся картина гидроудара существенно осложнена.

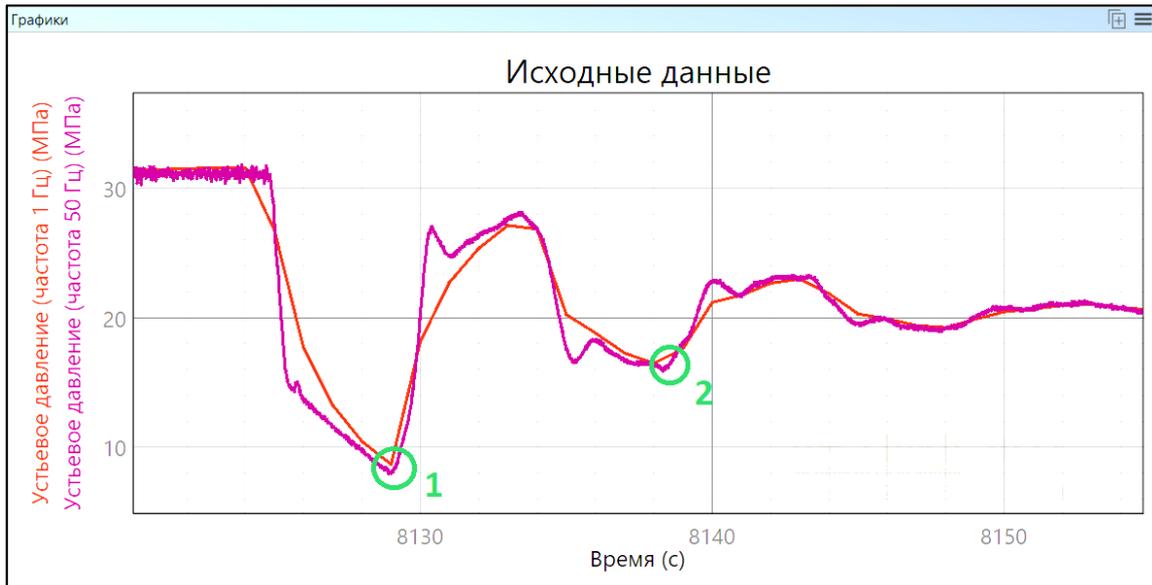


Рис. 12 Совмещение замеров давления частоты 1 и 50 Гц

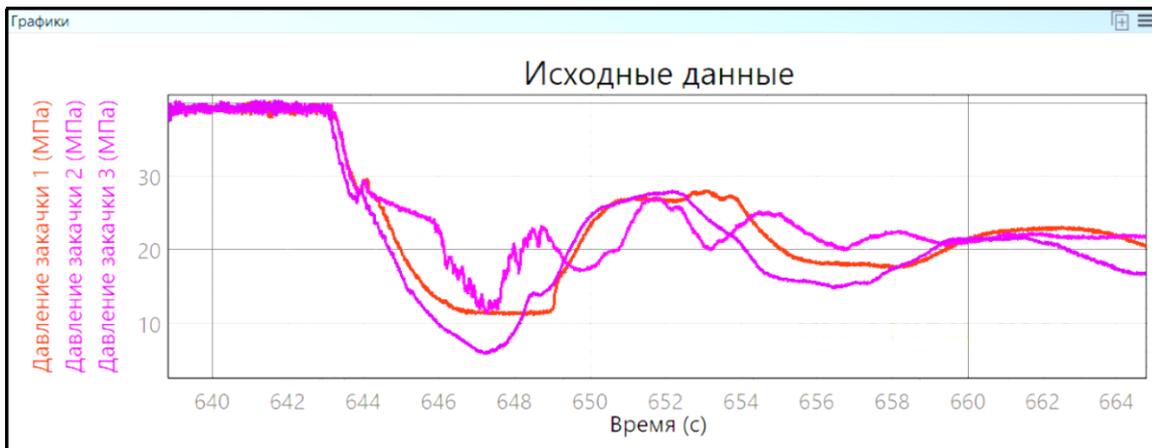


Рис. 13 Колебания гидроудара без выраженных «полочек»

Одной из возможных причин такого поведения может быть то, что в этой операции выполнялся повторный ГРП на горизонтальной скважине, а не первичный ГРП на новой скважине. При этом конструкция скважины такова, что её длинный горизонтальный ствол пересекают созданные ранее и закреплённые пропантом трещины, создающие сложную картину отражения, не соответствующую постановке задачи.

Другой причиной этого, как было показано в предыдущей главе, может быть протяжённый процесс отключения насосов, формирующий гидроудар. Кроме этого, даже при наличии данных давления высокой частоты, данные по расходу, как правило, фиксируются с помощью «медленных» датчиков (магнитных или турбинных расходомеров). Отсутствие детальной информации о скорости закачки не позволяет корректно решать обратные задачи восстановления волновой картины гидроудара.

Частичный сброс расхода не наблюдался в использованных для анализа фактических данных. С одной стороны, он может позволить прямо в процессе закачки, не прерывая технологического процесса, оценивать потери давления на гидравлическое трение в трубе и на перфорациях, а значит, получать и актуальную модель трения для жидкости, и онлайн-оценку забойного давления. С другой стороны, при частичном сбросе расхода, согласно критерию подобия (4), силы трения будут превалировать над силами инерции, и волновая картина, пригодная для анализа трения, может наблюдаться только для маловязких жидкостей, использовавшихся

в работах [Dun24]. В связи с растущей долей операций ГРП на маловязких жидкостях, представляется актуальными проведение опытно-промышленных испытаний по частичному гидроудару для анализа трения и развитие методов анализа его результатов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Полученные в данной работе результаты позволяют сделать следующие выводы.

- Модель гидроудара как акустических колебаний в трубе позволяет воспроизводить характер наблюдаемых фактических колебаний давления гидроудара, их частоту и амплитуду, а также особенности волновой картины.
- Модель гидравлического трения жидкости проявляет себя в конкретных артефактах волновой картины (наклонные «полочки» давления между фронтами волн, снижение амплитуды возвращённой волны), что позволяет решать обратные задачи восстановления модели трения по первому полупериоду волны. Повышение точности возможно в случае использования кондиционных данных со всех зарегистрированных периодов гидроудара.
- Приведены новые соотношения, позволяющие по динамике давления с точностью 90–99 % восстанавливать градиент гидравлического трения. Эти соотношения эффективны для случая полной остановки насосов, а также для гидроудара при частичной остановке и показателе степени модели трения, близкой к 1 (ламинарное течение).
- Анализ гидроудара по данным низкой (1 Гц) частоты позволяет оценивать расстояние до события при условии наличия данных о плотности и сжимаемости жидкости или возможности калибровки скорости звука по волновой картине отражения от источника с известным расстоянием (первый порт ГРП на скважине с несколькими портами). Для анализа трения необходимы фактические данные давления частотой не менее 20–100 Гц.
- Показано, что динамика давления при гидроударе зависит от режима сброса скорости закачки (отключения насосов), который, как правило, не известен (фактических данных по расходу высокой частоты нет). Кроме этого, мгновенная остановка закачки (задвижкой) невозможна в силу особенностей технологического процесса операции ГРП, а большинство рассмотренных литературных источников используют именно такое предположение.
- Анализ фактических данных давления показывает, что в тех случаях, когда насосы останавливались достаточно быстро для формирования чётких фронтов волн гидроудара, оценка модели трения совместима с другими фактическими данными, которые могут быть использованы для оценки модели трения.
- Отсутствие «полочек» на фактических данных давления может быть вызвано преобладанием сил трения над силами инерции, сложной суперпозицией волн, отражённых от нескольких объектов, а также медленным отключением насосов. В этом случае для оценки трения жидкостей целесообразно использовать методы, приведённые в статье [Мак24].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ REFERENCES

- | | | |
|---------|---|---|
| [Жук49] | Жуковский Н. Е. О гидравлическом ударе в водопроводных трубах // Собр. соч.: в 7 т. М.; Л.: Гостехиздат, 1949. Т. 3: Гидравлика. Прикладная механика. С. 7–152. | Zhukovsky, N. E. On hydraulic shock in water pipes // Coll' Works: in 7 volumes. Gostekhizdat, 1949. V. 3: Hydraulics. Applied mechanics. P. 7-152. (In Russian). |
| [Pat98] | Patzek T. W., Silin D. B. Lossy transmission line model of hydrofractured well dynamics // SPE-46195-MS. 1998. DOI: 10.2118/46195-MS . | Patzek T. W., Silin D. B. Lossy transmission line model of hydrofractured well dynamics // SPE-46195-MS. 1998. DOI: 10.2118/46195-MS . |
| [Ghi05] | Ghidaoui M. S., Zhao M., et al. (2005). A review of water hammer theory and practice // Applied Mechanics Reviews. 58(1). 49–76. DOI: 10.1115/1.1828037 . | Ghidaoui M. S., Zhao M., et al. (2005). A review of water hammer theory and practice // Applied Mechanics Reviews, 58(1), 49-76. DOI: 10.1115/1.1828037 . |
| [Wan08] | Wang X., Hovem K., Quan Y. (2008). Water hammer effects on water injection well performance and longevity // SPE Western Regional and Pacific Section AAPG Joint Meeting, 29-31 March 2008, Bakersfield, California. Society of Petroleum Engineers. DOI: 10.2118/112282-MS . | Wang X., Hovem K., Quan Y. (2008). Water hammer effects on water injection well performance and longevity // SPE Western Regional and Pacific Section AAPG Joint Meeting, 29-31 March 2008, Bakersfield, California. Society of Petroleum Engineers. DOI: 10.2118/112282-MS . |

- [Car15] Carey M. A., Mondal S., Sharma M. M. (2015). Analysis of Water Hammer Signatures for Fracture Diagnostics. Society of Petroleum Engineers. DOI: [10.2118/174866-MS](https://doi.org/10.2118/174866-MS). Presented at the SPE/CSUR Unconventional Resources Conference, Calgary, Alberta, Canada, September 2015.
- [Иль17] Ильясов А. М. Новый подход к определению геометрических размеров трещины гидроразрыва пласта // Тр. Ин-та механики им. Р. Р. Мавлютова УНЦ РАН. 2017. Т. 12, № 1. С. 126–134. EDN: [ZXMJYL](https://doi.org/10.2118/174866-MS).
- [Ляп18] Ляпидевский В. Ю., Неверов В. В., Кривцов А. М. Математическая модель гидроудара в вертикальной скважине // Сибирские электронные математические известия. 2018. Т. 15. С. 1687–1696. EDN: [YXSPBB](https://doi.org/10.2118/174866-MS).
- [Бай18] Байков В. А., Булгакова Г. Т. и др. К оценке геометрических параметров трещины гидроразрыва пласта // Механика жидкости и газа. 2018. № 5. С. 64–75. EDN: [YNQJYT](https://doi.org/10.2118/174866-MS).
- [Шар20] Шагапов В. Ш., Башмаков Р. А., Чиглинцева А. С. Затухающие собственные колебания жидкости в скважине, сообщающейся с пластом // Прикладная механика и техническая физика. 2020. Т. 61, № 4. С. 136–146. EDN: [SYVRJT](https://doi.org/10.2118/174866-MS).
- [Dun23] Dunham E. M., Zhang J., Moos D. Constraints on pipe friction and perforation cluster efficiency from water hammer analysis // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition. The Woodlands, Texas, USA: Society of Petroleum Engineers, 2023. DOI: [10.2118/212337-MS](https://doi.org/10.2118/212337-MS).
- [Dun24] Dunham E. M. Building well and fluid-specific pipe friction curves, monitoring perforation cluster efficiency during stimulation, and measuring near-wellbore tortuosity using acoustic friction analysis // Unconventional Resources Technology Conference (URTeC). 2024. DOI: [10.15530/urtec-2024-4044718](https://doi.org/10.15530/urtec-2024-4044718).
- [Мак24] Макеев Г. А., Фаттахова А. Ф. Анализ трений в НКТ при ГРП по данным устьевого и забойного манометра // PROneft. Профессионально о нефти. 2024;9(1):95-105. EDN: [XDLWPK](https://doi.org/10.15530/urtec-2024-4044718).
- [McF25] McFall, Riley, De La Garza, Juan, Muhammad Khan. Using real-time acoustic friction analysis for completions design evaluation // Paper presented at the SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conf., Houston, Texas, USA, June 2025. DOI: [10.15530/urtec-2025-4264923](https://doi.org/10.15530/urtec-2025-4264923).
- [Баш25] Башмаков Р. А., Махота А. А. и др. Анализ колебаний давления при гидроударе и определение характеристик пласта и трещины гидроразрыва пласта // Вести газовой науки. 2025. № 3 (63). С. 89–97. EDN: [AIAZDV](https://doi.org/10.15530/urtec-2025-4264923).
- [Ахт18] Ахтямов А. А., Макеев Г. А. и др. Корпоративный симулятор гидроразрыва пласта «РН-GRID»: от программной реализации к промышленному внедрению // Нефтяное хозяйство. 2018. № 5. С. 94–97. EDN: [XNSWYH](https://doi.org/10.15530/urtec-2025-4264923).
- Carey M. A., Mondal S., Sharma M. M. (2015). Analysis of Water Hammer Signatures for Fracture Diagnostics. Society of Petroleum Engineers. DOI: [10.2118/174866-MS](https://doi.org/10.2118/174866-MS). Presented at the SPE/CSUR Unconventional Resources Conference, Calgary, Alberta, Canada, September 2015.
- Ilyasov A. M. New approach to determining the geometric dimensions of a hydraulic fracturing crack // Proc. R. R. Mavlyutov Inst. of Mechanics. 2017. Vol. 12, No. 1. P. 126-134. EDN: [ZXMJYL](https://doi.org/10.2118/174866-MS). (In Russian).
- Lyapidevsky V. Yu., Neverov V. V., Krivtsov A. M. Mathematical model of a hydraulic shock in a vertical well // Siberian Electronic Mathematical News. 2018. Vol. 15. Pp. 1687–1696. EDN: [YXSPBB](https://doi.org/10.2118/174866-MS). (In Russian).
- Baykov V. A., Bulgakova G. T., et al. On the assessment of the geometric parameters of a hydraulic fracturing crack // Mechanics of Liquids and Gases. 2018. No. 5. P. 64-75. EDN: [YNQJYT](https://doi.org/10.2118/174866-MS). (In Russian).
- Shagapov V. Sh., Bashmakov R. A., Chiglintseva A. S. Damped natural oscillations of a fluid in a well communicating with a formation // Applied Mechanics and Technical Physics. 2020. Vol. 61, No. 4. P. 136-146. EDN: [SYVRJT](https://doi.org/10.2118/174866-MS). (In Russian).
- Dunham E. M., Zhang J., Moos D. Constraints on pipe friction and perforation cluster efficiency from water hammer analysis // SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference and Exhibition. The Woodlands, Texas, USA: Society of Petroleum Engineers, 2023. DOI: [10.2118/212337-MS](https://doi.org/10.2118/212337-MS).
- Dunham E. M. Building well and fluid-specific pipe friction curves, monitoring perforation cluster efficiency during stimulation, and measuring near-wellbore tortuosity using acoustic friction analysis // Unconventional Resources Technology Conference (URTeC). 2024. DOI: [10.15530/urtec-2024-4044718](https://doi.org/10.15530/urtec-2024-4044718).
- Makeev G. A., Fattakhova A. F. Friction pressure loss analysis on typical hydraulic fracturing data // PROneft. Professionally about Oil. 2024;9(1):95-105. (In Russian). EDN: [XDLWPK](https://doi.org/10.15530/urtec-2024-4044718).
- McFall, Riley, De La Garza, Juan, Muhammad Khan. "Using real-time acoustic friction analysis for completions design evaluation". Paper presented at the SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conf., Houston, Texas, USA, June 2025. DOI: [10.15530/urtec-2025-4264923](https://doi.org/10.15530/urtec-2025-4264923).
- Bashmakov R. A., Makhota A. A., et al. Analysis of pressure fluctuations during hydraulic shock and determination of formation and hydraulic fracturing fracture characteristics // Gas Science News. 2025. No. 3 (63). P. 89-97. EDN: [AIAZDV](https://doi.org/10.15530/urtec-2025-4264923). (In Russian).
- Akhtyamov A. A., Makeev G. A., et al. Corporate hydraulic fracturing simulator "RN-GRID": from software implementation to industrial implementation // Oil Industry. 2018. No. 5, pp. 94–97. EDN: [XNSWYH](https://doi.org/10.15530/urtec-2025-4264923). (In Russian).

ОБ АВТОРЕ | ABOUT THE AUTHOR

МАКЕЕВ Григорий Анатольевич
 ООО «РН-Технологии», Россия.
grigorym@gmail.com
 ORCID: [0009-0009-6947-8671](https://orcid.org/0009-0009-6947-8671).
 Старший эксперт.
 Канд. техн. наук, доцент.

MAKEEV Grigory Anatolievich
 LLC "RN-Technologies", Russia.
grigorym@gmail.com
 ORCID: [0009-0009-6947-8671](https://orcid.org/0009-0009-6947-8671).
 Senior expert.
 Cand. Techn. Sci. (PhD), Docent (Assoc. Prof.).

МЕТАДАННЫЕ | METADATA

Заглавие: Определение гидравлического трения жидкости по фактическим данным давления гидроудара.

Авторы: Макеев Г. А.

Аннотация: Рассматриваются постановка задачи о гидроударе в трубе как затухающих акустических колебаниях со степенной моделью гидравлического трения, а также особенности распространения колебаний гидроудара при различных граничных условиях, определяющих процесс инициации гидроудара. Приведена простая методика оценки коэффициента и модели гидравлического трения по наклону кривой падения давления после ухода первой волны гидроудара. Проводятся верификация методики с помощью численных экспериментов, а также валидация её на фактических данных гидроудара в процессе операции гидроразрыва пласта.

Ключевые слова: Гидроудар; коэффициент гидравлического трения; обратная задача.

Язык: Русский.

Статья поступила в редакцию 19 февраля 2026 г.

Title: Determining hydraulic friction of a fluid using water hammer pressure actual data.

Authors: Makeev G. A.

Abstract: This paper considers the problem of water hammer in a pipe as damped acoustic oscillations with a power-law hydraulic friction model. The propagation characteristics of water hammer oscillations are examined under various boundary conditions that determine the process of water hammer initiation. A simple method for estimating the coefficient and model of hydraulic friction based on the slope of depressurization curve after the first water hammer wave has departed is presented. The method is verified using numerical experiments and validated using actual water hammer data from hydraulic fracturing operations.

Key words: Water hammer; hydraulic friction coefficient; inverse problem.

Language: Russian.

The article was received by the editors on 19 February 2026.