

УДК 628.112

РАСЧЕТ ЭНЕРГОЗАТРАТ ПРИ ГАЗОИМПУЛЬСНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ ФИЛЬТРОВ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН

Канд. техн. наук, доц. ИВАШЕЧКИН В. В.

Белорусский национальный технический университет

Основными технологическими параметрами импульсной обработки фильтров водозаборных скважин являются: интервал обработки фильтра по высоте, величина запасаемой в рабочей камере энергии и количество энергии, необходимой для декольматации 1 м фильтра.

Важное значение при расчете энергозатрат имеет специфика отложений на наружной поверхности фильтров. В скважинах, оборудованных проволочными фильтрами, зона интенсивной кольматации приурочена к гравийной обсыпке. Прочность цементированного гравия на осевое сжатие может превышать $\bar{R}_{с.г} = 2$ МПа.

На рис. 1 представлен продольный разрез закольматированного проволочного фильтра 4 в виде цилиндра с толщиной стенки δ , состоящего из проволочной навивки 6, находящейся внутри цементированной гравийной обсыпки и представляющего единую систему, которая под действием внутреннего импульсного давления и за счет сил сцепления между составляющими совместно работает на растяжение.

Если рассматривать поэтапно совместную работу комплекса «проволочная обмотка – цементированная гравийная обсыпка» под действием растягивающих сил от давления внутри фильтра, то на I стадии трещин в обсыпке еще нет, они появляются при достижении первого предельного давления p_1 , на II стадии трещины раскрываются

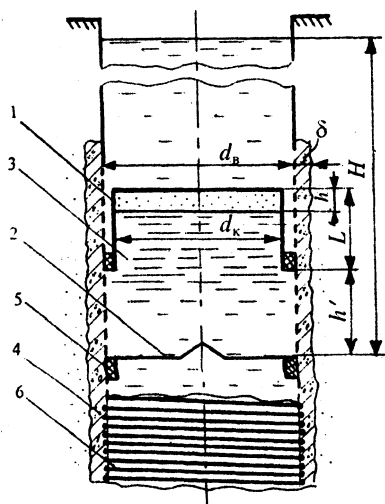


Рис. 1. Продольный разрез закольматированного проволочного фильтра: 1 – полый цилиндр; 2 – отражатель; 3 – рабочая камера; 4 – закольматированный фильтр; 5 – пакеры; 6 – проволочная навивка

ся, но еще не являются сквозными – водопроницаемости нет. В конце II стадии ширина раскрытия трещин a_r становится равной 0,2 мм при достижении второго предельного давления p_{II} , и их условно считают сквозными [1]. На III стадии ширина раскрытия трещин возрастает, и этот процесс продолжается до момента достижения предельного давления p_{III} . Это момент, когда исчерпывается сопротивление проволоочной обмотки растяжению: происходит разрыв проволоки и фильтр разрушается.

В качестве расчетного значения давления $p_{расч}$ при определении энергозатрат для регенерации фильтров скважин может быть принято давление, лежащее на участке между вторым p_{II} и третьим p_{III} предельными давлениями, т. е. $p_{II} < p_{расч} < p_{III}$.

Расчетная схема при обработке фильтра «квазистатическим» давлением, возникающим от взрыва водород-кислородной газовой смеси (ВКГС), представлена на рис. 1. Проведение обработки в замкнутом объеме позволит с наибольшей эффективностью использовать энергию парогазовой полости, так как нарастание давления внутри фильтра будет вызвано термодинамическим расширением парогазовой полости вследствие высокой температуры перегретого пара. Расширение парогазовой полости инициирует движение жидкости (гидропоток) и ее сжатие («квазистатическое» давление).

Применение пакеров 5 позволяет изолировать обрабатываемый интервал высотой h' закольматированного фильтра от ствола скважины.

После заполнения рабочей камеры 1 газовой смесью $2H_2 + O_2$ ее поджигают. Реакция может протекать в виде двух режимов химического превращения: взрывного горения и детонации. Давление взрыва ВКГС на любой глубине H в замкнутом объеме [2]

$$p_{взр} = np_0 = n(p_{атм} + \rho gH), \quad (1)$$

где $p_{атм}$ – атмосферное давление; ρ – плотность жидкости; p_0 – начальное давление; n – степень увеличения давления, $n = 10$ (горение), $n = 9,8$ (детонация).

Удельная теплота взрыва для горения составляет $Q_r = 13,58 \cdot 10^6$ Дж/кг, показатель адиабаты продуктов взрыва $k_r = 1,17$. Для реакции детонации смеси $2H_2 + O_2$ с учетом диссоциации воды и молекул водорода, удельная теплота взрыва $Q_d = 8,715 \cdot 10^6$ Дж/кг, показатель адиабаты $k_d = 1,21$ [2].

При расчете необходимой энергии будем использовать следующие допущения: фильтр полностью закольматирован и непроницаем для жидкости; рабочая камера и отражатель выполнены абсолютно жесткими с недеформируемыми стенками; жидкость сжимаемая; материал водоприемной поверхности (проволочная навивка) и цементированная гравийная обсыпка работают на растяжение по закону Гука; давление в рабочей камере в продуктах взрыва $p_{взр}$ зависит от вида химического превращения и рассчитывается по (1).

После сжигания газовой смеси в рабочей камере задачу распространения волны давления в полости закольматированного фильтра можно рассматривать как распространение гидравлического удара в тупиковом трубопроводе, когда к участку фильтра высотой h' внезапно подключили источник высокого давления (рабочую камеру). Давление на границе «продукты взрыва – жидкость» резко возрастает на величину

$$\Delta p_{уд} = p_{взр} - p_0. \quad (2)$$

Волна давления со скоростью c перемещается к отражателю, имея давление на фронте, равное $\Delta p_{уд}$. Скорость жидкости в плоскости фронта возрастает от 0 до v_0 , ее можно найти по формуле

$$v_0 = \frac{\Delta p_{уд}}{\rho c}. \quad (3)$$

При подходе фронта волны давления к отражателю вся жидкость на участке длиной h' приобретает скорость v_0 , однако ее дальнейшее движение невозможно из-за наличия пакеров, и скорость столба жидкости на отражателе в момент прихода волны будет уменьшаться до 0.

При достижении прямой волной отражателя давление в полости фильтра на участке обработки длиной h' будет равно $p_1 = p_0 + \Delta p_{уд}$, при этом жидкость будет сжиматься, а стенки закольматированного фильтра – расширяться.

Будем считать, что энергия продуктов взрыва $W_{п.в}$ затрачивается на энергию гидропотока $W_{гп}$, работу по сжатию жидкости $W_{с.ж}$ и работу по декольматации стенок закольматированного фильтра $W_{д.с}$.

$$W_{гп} + W_{с.ж} + W_{д.с} = W_{п.в}. \quad (4)$$

Энергия гидропотока $W_{гп}$ может быть найдена как приращение кинетической энергии жидкости, находящейся между камерой и отражателем при изменении скорости от 0 до v_0 :

$$W_{гп} = mv_0^2 / 2 = \rho V_{0.ж} v_0^2 / 2 = \rho \pi r_b^2 h' v_0^2 / 2 = \pi r_b^2 h' \frac{\Delta p_{уд}^2}{2\rho c^2}, \quad (5)$$

где r_b – внутренний радиус фильтра; m – масса жидкости в полости фильтра объемом $V_{0.ж}$.

Для расчета c можно воспользоваться формулой [3] с учетом закрепления фильтра водовмещающими породами

$$c = \sqrt{\frac{E_{ж}}{\rho}} / \sqrt{1 + \frac{E_{ж}}{E_{с.г}} \frac{d_b \Psi}{\delta \alpha_{гп}}}, \quad (6)$$

где $\alpha_{гр}$ – коэффициент, учитывающий закрепление закольцованного фильтра водовмещающими породами и согласно решениям В. С. Дикаревского толщина стенки δ как бы увеличивается в $\alpha_{гр}$ (раз); $E_{с.г}$ – модуль упругости цементированной гравийной обсыпки, его можно принять равным аналогичному параметру для бетона $E_6 = (15000...20000)$ МПа; ψ – безразмерный коэффициент, учитывающий влияние проволочной навивки; $E_ж$ – модуль упругости жидкости.

Коэффициент $\alpha_{гр}$ можно найти по формуле

$$\alpha_{гр} = 1 + E_{гр} d_v / (2,7 E_{с.г} \delta), \quad (7)$$

где $E_{гр}$ – модуль упругости водовмещающих пород; для песка $E_{гр} = 39$ МПа.

Коэффициент ψ приближенно можно вычислить по формуле

$$\psi = \left[1 + \frac{E_{пр} \alpha_0}{E_{с.г} (1 - \alpha_0)} \right]^{-1}, \quad (8)$$

где $\alpha_0 = \frac{V_{пр}}{V} = F_{пр} / \delta h'$ – показатель содержания проволочной навивки по объему; $V_{пр}$ – объем проволоки, м³; V – общий объем стенки закольцованного фильтра, м³; $F_{пр}$ – площадь сечения проволочной навивки на участке фильтра высотой h' .

Энергия $W_{с.ж}$, идущая на сжатие жидкости, по теореме Клапейрона может быть найдена как работа сил давления на пути деформации $\Delta h'$ или как половина произведения силы давления на $\Delta h'$

$$W_{с.ж} = \frac{1}{2} \Delta p_{уд} \pi r_v^2 \Delta h' = \frac{1}{2} \Delta p_{уд} \Delta V_ж, \quad (9)$$

где $\Delta V_ж$ – уменьшение объема жидкости в закольцованном фильтре в результате сжатия.

Для определения $\Delta V_ж$ используем известное из теории упругости положение о том, что напряжение (давление $\Delta p_{уд}$) равно произведению модуля упругости жидкости $E_ж$ на относительное изменение объема $\frac{\Delta V_ж}{V_{0.ж}}$

$$\Delta p_{уд} = E_ж \frac{\Delta V_ж}{V_{0.ж}}. \quad (10)$$

Откуда, выразив $\Delta V_ж$ и подставив в (9), получим

$$W_{с.ж} = \frac{\pi r_v^2 h'}{2 E_ж} \Delta p_{уд}^2. \quad (11)$$

Энергия $W_{д.с.}$, идущая на деформацию стенок фильтра, состоит из энергии $W_{р.пр.}$, идущей на растяжение проволочной навивки и разрушение кольматирующих отложений (создание трещин в цементированной обсыпке) $W_{р.к.}$:

$$W_{д.с.} = W_{р.пр.} + W_{р.к.} \quad (12)$$

Энергия $W_{р.пр.}$ может быть найдена как работа деформации проволочной навивки фильтра на величину $\Delta r_{пр} = r'_{пр} - r_{пр}$, где $\Delta r_{пр}$ – приращение радиуса проволочной навивки в результате деформации; $r'_{пр}$ – значение радиуса в конце деформации; $r_{пр} \approx r_a$ – радиус проволочной обмотки до деформации. Выражая работу как половину произведения силы давления на удлинение $\Delta r_{пр}$, получим

$$W_{р.пр.} = \frac{1}{2} \Delta p_{уд} \cdot 2\pi r'_в h' \Delta r_{пр} \quad (13)$$

Для определения $\Delta r_{пр}$ используем известные выражения для расчета растягивающих напряжений $\sigma_{пр}$ в проволочной навивке площадью $F_{пр}$ от действия ударного давления $\Delta p_{уд}$ и закон Гука (допущения)

$$\sigma_{пр} = \frac{N_p}{F_{пр}} = \frac{\Delta p_{уд} r'_в h'}{F_{пр}}, \quad (14)$$

где N_p – равнодействующая сила от растягивающих напряжений $\sigma_{пр}$ в навивке при действии давления $\Delta p_{уд}$; $F_{пр}$ – площадь сечения проволочной навивки на участке фильтра h' .

Величина $F_{пр}$ равна

$$F_{пр} = \frac{f_{пр}}{S} h', \quad (15)$$

где $f_{пр}$ – площадь поперечного сечения одного витка проволоки; S – шаг навивки (расстояние в осях) проволоки диаметром d ; $S = d + t$, t – просвет (зазор) между витками.

Проволочная навивка при наличии сцепления с окружающей цементированной гравийной обсыпкой имеет более высокий модуль упругости $E'_{пр}$, чем нормативный $E_{пр}$, который корректируется коэффициентом $\psi_{пр}$, зависящим от прочности сцепления [4] $E'_{пр} = E_{пр} / \psi_{пр}$.

При кратковременном действии нагрузки предлагается определять $\psi_{пр}$ по формуле

$$\psi_{пр} = 1 - 0,7 \frac{R_{с.г} F}{N_p}, \quad (16)$$

где F – площадь поперечного сечения закольматированного фильтра; $F = \delta h'$; $R_{с.г}$ – сопротивление осевому растяжению цементированного гравия.

С одной стороны, деформация проволочной навивки

$$\varepsilon_{np} = \frac{\sigma_{np}}{E'_{np}}, \quad (17)$$

с другой:

$$\varepsilon_{np} = \frac{2\pi r'_{np} - 2\pi r_{np}}{2\pi r_{np}} \approx \frac{\Delta r_{np}}{r_b}. \quad (18)$$

Объединив (17) и (18) с учетом (14) и (15), получим

$$\Delta r_{np} = \frac{\Delta p_{уд} r_b^2 S}{f_{np} E'_{np}}. \quad (19)$$

Подставив (19) в (13), получим

$$W_{p,np} = \frac{\Delta p_{уд}^2 \pi r_b^3 S \psi_{np}}{f_{np} E'_{np}} h'. \quad (20)$$

Энергию создания трещин в цементированной гравийной обсыпке $W_{p,к}$ найдем как работу деформации цилиндрической оболочки, состоящей из цементированного гравия, толщиной δ и высотой h' на величину $\Delta r_{с.г}$. Аналогично (13) получим

$$W_{p,к} = \frac{1}{2} p_1 \cdot 2\pi r_b h' \Delta r_{с.г}, \quad (21)$$

где p_1 – давление в полости фильтра перед образованием трещин (первое предельное давление); $\Delta r_{с.г}$ – приращение радиуса цементированной гравийной обсыпки перед образованием трещин.

Равнодействующая сила от растягивающих напряжений в цементированной обсыпке при достижении давления p_1 равна

$$Np_1 = p_1 r_b h'. \quad (22)$$

Так как напряжения в цементированной гравийной обсыпке перед образованием трещин равны $R_{с.г}$, а в проволочной навивке напряжения достигают $\sigma_{np} = 2 \frac{E_{н.п}}{E_{с.г}} R_{с.г}$, согласно [1] для центрально-растянутых элементов

$$Np_1 = R_{с.г} \left(F + 2 \frac{E_{np}}{E_{с.г}} F_{np} \right). \quad (23)$$

Деформация слоя цементированного гравия равна

$$\varepsilon_{с.г} = \frac{R_{с.г}}{E_{с.г}} = \frac{\Delta r_{с.г}}{r_b} \quad (24)$$

Откуда выразим приращение радиуса $\Delta r_{с.г}$

$$\Delta r_{с.г} = \frac{R_{с.г}}{E_{с.г}} r_b \quad (25)$$

Объединяя (22) и (23), выразим p_1 и подставим вместе с $\Delta r_{с.г}$ в выражение (21)

$$W_{р.к} = \frac{R_{с.г}^2 \left(\delta + 2 \frac{E_{нр}}{E_{с.г}} \frac{f_{нр}}{S} \right) \pi r_b h'}{E_{с.г}} \quad (26)$$

Расчеты $W_{р.к}$ при максимальных значениях $R_{с.г}$ показывают, что величина $W_{р.к}$ на порядок меньше $W_{р.нр}$ и в расчетах ею можно пренебречь.

Реализованную энергию продуктами взрыва $W_{п.в}$ можно найти как сумму работ, произведенных волной сжатия $E_{в.с}$ и газовым пузырем $E_{п}$, т. е. $W_{п.в} = E_{в.с} + E_{п}$. Величину $E_{в.с}$ найдем через акустический КПД η_a , который представляет долю запасенной потенциальной энергии продуктов взрыва с начальным объемом $V_{0.п}$, уносимую волной сжатия:

$$E_{в.с} = \eta_a E_0 = \eta_a \frac{P_{взр} V_{0.п}}{k-1} \quad (27)$$

Определенное опытным путем значение η_a для подводного взрыва смеси $2H_2 + O_2$ составило 0,2 % [5]. Величину $E_{п}$ найдем из следующих соображений. За время t двойного пробега волны давления от границы раздела «пузырь – жидкость» до отражателя и обратно $t = \frac{2h'}{c}$ пузырь успеет расшириться с объема $V_{0.п}$ до $V_{1.п}$. Это время получило название времени формирования силового поля в замкнутых камерах [6].

Таким образом, оставшаяся в парогазовой полости энергия E_1 , способная произвести полезную работу, будет равна

$$E_1 = \eta_r E_0 \left(\frac{V_{0.п}}{V_{1.п}} \right)^{k-1} = \eta_r E_0 k_3, \quad (28)$$

где η_r – гидравлический КПД (отношение потенциальной энергии пузыря, равное работе против сил внешнего давления p , к начальной энергии пузыря E_0); $\eta_r = (5...8) \%$ [5]; k_3 – коэффициент использования энергии (для па-

рового пузыря, образующегося при электрогидравлическом разряде, $k_3 = 0,15 \dots 0,3$) [6].

Оставшаяся в парогазовой полости энергия после достижения максимальной деформации стенок фильтра будет равна

$$E_2 = \eta_r k_3 E_0 \left(\frac{V_{1.п}}{V_{2.п}} \right)^{k-1}, \quad (29)$$

где $V_{2.п}$ – объем парогазового пузыря в момент достижения максимальной радиальной деформации проволочной навивки фильтра.

Тогда работа E_n , произведенная газовым пузырем, равна

$$E_n = E_1 - E_2 = \eta_r E_0 k_3 \left[1 - \left(\frac{V_{1.п}}{V_{2.п}} \right)^{k-1} \right], \quad (30)$$

После подстановки всех слагаемых в (4) получим

$$\pi r_b^2 h' \Delta p_{уд}^2 \left[\frac{1}{2\rho c^2} + \frac{1}{2E_{ж}} + \frac{r_b S \Psi_{np}}{f_{np} E_{np}} \right] = \frac{p_{взр} V_{0.п}}{k-1} \left\{ \eta_a + \eta_r k_3 \left[1 - \left(\frac{V_{1.п}}{V_{2.п}} \right)^{k-1} \right] \right\}. \quad (31)$$

Задача оценки величины объема энергоносителя $V_{0.п}$ может быть решена в первом приближении, если пренебречь неиспользованной энергией парогазового пузыря:

$$V_{0.п} \approx \frac{\pi r_b^2 h' \Delta p_{уд}^2 \left[\frac{1}{2\rho c^2} + \frac{1}{2E_{ж}} + \frac{r_b S \Psi_{np}}{f_{np} E_{np}} \right] (k-1)}{p_{взр} (\eta_a + \eta_r k_3)}. \quad (32)$$

Как следует из (32), режим взрывного горения ($k_r = 1,17$) предпочтительнее детонации ($k_d = 1,21$).

Пример. Определить величины запасаемой энергии в единичном импульсе при горении ВКГС и общее количество энергии, необходимой для декольматации 1 м каркасно-стержневых фильтров с проволочной навивкой, технические характеристики которых представлены в табл. 23 [7], если $\delta = 0,06$ м; кубиковая прочность сцементированного гравия $\bar{R}_{с.г} = 2$ МПа; сопротивление растяжению $R_{с.г} = 0,37$ МПа; $E_{с.г} = 15000$ МПа. Проволочная навивка – сталь марки 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632–72), ее модуль упругости $E_{np} = 240000$ МПа. Просвет проволочной навивки $t = 2,5$ мм. Глубина $H = 70$ м; $\eta_a = 0,002$; $\eta_r = 0,05$; $k_3 = 0,15$.

Решение:

1. Параметры фильтров диаметрами 5, 6, 8, 10, 12, 16 дюймов возьмем из табл. 23 [7].

2. Расчеты $V_{0,n}$ производим по (32), запасаемую в камере энергию E вычисляем с учетом энергоемкости ВКГС. Данные расчетов приведены в табл. 1. Характер изменения удельных энергозатрат $E_{уд}$ на 1 м фильтра и объема газовой смеси $V_{0,n}$ (при н. у.) в камере в зависимости от диаметра фильтра d_b представлен на рис. 2.

Таблица 1

Результаты расчетов запасаемой энергии в камере

Типо-размер фильтра	$f_{пр}, м^2$	$S, м$	$r_b, м$	$h', м$	Скорость волны $c, м/с$	$N_p, кН$	$V_{0,n}, дм^3$	$V_{0,n}$ при н. у., $дм^3$	$E, кДж$	$E_{уд}$ на 1 м, $кДж$
СП-5Ф	$3,14 \cdot 10^{-6}$	0,0045	0,087	0,035	1239	21,6	0,10	0,8	5,93	169
СП-6Ф	$3,14 \cdot 10^{-6}$	0,0045	0,098	0,04	1219	27,9	0,16	1,28	9,3	232
СП-8Ф	$3,14 \cdot 10^{-6}$	0,0045	0,124	0,055	1178	48,5	0,40	3,2	23,3	423
СП-10Ф	$7,07 \cdot 10^{-6}$	0,0055	0,151	0,07	1168	74,6	0,63	5,0	36,4	520
СП-12Ф	$7,07 \cdot 10^{-6}$	0,0055	0,177	0,08	1131	100,5	1,1	8,8	63,9	800
СП-16Ф	$7,07 \cdot 10^{-6}$	0,0055	0,228	0,13	1074	210,4	3,4	27,2	209,2	1520

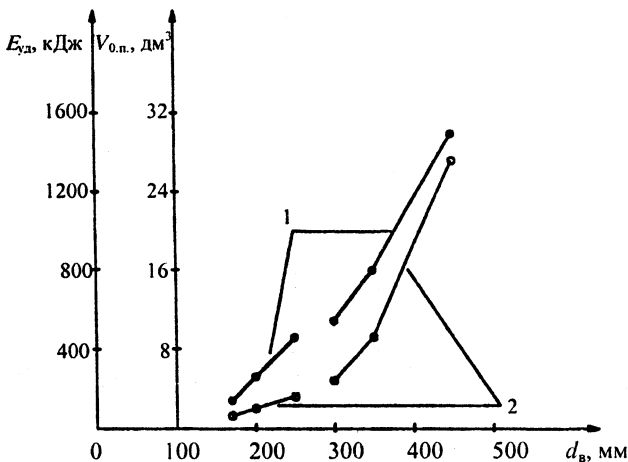


Рис. 2. Зависимость величины энергозатрат $E_{уд}$ на 1 м фильтра (1) и объема $V_{0,n}$ (при н. у.) ВКГС в камере (2) от диаметра фильтра d_b

ЛИТЕРАТУРА

1. СН и П 2.03.01-84 «Бетонные и железобетонные конструкции».
2. Андреев К. К., Беляев А. Ф. Теория взрывчатых веществ. – М.: Оборонгиз, 1960. – 595 с.

3. Г и д р а в л и ч е с к и й расчет и устройство водопроводов из железобетонных труб // В. С. Дикаревский, П. П. Якубчик, О. А. Продоус, Ю. М. Константинов. – К.: Будивельник, 1984. – 122 с.

4. Б а й к о в В. Н., С и г а л о в Э. Е. Железобетонные конструкции: Общий курс. – 5-е изд., перераб. и доп. – М., Стройиздат, 1991.

5. И в а ш е ч к и н В. В., К о н д р а т о в и ч А. Н., П р о к о п ч у к Д. А. Экспериментальное исследование газодинамического способа воздействия на фильтр и прифильтровую зону скважин // Водное хозяйство и гидротехническое строительство. – 1987. – Вып. 16. – С. 41–46.

6. О б о п т и м и з а ц и и формы разрядной камеры при электрогидроимпульсной штамповке / А. Г. Рябинин, К. К. Мертенс, В. С. Мамутов, В. А. Вагин // Высокоскоростная обработка материалов давлением: Тр. ХАИ. – 1982. – Вып. 8. – С. 120–125.

6. Г а в р и л к о В. М., А л е к с е е в В. С. Фильтры буровых скважин. – М.: Недра, 1985. – 334 с.

Представлена кафедрой
гидравлики

Поступила 24.09.2003