

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 профилитровой 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

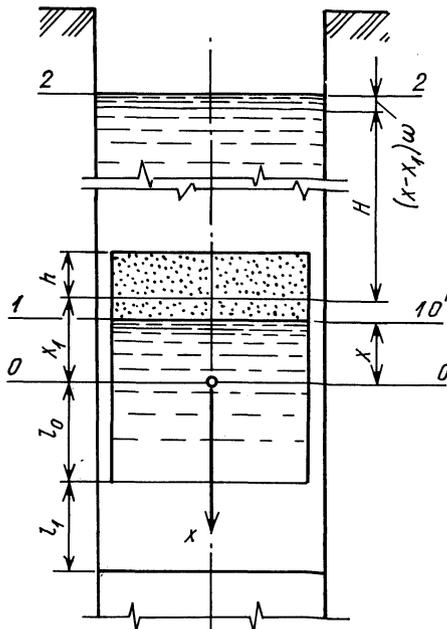


Рис. 1. Расчетная схема движения продуктов химического превращения

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 сравнений 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 ξ , 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-

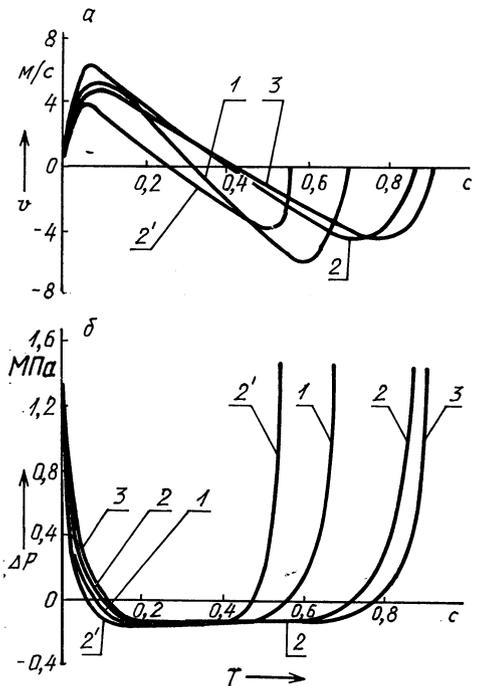


Рис. 2. Диаграммы изменения параметров движения для первого периода пульсаций продуктов:

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.