

Данные по нарастанию полуширины струйного потока также свидетельствуют о правомочности этой взаимосвязи, поскольку в относительных координатах  $z_{1/2}/d = f(x/d)$  темп нарастания полуширины при фиксированном числе  $Re$  оказывается одинаковым для пристенных круглых струй. Отличие же полуширины струи, истекающей из насадка диаметром 1 мм, требует дальнейшего изучения и объясняется, по-видимому, различием в масштабе течения, связанным с образованием вихревых течений у границ струйного потока. Получены также данные о влиянии числа  $Re$  на закономерность затухания максимальной скорости и полуширины струи.

Результаты эксперимента были использованы при расчете и конструировании элементов системы защиты от биологического обрастания судов и сооружений.

#### Л и т е р а т у р а

1. Теория турбулентных струй / Под ред. Г.Н. Абрамовича. — М., 1985. — 717 с.
2. Ш е ц Дж. Турбулентное течение. Процессы вдува и перемешивания. — М., 1984. — 247 с.
3. L a u n d e r В.Е., R o d i W. The turbulent wall jets // Prog. Aerospace Sci, 1981. — Vol. 19. — P. 81—128.
4. H o f e r K. Turbulente Wandstrahlen mit Auftrieb Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau // Hydrologie und Glaziologie. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 1979. — Nr. 42.
5. R a j a r a t n a m N. and P a n i B.S. Three-dimensional turbulent wall jets. ASCE // J. Hydraulics. — Div., HY1, 69, 1974.
6. П а в л о в с к и й В.А. Экспериментальное исследование затопленной плоской струи // Тр. ЛКИ. — Л., 1981. — С. 69—79.

УДК 628.112.4

В.В. ИВАШЕЧКИН,  
Г.К. ДОБРЯН (БПИ)

### РАСЧЕТ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ПРИ ИМПУЛЬСНОЙ ОЧИСТКЕ ФИЛЬТРОВ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Газодинамический способ очистки фильтров водозаборных скважин основан на использовании энергии, выделяющейся при быстром химическом превращении различных газовых смесей в полости фильтра.

При использовании водорода в качестве источника энергии [1] в полости очищаемого фильтра генерируются значительные по амплитуде и продолжительности возмущения давления, которые вызывают растягивающие радиальные напряжения, приводящие к разрушению кольматирующих отложений.

Быстрое химическое превращение генерируют непосредственно в зоне обрабатываемого фильтра в рабочей камере скважинного погружного устройства. Камера представляет собой открытый снизу цилиндр, к которому в нижней части на определенном расстоянии жестко крепится пакер. Скважинное устройство перемещают вдоль фильтра и производят его поинтервальную декольматацию.

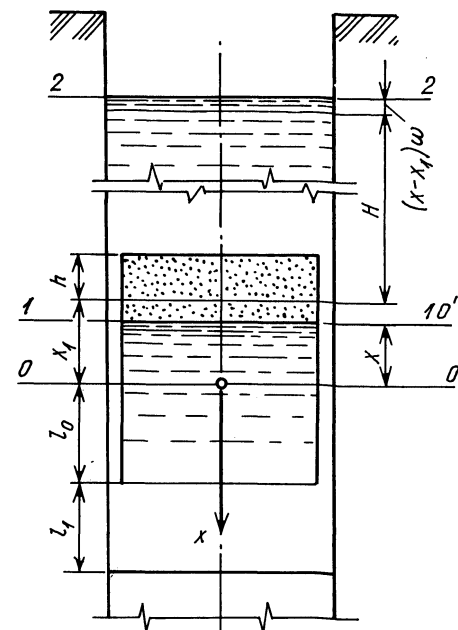
Часть выделяющейся при быстром химическом превращении энергии передается через кольцевой зазор между камерой и фильтром столбу жидкости в скважине, а часть идет непосредственно на разрушение кольматирующих образований на фильтре и в профилефильтровой зоне. В этих условиях доля энергии, передаваемой фильтру, будет в значительной степени зависеть от размеров рабочей камеры, степени заполнения ее энергоносителем, соотношения площадей сечения рабочей камеры и фильтра, а также глубины погружения устройства.

При прочих равных условиях (глубине погружения камеры, количестве запасаемой энергии) эффективность разрушения кольматирующих отложений будет зависеть от длительности приложения импульсной нагрузки, которая

может быть учтена импульсом  $I = \int_0^t p(t) dt$ . Следовательно, для эффективной обработки фильтра необходимо назначать такие размеры рабочей камеры и степень ее заполнения газовой смесью, при которых импульс гидродинамического давления был бы максимальным. Решение поставленной задачи требует знания характера пульсаций продуктов взрыва в рабочей камере во времени при различных условиях возбуждения химического превращения.

Для определения характера пульсаций продуктов химического превращения использовались дифференциальное уравнение колебаний и уравнение напорного неустановившегося движения жидкости с учетом некоторых допущений [2].

Расчетная схема процесса расширения продуктов химического превращения показана на рис. 1. Рабочая камера и пакер жестко закреплены относительно стенок скважины на глубине  $H$ . Диаметр скважины —  $d$ , рабочей камере —  $D$ , их площади соответственно  $f$  и  $F$ , расстояние от нижнего среза камеры до пакера —  $l_1$ .



Рабочая камера частично заполнена газообразной взрывной смесью. Обрабатываемый участок фильтра считаем непроницаемым. Пусть в газовой смеси произошло быстрое химическое превращение, например детонация, с образованием полости избыточного давления высотой  $h$ . Полость, воздействуя на границу раздела газ-жидкость, вытесняет последнюю в ствол скважины через кольцевой зазор между камерой и стенкой фильтра. Расширяясь, продукты детонации могут под действием инерции столба жидкости в скважине

Рабочая камера частично заполнена газообразной взрывной смесью. Обрабатываемый участок фильтра считаем непроницаемым. Пусть в газовой смеси произошло быстрое химическое превращение, например детонация, с образованием полости избыточного давления высотой  $h$ . Полость, воздействуя на границу раздела газ-жидкость, вытесняет последнюю в ствол скважины через кольцевой зазор между камерой и стенкой фильтра. Расширяясь, продукты детонации могут под действием инерции столба жидкости в скважине

Рис. 1. Расчетная схема движения продуктов химического превращения

перейти равновесное состояние, в результате чего давление в них станет ниже гидростатического. Вслед за этим начнется схлопывание продуктов под действием гидростатического давления. В стволе скважины возникнут затухающие колебательные движения столба жидкости.

Представим находящиеся в камере продукты быстрого химического превращения как газодинамическую пружину, которая приводит в движение столб воды в скважине посредством "водяного поршня" — жидкости, имеющейся в полости рабочей камеры. Обозначим сечением 0—0 положение равновесия, т.е. положение границы газ—вода, в котором перепад давления между продуктами взрыва и жидкостью составляет 0.

Пусть граница раздела газ—жидкость вместе с водяным поршнем движется вниз и в некоторый момент времени  $t$  находится на расстоянии  $x$  от сечения 0—0. Масса жидкости в рабочей камере в этот момент равна  $\rho F (l_0 - x)$  ( $l_0$  — расстояние от нижнего среза камеры до положения равновесия). Избыточное давление со стороны столба жидкости в скважине на водяной поршень —  $p'$ . Сила давления на поршень со стороны продуктов быстрого химического превращения, направленная к положению равновесия, —  $R$ .

Тогда дифференциальное уравнение движения газовой полости с водяным поршнем:

$$\rho F (l_0 - x) \frac{d^2 x}{dt^2} - R + p' F = 0, \quad (1)$$

Значение  $p'$  со стороны жидкости найдем из уравнения Бернулли для случая напорного неустановившегося движения, записанного для сечений 1—1 и 2—2 относительно плоскости сечений 0'—0'.

$$p' / \rho g + v_1^2 / 2g = p_a / \rho g + v_2^2 / 2g + (x - x_1) + (x - x_1) F / f + H + h_n + h_{ин}, \quad (2)$$

где  $x_1$  — положение границы газ—жидкость в начальный момент времени;  $v_1, v_2$  — скорости в сечениях 1—1 и 2—2 соответственно;  $(x - x_1)$  — смещение границы продуктов взрыва от верхнего положения в момент  $t$ ;  $(x - x_1) F / f$  — смещение уровня воды в скважине в момент  $t$ ;  $h_n$  — потери напора;  $h_{ин}$  — инерционный напор.

Потери напора состоят из потерь на местном сопротивлении  $h_{м.с}$  и потерь по длине  $h_{дл}$ :

$$h_n = h_{м.с} + h_{дл} = (\zeta + \lambda H / d) v_2^2 / 2g.$$

Из уравнения неразрывности потока  $v_1 F = v_2 f$  находим  $v_2 = v_1 F / f = v_1 \omega$ , где  $F / f = \omega$ . Опуская индекс при скорости и учитывая, что  $v_1 = dx / dt$ , получим

$$h_n = \left( \zeta + \frac{\lambda H}{d} \right) \frac{\omega^2}{2g} \left( \frac{dx}{dt} \right)^2.$$

Инерционная составляющая напора, приведенная к сечению 1-1, согласно [3],

$$h_{ин} = \frac{[H + (x - x_1) \omega] \omega}{g} \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} ,$$

Окончательно уравнение (2) примет вид:

$$\begin{aligned} \frac{p'}{\rho g} + \frac{1}{2g} \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 = \frac{p_a}{\rho g} + \frac{\omega^2}{2g} \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + H + (x - x_1) (\omega + 1) + \\ + \frac{[H + (x - x_1) \omega] \omega}{g} \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{\omega^2}{2g} \left( \zeta + \frac{\lambda H}{d} \right) \left( \frac{dx}{dt} \right)^2. \end{aligned} \quad (3)$$

Силу  $R$ , входящую в уравнение (1), найдем по формуле  $R = pF$ , где  $p$  — мгновенное значение давления в продуктах взрыва.

Давление  $p$  можно найти из условия, что расширение продуктов происходит по адиабатическому закону. Тогда  $p_{взр} V_0^k = pV^k$ , где  $p_{взр}$  — начальное давление в продуктах взрыва;  $V_0 = hF$  — начальный объем продуктов;  $V = (h - x_1 + x)F$  — мгновенное значение объема продуктов;  $k$  — коэффициент адиабаты продуктов взрыва. Отсюда

$$p = p_{взр} \frac{h^k}{(h - x_1 + x)^k} .$$

Координату  $x_1$  находим из выражения

$$p_{взр} (hF)^k = p_{абс} [(h + x_1)F]^k ,$$

где  $p_{абс}$  — абсолютное давление в продуктах в положении 0-0,  $p_{абс} = p_a + \rho gH$ .

Тогда

$$x_1 = \left[ \left( \frac{p_{взр}}{p_a + \rho gH} \right)^{1/k} - 1 \right] h ,$$

Скончательно

$$R = \left[ p_{взр} \left( \frac{h}{h - x_1 + x} \right)^k \right] \cdot F .$$

Объединяя уравнения (1) и (3), получим дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 x}{dt^2} + a_1 x \frac{d^2 x}{dt^2} + b_1 \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 + c_1 x + (h - x_1 + x)^{-k} d_1 + g_1 = 0, \quad (4)$$

где  $a_1 = A_1/E_1$ ;  $b_1 = B_1/E_1$ ;  $c_1 = C_1/E_1$ ;  $d_1 = D_1/E_1$ ;  $g_1 = G_1/E_1$ ;  $E_1 = \rho(L + H\omega - \omega^2 x_1)$ ;  $A_1 = \rho(\omega^2 - 1)$ ;  $B_1 = \rho/2[\omega^2 - 1 + \omega^2(\lambda H/d + \zeta)]$ ;  $C_1 = (\omega + 1)\rho g$ ;  $D_1 = -p_{взр} h^k$ ;  $G_1 = \rho gH + p_a - \rho g x_1 (\omega + 1)$ .

Начальные условия при этом примут вид:

$$t = 0, \quad x = x_1, \quad (dx)/(dt) = 0.$$

Уравнение (4) описывает процесс расширения продуктов. Достигнув максимального объема, полость начинает схлопываться. Этот процесс может быть

также описан уравнением (1). Сделав замену  $z = \frac{dx}{dt}$  и  $\frac{dz}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$ ,

уравнение (4) можно записать в виде системы двух дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{dz}{dt} = - \frac{1}{1+a_1x} [b_1z^2 + c_1x + d_1(h-x_1+x)^{-k} + g_1]; \\ \frac{dx}{dt} = z, \end{cases}$$

решение которой находим численными методами (например, методом Рунге-Кутты).

Расчеты, проведенные на ЭВМ, показали, что под действием давления продукты расширяются за пределы равновесного состояния, а затем схлопываются. На рис. 2, а, б приведены зависимости  $v(t)$  и  $\Delta p(t) = p(x, t) - p_{abc}$ , рассчитанные для подводного взрыва смеси  $2H_2 + O_2$  на глубине 10 м в скважине диаметром 0,3 м. Принималась эквивалентная шероховатость стенок

скважины  $\Delta_a = 4$  мм, толщина слоя газовой смеси  $h = 0,07$  м. Для всех графиков перечисленные исходные данные являются общими; графики 1, 2, 3 построены для рабочих камер с разными размерами диаметров, для которых  $\omega = F/f$  составляло соответственно 0,53; 0,78; 0,92, а  $\xi$ , по данным работы [4], соответственно 2; 5; 15-17. Анализ зависимостей  $v(t)$  показывает, что максимальной скорости продукты химического превращения достигают примерно в момент прохождения ими положения 0-0. Затем скорость постепен-

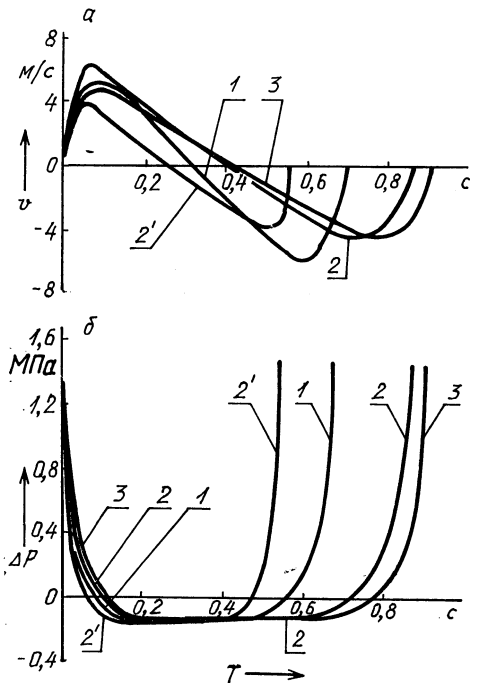


Рис. 2. Диаграммы изменения параметров движения для первого периода пульсаций продуктов:

а — скорости жидкости в камере; б — перепада давления  $\Delta p(x, t) = p(x, t) - p_{abc}$

но уменьшается до 0, после чего происходит обратное движение с положительным ускорением до тех пор, пока граница газ—жидкость не перейдет в положение равновесия. Сравнение графиков 1, 2 и 3 показывает, что с увеличением диаметра камеры расширение и схлопывание продуктов осуществляются с меньшими ускорениями. Абсолютные значения максимальных скоростей при этом также уменьшаются.

Анализ полученной зависимости  $\Delta p(t)$  (рис. 2, б) показывает, что гидродинамическое давление в полости фильтра быстро убывает по экспоненциальному закону. Причем скорость снижения давления неодинакова и зависит от размеров рабочей камеры. Время существования в жидкости избыточного давления незначительно и составляет примерно 1/4 периода пульсации. Все остальное время давление в полости фильтра ниже гидростатического. Из этого следует, что для быстрого превращения газовой смеси характерно длительное имплозивное воздействие на фильтр. Это очень важно с точки зрения улучшения условий выноса разрушенных частиц колыматанта в ствол скважины. Из графиков 1, 2, 3 выводим, что с возрастанием диаметра камеры спад кривой  $\Delta p(t)$  становится более плавным, длительность фазы разрежения и сжатия возрастает. В результате возрастает импульс давления  $I$ , который в указанных условиях является основным разрушающим фактором.

При расчете процесса пульсаций продуктов допускалось, что процесс расширения и схлопывания подчиняется адиабатическому закону. Однако, учитывая малые скорости расширения продуктов и значительное время пребывания их в рабочей камере, процесс пульсаций следует считать политропным, т.е. с теплообменом. Кривая 2 (см. рис. 2) иллюстрирует изменение скорости  $v(t)$  и  $\Delta p(x, t)$  при коэффициенте политропы  $n = 1,75$ . Сравнение кривой 2' с кривой 2, имеющей  $k = 1,21$ , показывает, что теплообмен приводит к существенному снижению: периода пульсаций — в 1,5 раза, степени расширения продуктов — в 1,5, максимальной скорости — в 1,3 раза. Соответственно теплообмен вызывает снижение величины импульса давления. В этой связи при восстановительных работах в скважинах необходимо использовать рабочие камеры, в конструкции которых учтены требования уменьшения теплообмена с окружающей средой.

#### Л и т е р а т у р а

1. И в а ш е ч к и н В.В., К о з л о в Д.А., С а б а д а х Б.В. Использование водорода в качестве энергоносителя в аппаратах для очистки фильтровых труб скважин // Изв. высших учебных заведений. — Сер. Энергетика. — 1984. — № 10. — С. 118—122. 2. Ч у г а е в Р.Р. Гидравлика. — Л., 1975. — 598 с. 3. С е р е б р е н н и к о в В.В., Б ы к о в В.В., Т и х о в и д о в Б.Д. Пневматические насосы вытеснения. — М., 1970. — С. 63. 4. Ш к о л ь н ы й Н.П., П е т р я ш и н Л.Ф., Ч у р и к о в В.А., К л о в А.К. Исследование величины коэффициента местных потерь при движении поршень-снаряда в стволе скважины виброимпульсным методом обработки. — Ивано-Франковск, 1983. — 8 с. Рукопись представлена ИФИНГ. Деп. Укр. НИИНТИ. 25.11.83 № 1337-УК-Д83.