

ПРИМЕНЕНИЕ ПОДВИЖНЫХ ПРЕГРАД ДЛЯ ЗАЩИТЫ ОБСАДНЫХ КОЛОНН ПРИ ПРОСТРЕЛОЧНО-ВЗРЫВНЫХ РАБОТАХ В СКВАЖИНАХ

Н. А. Лысюк, канд. техн. наук, А. В. Михалюк, докт. техн. наук (ННИИОТ)

Наведено результати теоретичних та експериментальних досліджень ефективності застосування рухомих перешок для захисту свердловин та їх обсадних колонн при прострільно-вибухових роботах. Використання перешок різних конструкцій забезпечує зниження вибухових навантажень у десятки разів.

Известно [1], что при прострелочно-взрывных работах обсадные колонны скважин подвергаются интенсивным динамическим нагрузкам, медленно затухающим с удалением от очага взрыва, вблизи которого они могут достигать нескольких сотен мегапаскалей, а у устья, на расстоянии 2 км – 20 МПа и более. Опыт торпедирования и кумулятивной перфорации свидетельствует о том, что такие нагрузки способны вызвать серьезные повреждения обсадных колонн скважин и привести к разрушению обсадных труб и цементного камня, нарушению герметичности колонн, появлению нежелательных межпластовых перетоков и т.п. Поэтому при проведении взрывных работ в скважинах с использованием достаточно больших зарядов рекомендуется использовать средства защиты обсадных колонн преимущественно в виде неподвижных мостов – цементных, песчаных, гравелистых, солевых, пенковых и т.п. [1, 2]. Такие мосты способны надежно локализовать очаг взрыва, однако имеют ряд недостатков, основными из которых являются:

- большие размеры мостов, достигающие нескольких десятков метров;
- сильное сцепление с обсадной трубой или стенками скважины, что вызывает необходимость послеоперационного разбуривания моста с целью восстановления рабочего состояния скважины;
- необходимость привлечения для выполнения этих работ тяжелого, энергоемкого и дорогостоящего оборудования;
- сложность очистки ствола скважины и восстановления его проходимости.

Попытки найти более приемлемое решение предпринимались неоднократно. Упомянем такие методы снижения интенсивности взрывного воздействия как насыщение скважинного флюида пузырьками воздуха [3], сооружение пробок из твердого гелеобразного материала [4, 5], реверберация взрывных волн [6] и др. Однако все эти методы до сих пор не нашли практического применения на нефтегазопромыслах из-за значительного усложнения и удорожания ремонтно-восстановительных работ.

В настоящее время для защиты скважин от разрушения взрывом все более широкое применение находят саморазрушающиеся подвижные преграды,

изготовленные из недорогих местных или подручных материалов. Их безусловным достоинством является то, что обеспечивая необходимое снижение амплитуды взрывного воздействия на колонну, они не требуют выполнения каких-либо операций по восстановлению работоспособности скважин. Они были использованы при торпедировании скважин на Мамонтовском месторождении нефти (Россия), ряде месторождений Предкарпатья и Днепровско-Донецкой впадины (Украина), месторождениях Teapot Dome, Wildcat, Asherland в США, Ян-Чен (Китай) и др.

В техническом отношении подвижные преграды достаточно просты. Они могут иметь вид цементных пробок, свободно скользящих вдоль обсадной трубы вместе с технологическим зарядом, эластичных контейнеров с сыпучим материалом и т.п. На рис. 1 показаны простейшие средства защиты в виде цементных пробок, разрушающихся под действием взрывной волны. Они могут быть сплошными (а), содержать вспененный наполнитель (б) или вакуумированные элементы (в) в виде стеклянных баллонов.

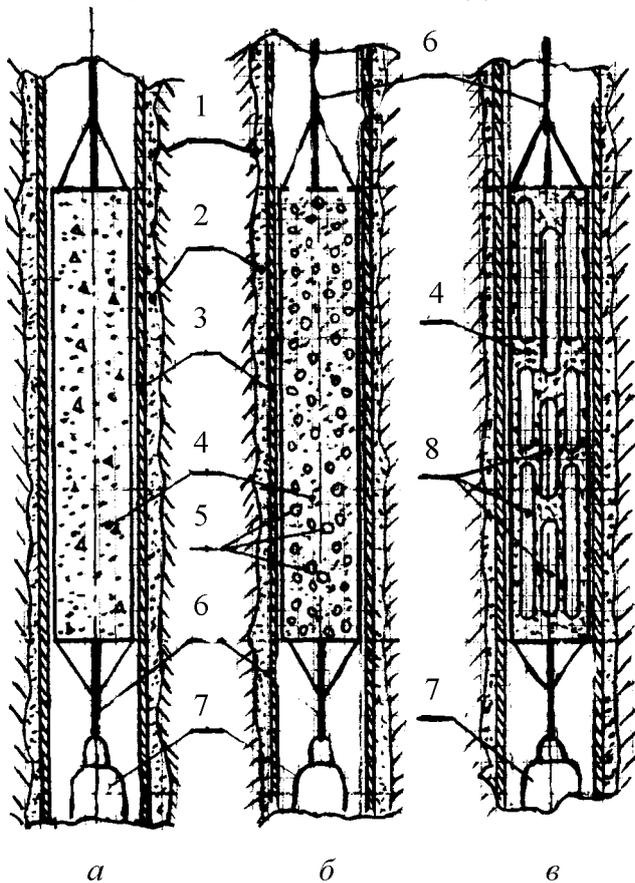


Рис. 1. Схемы подвижных преград в виде цементно-песчаных пробок: 1 – скважина; 2 – цементный камень; 3 – обсадная труба; 4 – цементно-песчаная пробка; 5 – вспененный материал; 6 – каротажный кабель; 7 – торпеда; 8 – вакуумизированные элементы

Защитная способность таких преград определяется несколькими механизмами снижения интенсивности взрывного возмущения:

отражением и преломлением взрывной волны на границах раздела сред с различной акустической жесткостью;

поглощением энергии волны на деформационные процессы в среде преграды;

трением между обсадной трубой (скважиной) и продуктами разрушения преграды;

инерционностью преграды.

Чтобы обеспечить необходимый технологический эффект от применения такого способа защиты скважин, важно определить длину пробки и ее расстояние до очага взрыва (торпеды).

Рассмотрим простейший случай, когда:

вес пробки пренебрежимо мал по сравнению с интенсивностью взрывной нагрузки;

движение пробки вдоль ствола скважины происходит без потерь энергии на ее механическое взаимодействие со стенками колонны (скважины) и без гидродинамических потерь, связанных с перетоками скважинной жидкости по зазору между обсадной трубой (стенками скважины) и корпусом пробки;

размеры пробки позволяют пренебречь потерями энергии взрывной волны на ее деформирование и диссипативными потерями.

При таких допущениях эффективность применения подвижных пробок как средств защиты скважин может быть легко установлена на основе закона сохранения импульса:

$$F(t)dt = d(mv), \quad (1)$$

где $F(t)$ – сила взрывного воздействия на пробку, $F(t)=p(t)S$; $p(t)$ – импульс давления, распространяющийся от очага взрыва; t – время; S – площадь поперечного сечения пробки, для цилиндрических пробок $S = 0,25\pi d_{\text{п}}^2$; $d_{\text{п}}$ – диаметр пробки; m – масса пробки, $m = \rho lS$; ρ – плотность материала пробки; l – длина пробки; v – скорость смещения.

Аппроксимируя импульс давления сигналом треугольной конфигурации с амплитудой p_m и длительностью t_+ , найдем из (1) после несложных преобразований, что

$$v = \frac{p_m t_+}{2\rho l}. \quad (2)$$

Исходя из принципа сохранения сплошности, скорость движения пробки должна быть численно равна скорости скважинной жидкости на контакте сред, тогда начальное давление в жидкости за преградой

$$p_* = \rho_* v_p v = \rho_* v_p \frac{p_m t_+}{2\rho l}, \quad (3)$$

где ρ_* – плотность скважинной жидкости; v_p – скорость звука в ней.

Из (3) находим снижение амплитуды взрывной волны с помощью подвижной преграды:

$$\chi = \frac{2\rho l}{\rho_* v_p t_+}. \quad (4)$$

Из этой формулы следует, что защитные возможности подвижной пробки возрастают прямо пропорционально увеличению ее плотности и длины и уменьшаются с увеличением акустического сопротивления скважинного

флюида. Отметим, что применение подвижных пробок наиболее эффективно при снижении амплитуды высокочастотной импульсной нагрузки ($t_+ \rightarrow 0$) и практически бесполезно для снижения интенсивности стационарных нагрузок (при $t_+ \rightarrow \infty \chi \rightarrow 0$). Поскольку длительность взрывного импульса возрастает с расстоянием от очага взрыва [7], легко сделать вывод, что защитные пробки следует устанавливать как можно ближе к очагу взрыва. Так как величина t_+ функционально связана с величиной заряда [7], то, зная необходимое количество одновременно взрывающегося взрывчатого вещества и требуемую (по состоянию колонны) степень снижения взрывной нагрузки, по формуле (4) несложно найти минимальную длину подвижной преграды.

Покажем возможность использования вышеприведенных формул для практических расчетов, используя данные натурных измерений взрывных нагрузок в стволах скважин, приведенные в работе [8].

На рис. 2 приведены результаты регистрации взрывных волн в скважинах при применении подвижных пробок из песчано-цементной смеси (кривая 1), пенобетона (кривая 2) и цементно-песчаной матрицы с вакуумными элементами (стеклянные баллоны) (кривая 3). На этом же рисунке показано затухание взрывной волны в свободном стволе скважины (кривая 4). Прямоугольниками отмечены места установки пробок и их длина.

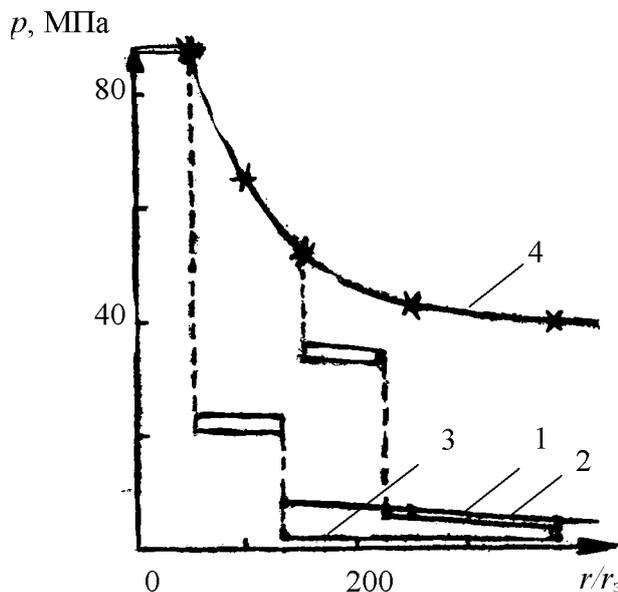


Рис. 2. Зависимость давления взрывных волн в стволах скважин от относительного расстояния при применении пробок: 1 – песчано-цементных; 2 – пенобетонных; 3 – с вакуумными элементами; 4 – то же без применения средств защиты

Условия проведения опытов, их результаты и сравнение экспериментальных и расчетных характеристик эффективности применявшихся средств защиты представлены в таблице, где приняты такие обозначения (кроме уже упомянутых): Q – масса заряда; r_3 – его радиус; $\chi_{\text{эксп}}$ – экспериментально зарегистрированная величина снижения амплитуды взрывной волны; $\chi_{\text{расч}}$ – то же, рассчитанное по формуле (4); r – расстояние от очага взрыва до середины длины пробки.

Тип пробки	ρ , кг/м ³	Q , кг	l , м	r , м	$\frac{r}{r_3}$	t_+ , мс	$\chi_{\text{эксп}}$	$\chi_{\text{расч}}$	$\chi_{\text{эксп}} - \chi_{\text{расч}}$	
									абсол.	%
Цементно-песчаная	$2,3 \cdot 10^3$	0,01	0,9	1,05	91,9	0,278	10,10	10,04	+0,06	+0,59
Пенобетонная	$2,1 \cdot 10^3$	0,01	0,8	2,05	179,5	0,202	9,90	11,24	-1,34	-13,54
С вакуумизированными элементами	$1,8 \cdot 10^3$	0,20	2,4	2,90	93,5	0,276	38,10	21,15	+16,95	+80,14

Из таблицы следует, что для защитных пробок, изготовленных из относительно однородного материала, конструкция которых соответствует принятым выше допущениям, предложенный метод расчета обеспечивает достаточно близкое совпадение результатов с данными натуральных измерений, что свидетельствует о возможности его использования при проектировании защитных операций. Если конструкция пробки позволяет использовать другие механизмы снижения амплитуды взрывной волны, то расчет по формуле (4) приводит к заниженным результатам, что может рассматриваться как своеобразный запас надежности защитных мероприятий.

Близким по механизму гашения взрывной волны к цементно-песчаным и пенобетонным преградам является устройство, показанное на рис. 3 и представляющее собой гибкий рукав [9], заполненный сухим сыпучим мелкозернистым материалом и навитый вокруг каротажного кабеля, используемого для спуска торпеды. Такая конструкция защитного приспособления использовалась при торпедировании нефтегазовых скважин в Западной Сибири, Украине и в США, где получила наибольшее распространение. Гибкий рукав может быть изготовлен из полиэтиленовой пленки или пожарного шланга соответствующего диаметра. В качестве сыпучего наполнителя может быть использован сухой мелкозернистый песок, молотый шлак, каменноугольная пыль и т.п. Рукав герметизируется и верхним концом неподвижно закрепляется на каротажном кабеле или тросе. Нижний конец подвижный и может перемещаться вдоль кабеля. При взрыве эластичный рукав складывается, перекрывая живое сечение скважины, чем достигается защитный эффект. Шаг навивки рукава на кабель или трос L рассчитывают по формуле

$$L = \frac{\alpha}{\sqrt{\beta - 1}}, \quad (5)$$

где

$$\alpha = \frac{\pi}{2}(d_p + d_{\text{кб}}); \quad \beta = \frac{4d_{\text{т}}^2}{(d_{\text{т}} - d_{\text{кб}} - \delta)^2};$$

$d_{\text{т}}$ – внутренний диаметр обсадной трубы; $d_{\text{кб}}$ – диаметр кабеля (троса); d_p – диаметр рукава; δ – разность диаметров трубы и навивки в момент спуска.

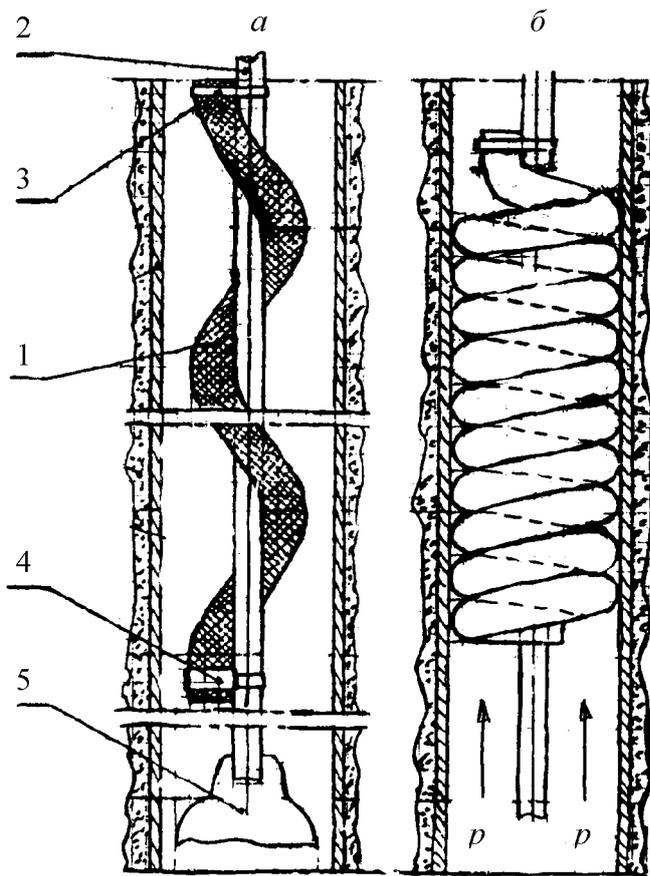


Рис. 3. Конструкции устройств для защиты скважины с помощью сыпучей среды в эластичной оболочке: 1 – рукав с сыпучим материалом; 2 – кабель (трос); 3 – неподвижный зажим; 4 – скользящий зажим; 5 – торпеда

Сыпучий материал может быть размещен и в жестком цилиндрическом контейнере [10], причем для усиления защитных свойств такого приспособления рекомендуется сыпучий материал размещать так, чтобы размеры его зерен увеличивались снизу вверх. Очевидно, что расчеты подобных устройств могут быть выполнены по изложенным выше рекомендациям.

Поскольку эффективность защиты скважин с помощью подвижных пробок возрастает с увеличением их массы, в некоторых технических решениях предусматривается использование дополнительных грузов (см., например, [11]), которые также позволяют регулировать степень гашения взрывного воздействия на колонну. В этом случае снижение интенсивности взрывной волны рассчитывают по формуле

$$\chi = \frac{2 \left(\rho l + \frac{4M}{\pi d^2} \right)}{\rho_* v_p t_*}, \quad (6)$$

где M – масса груза; d – диаметр пробки.

В практике прострелочно-взрывных работ находят применение подвижные преграды многоразового использования, частично или полностью сохраняющие свою функциональную пригодность после взрывного воздействия. Как правило, такие подвижные защитные устройства работают на основе целого комплекса механизмов снижения интенсивности взрывной нагрузки. На рис. 4 приведены схемы некоторых таких устройств, прошедших опытно-промышленную проверку.

На рис. 4, *а* показана подвижная самотормозящаяся преграда, в которой реализуются пять механизмов диссипации энергии взрывного возмущения: инерционность устройства, вакуумизация некоторой части ствола скважины, дросселирование скважинной жидкости, отражение и преломление волн и трение между обсадной трубой и элементами торможения. Устройство состоит из цилиндрического корпуса 1, разделенного мембраной 2 на две камеры 3 и 4, снабженные поршнями 5 и 6, соединенными между собой полым штоком 7 с обратным клапаном 8. Мембрана 2 и поршень 6 снабжены вакуумными уплотнителями 9 и 10. Поршень 5 имеет гидравлическое уплотнение 11. Снизу корпус 1 закрыт предохранительной крышкой 12, рассчитанной на давление в скважине в месте установки преграды. Крышка камеры 3 имеет перфорацию; на крышке размещены шлипсы 13. При опускании устройства (вместе с торпедой) в скважину скважинная жидкость поступает в камеру 3. Под ее давлением поршневая группа перемещается вниз, причем между поршнем 6 и мембраной 2 образуется вакуумное пространство. Воздух, находящийся в камере 4 в исходном состоянии, по мере перемещения поршня стравливается через полый шток и обратный клапан. Устройство затормаживается в стволе скважины с помощью шлипсов.

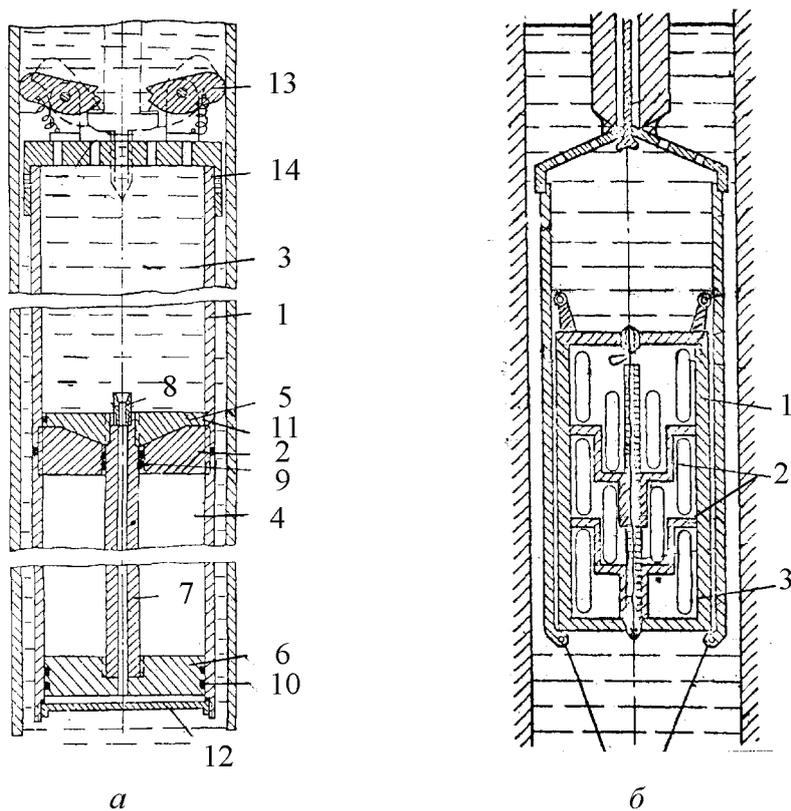


Рис. 4. Принципиальные схемы устройств для защиты скважин по [11] (*а*) и [12] (*б*)

При взрыве под влиянием взрывной волны предохранительная крышка разрушается. На границе с поршнем 6 формируются отраженная и преломленная волны, энергия каждой из которых меньше энергии падающей волны. Под действием результирующего давления поршневая группа смещается вверх, выталкивая скважинный флюид через перфорационные отверстия в крышке, где также имеет место снижение амплитуды взрывного воздействия. Наконец, смещению всего устройства препятствует трение скольжения между шлипсами

и обсадной трубой. После прохождения взрывной волны в крышку камеры 3 ввинчивается наконечник, разворачивая шплинты в нерабочее состояние, не препятствующее свободному извлечению всей конструкции.

Техническое решение на рис. 4, б аналогично описанному, однако вместо вакуумирования части корпуса защитного устройства здесь предполагается использование вакуумных элементов 1 и ступенчатых перемычек 2, расположенных в подвижном корпусе 3 и способствующих рассеиванию энергии взрывной волны за счет дифракции.

Устройства подобного типа в состоянии обеспечить снижение взрывных нагрузок в десятки раз, что было доказано при проведении прострелочно-взрывных работ на водозаборных скважинах радоновых источников Украины.

Понятно, что строгий расчет защитной способности таких устройств весьма затруднителен, однако, используя формулы (4) и (6), можно установить минимальную величину χ , полагая, что другие механизмы диссипации энергии взрывной нагрузки лишь способствуют повышению надежности работы защитного устройства.

Изложенное позволяет сделать вывод о том, что подвижные преграды, отличающиеся простотой и экономичностью технического воплощения, могут с успехом применяться для защиты скважин и их обсадных колонн при разных видах прострелочно-взрывных работ.

1. Григорян Н. Г., Пометун Д. Е., Горбенко Л. А. и др. Прострелочные и взрывные работы в скважинах. – М.: Недра, 1972. – 288 с.
2. Вайхельт Ф. Руководство по промышленным взрывным работам. – М.: Госстройиздат, 1960. – 496 с.
3. Пат. 3803849 США. Способ гашения волн и необходимое для этого оборудование.
4. Пат. 4601339 США. Method for plugging a wellbore in high impulse fracturing.
5. Пат. 4605061 США. Apparatus for plugging a wellbore in high impulse fracturing.
6. Пат. 5117911 США. Shock attenuating apparatus and method.
7. Михалюк А. В., Лысюк Н. А. Динамическое нагружение обсадной колонны при взрыве внутри скважины // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2001. – № 6. – С. 59–65.
8. Чуриков В. А., Колодий В. И., Черевко М. А. Динамика скважин при прострелочно-взрывных работах. – К.: Наук. думка, 1994. – 174 с.
9. А.с. № 1655181 СССР. Скважинный локализатор взрыва.
10. А.с. № 1374898 СССР. Устройство для локализации скважинного взрыва.
11. А.с. № 823571 СССР. Устройство для локализации действия взрыва.
12. А.с. № 1197540 СССР. Устройство для локализации действия взрыва в скважине.