

**В.В. Кадет**, заведующий кафедрой нефтегазовой и подземной гидромеханики РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина  
**А.В. Трифонов**, генеральный директор нефтяной компании «Сервон»

# ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ОПТИМАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ГИДРОИМПУЛЬСНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ПЗС

*При освоении скважин, а также для обработки их призабойных зон с целью поддержания дебита в процессе эксплуатации широко используют метод гидроимпульсного воздействия [1-4]. При этом практика показывает [5], что эффективность данного метода существенно зависит как от частоты генерации импульсов давления, так и от их амплитуды.*

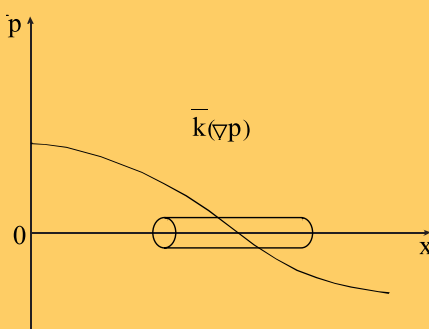
В работе проведен теоретический анализ механизма воздействия гидравлического импульса на поверхность порового пространства среды на микроуровне. На этой основе показана взаимосвязь амплитуды и частоты с точки зрения оптимизации параметров гидроимпульсного воздействия на ПЗС и получен соответствующий критерий их выбора.

Рассмотрим распространение в пористой насыщенной среде импульса давления, передаваемого непосредственно в насыщающую жидкую фазу. Указанный импульс создается внешним воздействием на границе насыщенного порового пространства (в нашем случае - на границе пласт-скважина) и распространяется по насыщающей фазе в виде волны давления.

В случае, когда поверхность поровых каналов или по крайней мере ее часть покрыта отложениями коагулирующей компоненты потока (коллоидных частиц глины буровых растворов, твердых частиц тонкодисперсной взвеси и т.п.) с низкой сдвиговой прочностью, вызванное импульсной нагрузкой течение жидкости может вызвать сдвиго-

**Рис. 1**

Схема наиболее благоприятной взаимной ориентации волнового вектора и оси порового канала



вые напряжения на границе твердой и жидкой фаз, которые приведут к разрушению (и последующему гидродинамическому уносу) части твердой поверхности порового пространства. Соответственно на величину толщины сносимого низкопрочного пограничного слоя возрастет радиус гидропроводящих каналов, что приведет к повышению проницаемости среды.

Проведем качественный анализ проявлений указанного эффекта на примере рассмотрения отдельного проводящего порового канала. Очевидно, максимальный эффект воздействия

проходящей волны на поверхность капилляра будет иметь место в случае, когда ось канала коллинеарна вектору градиента давления, возникающего в среде. Ниже на рисунке 1 представлена схема взаимной ориентации волнового вектора распространяющейся волны давления (вектора градиента давления) и оси проводящего капилляра пористой среды.

Хаотическая ориентация поровых каналов в среде может быть заменена эквивалентной изотропной кубической решеткой капилляров [6], откуда следует, что капилляры соответствующей пространственной ориентации составляют не менее трети от их общего количества. Причем важно подчеркнуть, что именно эти капилляры представляют интерес с точки зрения реализации притока к скважине, поскольку ось  $Ox$  направлена перпендикулярно стенке скважины и соответственно приток к скважине осуществляется в основном вдоль данной оси.

Воздействие гидравлического импульса, проходящего в среде, можно рассматривать независимо от существующего распределения давления, так

как давление является величиной аддитивной.

Оценим вначале градиент давления, создаваемый распространяющейся продольной волной нагрузки в насыщающей фазе

$$\nabla p \cong \frac{\Delta p}{\lambda/4} = \frac{4\Delta p}{\lambda} = \frac{4\Delta p f}{c} \quad \text{1}$$

где  $\lambda$  - длина волны нагрузки;

$\Delta p$  - амплитуда волны нагрузки, создаваемая гидроимпульсным воздействием;

$f$  - частота создаваемых гидравлических импульсных нагрузок;

$c$  - скорость звука в жидкой фазе.

Считая жидкость ньютоновской, воспользуемся решением Гагена-Пуазейля [7] для распределения скорости течения флюида в капилляре

$$v(r) = \frac{1}{4\mu} (r - r_0^2) \nabla p \quad \text{2}$$

где  $r$  - расстояние от оси капилляра;

$r_0$  - радиус капилляра;

$\mu$  - динамическая вязкость.

Касательное напряжение на стенке капилляра определяется соотношением Ньютона [7]

$$\tau_0 = \mu \left. \frac{\partial v}{\partial r} \right|_{r=r_0}$$

откуда, используя (2), получаем

Из (3) видно, что величина  $\tau_0$  для

$$\tau_0 = \frac{r_0}{2} \nabla p \quad \text{3}$$

каждого отдельного капилляра будет определяться прежде всего его радиусом, так как градиент давления в любом элементарном физическом объеме

постоянен. Представительство капилляров различного радиуса в указанном элементарном физическом объеме определяется видом функции плотности распределения капилляров (поровых каналов) по радиусам  $f(r)$ , которая является наиболее важной характеристикой коллектора. Для проведения дальнейших оценок будем использовать среднее значение радиуса поровых каналов породы коллектора

$$\langle r \rangle = \int_0^{\infty} r f(r) dr$$

Соответственно на основании формулы (3) получаем выражение для средней величины касательных напряжений на стенках капилляров в среде

$$\langle \tau \rangle = \frac{\langle r \rangle}{2} \nabla p \quad \text{4}$$

Для того, чтобы на стенках капилляров произошло разрушение поверхностного слоя, образованного отложениями кольматантов, необходимо выполнение условия

$$\langle \tau \rangle \geq \sigma_* \quad \text{5}$$

где  $\sigma_*$  - предел прочности кольматанта на сдвиг.

Используя (1) и (4), из (5) получаем критерий эффективности гидроимпульсного воздействия

$$\Delta p \cdot f \geq \frac{\sigma_* \cdot c}{2 \langle r \rangle} \quad \text{6}$$

Полученный результат носит качественный характер, поскольку не учитывает некоторых особенностей процесса - например, вида функции  $f(r)$ , возможной анизотропии пространственной ориентации проводящих каналов, зависимость от координаты величины  $\sigma_* = \sigma_*(x)$ . Однако он отражает принципиально важный момент взаи-

мосвязи амплитуды и частоты в достижении эффекта при реализации гидравлических импульсов в насыщенной пористой среде. Критерий (6) показывает, что для разрушения кольматирующих отложений на поверхности порового пространства коллектора необходимо, чтобы произведение амплитуды гидроимпульсов на частоту превысило некоторую предельную величину, которая определяется прежде всего прочностной характеристикой кольматанта (прочностью на сдвиг:  $\sigma_*$ ), а также свойствами пластового флюида (скоростью звука в нем  $c$ ) и структуры порового пространства (плотностью распределения поровых каналов по радиусам  $f(r)$ ).

При этом соотношение (6) позволяет провести оценку численного значения данного критерия, что дает возможность его практического использования для определения параметров  $\Delta p$  и  $f$ , в отличие от общего качественного вывода в отношении этих величин, который может быть получен из энергетических соображений. Дело в том, что энергия, передаваемая в среду при прохождении волновых импульсов [8]

$$E \sim (\Delta p \cdot f)^2$$

и очевидно, что кольматант начнет разрушаться, когда энергозложение превысит некоторый рубеж  $E^*$ . Однако собственно энергетическое рассмотрение не дает возможности установить численное значение критерия  $E^*$ , так как требует целого ряда предположений о характере диссипации энергии, о величинах констант термоупругих напряжений и т.д. В то же время критерий (6) получен только на основе использования прочностной характеристики кольматанта.

Интересно оценить характерный диапазон значений критерия

$$K = \frac{\sigma_* \cdot c}{2 \langle r \rangle}$$

Прочность на сдвиг глины составляет величину порядка  $10^3$  Па [9, 10], а для бурового раствора она существенно ниже - 10 Па [11, 12], то есть будем считать, что  $\sigma_*$  лежит в пределах

$$10 \text{ Па} \leq \sigma_* \leq 10^3 \text{ Па}$$

Диапазон изменения среднего радиуса капилляров в поровых коллекторах, или среднего раскрытия трещин в случае трещинного коллектора, весьма широк [13, 14]

$$10^{-6} \text{ м} \leq \langle r \rangle \leq 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

В результате, принимая в качестве скорости звука в пластовом флюиде величину  $C \approx 10^3$  м/с, получаем

$$10^6 \text{ Па/с} \leq K \leq 10^{12} \text{ Па/с}$$

или, используя для давления внесистемную, но более привычную размерность  $\text{ат} = 10^5$  Па

$$10 \text{ ат} \cdot \text{Гц} \leq K \leq 10^7 \text{ ат} \cdot \text{Гц} \quad \mathbf{7}$$

Соотношение (7) позволяет заключить, что гидроимпульсная обработка ПЗС может быть эффективным лишь для крупнопоровых коллекторов (в частности, для трещинных), либо на стадии освоения, когда кольматирующие отложения представлены буровым раствором со сравнительно низкой сдвиговой прочностью. Это связано с тем, что технологические особенности процесса устанавливают следующие границы параметров гидроимпульсного воздействия

$$\Delta p \leq 10 \text{ ат}; \quad f \leq 10^2 \text{ Гц}$$

Следовательно, практически важный диапазон параметра  $K$  будет представлен областью вблизи левой границы неравенства (7)

$$10 \text{ ат} \cdot \text{Гц} \leq K \leq 10^3 \text{ ат} \cdot \text{Гц}$$

Для того чтобы минимизировать энергозатраты на гидроимпульсную обработку скважины, следует вначале определить значение  $K$  для данного конкретного случая, после чего, задаваясь значением  $\Delta p$  или  $f$  (в зависимости от удобства технической реализации обработки), оценить значение второго параметра из равенства

Например, в предельном случае  $K = 10 \text{ ат} \cdot \text{Гц}$ , если конструктивные особенности призабойной зоны скважины и имеющееся оборудование

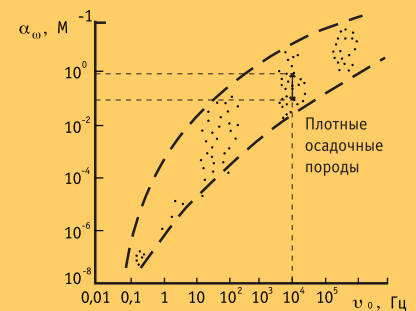
$$\Delta p \cdot f = K \quad \mathbf{8}$$

делают наиболее приемлемым значение  $f = 1 \text{ ат}$ , то в соответствии с (8) обработку следует проводить с частотой  $f \approx 10$  Гц. Если же, например, удастся реализовать только частоту  $\Delta p = 1$  Гц, для достижения того же эффекта необходимо обеспечить величину  $\Delta p \approx 10 \text{ ат}$ .

На практике, поскольку в силу сделанных выше замечаний критерий  $K$  определяется приближенно (по порядку величины), точное значение любого из параметров  $\Delta p$  и  $f$ , если один из них задан, необходимо устанавливать экспериментально в лабораторных или промысловых испытаниях. При этом очень важно, что полученный критерий (8) позволяет существенно локализовать область поисков значений второго параметра.

Для оценки радиуса зоны воздействия гидравлических импульсов  $R$  воспользуемся подходом, представленным в [15]. В соответствии с данными Ж.М.Булатова при  $\alpha \leq 10^2$  Гц коэффициент затухания  $\pm f \leq 10^{-2}$  м $^{-1}$ . Следовательно, с учетом затухания цилиндрической волны за счет геометрической расходимости полу-

**Рис. 1.** Зависимость показателя затухания акустических волн от частоты в реальных средах (по данным Ж.М. Булатова)



чим (принимая радиус скважины равным 10-1 м), что

$$1 \text{ м} \leq R \leq 10 \text{ м}$$

Отсюда можно заключить, что эффект гидроимпульсного воздействия проявляется лишь непосредственно в ПЗС.

#### Литература

1. Вольницкая Э.М., Вольницкая Е.П., Прилепский В.П. Экологически чистые волновые технологии освоения и восстановления производительности водозаборных скважин.// Новые технологии.- 2004.
2. Дыбленко В.П., Камалов Р.Н., Шарифуллин Р.Я., Туфанов И.А. Повышение продуктивности и реанимация скважин. - М.: Недра, 2000.- 381с.
3. Ибрагимов Л.Х., Мищенко И.Т., Челоянц Д.К. Интенсификация добычи нефти. - М.: Наука, 2000.- 414 с.
4. Максименко А.Ф., Елисеев Н.Ю., Шахиджанов Ю.С. Использование энергии ударных, сейсмических и акустических волн для интенсификации процессов разработки нефтеконденсатных месторождений. Передовые технологии на пороге XXI века. - М.: НИЦ Инженер, 1998.- 732 с.
5. Рахматуллин Х.А. Волны в двухкомпонентных средах. Ташкент. - ФАН УзССР, 1974.- 266 с.
6. Кадет В.В. Введение в теорию перколяции. - М.: РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 1998.- 57 с.
7. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Гидродинамика. - М.: Наука, 1988.- 733 с.
8. Черноуцан А.И. Краткий курс физики. - М.: Физматлит, 2002.-
9. Сергеев Е.М., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С., Осипов В.И., Трофимов В.Т. Грунтоведение. - М.: МГУ, 1973.- 367 с.
10. Грим Р.Э. Минералогия и практическое использование глин. - М.: Мир, 1967.- 511 с.
11. Иогансон К.В. Спутник буровика. - М.: Недра, 1990.- 303 с.
12. Жуховицкий С.Ю. Глинистые растворы в бурении. - М.: Гостоптехиздат, 1955.- 171 с.
13. Марморштейн Л.М. Коллекторские и экраняющие свойства осадочных пород при различных термодинамических условиях. - Л.: Недра, 1975.- 159 с.
14. Багринцева К.И. Карбонатные породы - коллекторы нефти и газа. - М.: Недра, 1977.- 231 с.
15. Селяков В.И., Кадет В.В. Перколяционные модели процессов переноса в микрогетерогенных средах. - М.: Недра, 1995.-222 с.



# Гипронг – Эком



Консалтинг в вопросах обеспечения  
подготовки месторождений к разработке

Полный комплект лицензий  
на все виды деятельности

## Наши проекты:

Обустройство месторождений  
и нефтепроводы внешнего  
транспорта нефти  
Потанай-Картопольское  
Славинское  
Песчаное  
Восточно-Пальянское  
Каменная (Юго-Восточная часть)  
Рославльское  
ЦГИС "Каменское"  
ЦПС Крапивиного месторождения

Установка переработки нефти  
Талинское месторождение (300 тыс. т/год)  
В с.Казанском (10 тыс. т/год)  
Тарко-Салинская (20 тыс. т/год)

Весь комплекс  
проектно-изыскательных работ  
по обустройству нефтяных  
и газовых месторождений,  
включающего в себя все системы  
жизнеобеспечения месторождений.  
Проектирование малотоннажных  
нефтеперерабатывающих установок.



ГИПРОНГ-ЭКОМ  
г.Тюмень, ул.Республики, 59, каб.414  
Тел.: (3452) 49-41-12, Факс: (3452) 46-68-42  
e-mail: surovets@glprong.ru

