

8. Балашканд, М.И. Источники возбуждения упругих волн при сейсморазведке на акваториях/ М.И. Балашканд, С.А. Ловля. – М.: Недра, 1977. – 150 с.

9. Гаврилко, В.М. Фильтры буровых скважин/ В.М. Гаврилко, В.С. Алексеев.–3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985. – 334 с.

10. Ивашечкин, В. В. Регенерация скважинных и напорных фильтров систем водоснабжения: монография /В.В. Ивашечкин, А.М. Шейко, А.Н. Кондратович; под ред. В.В. Ивашечкина. – Минск: БНТУ, 2008. – 259 с.

11. Рябинин А.Г., Мертенс К.К., Мамутов В.С., Вагин В.А. Об оптимизации формы разрядной камеры при электрогидроимпульсной штамповке / Высокоскоростная обработка материалов давлением: тр. ХАИ. 1982, вып. 8. – С. 120-125.

*УДК 628.112*

В.В. Ивашечкин (БНТУ)

## **РЕГЕНЕРАЦИЯ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН ВЗРЫВОМ ХЛОРВОДОРОДНОЙ ГАЗОВОЙ СМЕСИ**

**Вводная часть.** Способ регенерации фильтров взрывом водородно-кислородной газовой смеси (ВКГС) в скважине экологически безопасен и обладает значительными энергетическими возможностями: при полном сгорании  $1 \text{ дм}^3$  смеси выделяется  $7,1 \text{ кДж}$  энергии. Продуктом взрыва здесь является водяной пар, поэтому для последующей или одновременной реагентной обработки разрушенных отложений используют специальные реагенты.

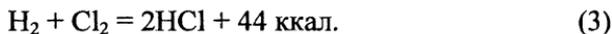
Определенный интерес представляет использование для регенерации фильтров скважин взрыва хлор-водородной газовой смеси (ХВГС), получаемой электролизом хлорида натрия [1-3]. Продуктом взрыва является хлористый водород, который растворяясь в воде, образует раствор реагента - соляной кислоты. И хотя энергетические возможности этого способа в  $1,7$  раза меньше, чем у водородно-кислородной газовой смеси (при сжигании  $1 \text{ дм}^3$  смеси выделяется  $4,17 \text{ кДж}$  энергии), он обеспечивает возможность одновре-

менного импульсно-реагентного воздействия на отложения. Получаемый электролизом хлорида натрия, раствор гипохлорита натрия является хорошим дезинфектантом [4].

**Основная часть.** Физические основы использования хлорводородной газовой смеси для регенерации водозаборных скважин. Реакция взаимодействия водорода с хлором относится к классу цепных реакций, в которой цепной процесс происходит в результате последовательного чередования реакций с участием активных центров: атомарного водорода и атомарного хлора, попеременно образующихся на очередных звеньях цепи в элементарных реакциях [5]:



Суммарное уравнение реакции имеет вид



Из уравнения следует, что из двух объемов водорода и хлора образуется 2 объема продуктов реакции, т.е. реакция идет без изменения объема, в то время как реакция горения водорода идет с уменьшением объема: из трех объемов газов ( $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ ) получается только 2 объема продуктов ( $2\text{H}_2\text{O}$ ), что указывает на некоторые преимущества реакции (3).

Предельная глубина воды в скважине для осуществления взрыва смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$  ограничена возможностью конденсации паров хлора с увеличением давления и снижением температуры. Связь температуры  $T$  (градусы Кельвина) и давления  $p$  (атм), при которых возможна конденсация хлора, выражается следующей формулой  $p = (T/200)^7$ . Подстановка в формулу температуры, характерной для скважин,  $T = 283 \text{ K}$ , позволяет определить давление начала конденсации хлора  $p = 11,3 \text{ атм}$ , что эквивалентно глубине воды  $H = 113 \text{ м}$ . Это указывает на некоторые ограничения применения смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$  по глубине. Хотя этот диапазон глубин перекрывает пьезометрические напоры в скважинах, каптирующих воду из большинства четвертичных и неглубоко залегающих отложений среднего девона.

Для сравнения следует отметить, что ограничение по глубине применения смеси  $2\text{H}_2 + \text{O}_2$  соответствует глубине  $H = 18000$  м, так как на этой глубине газовая смесь за счет сжатия превращается в жидкость.

Взрывоопасность хлор-водородной смеси определяется пределами взрываемости  $\pi_{\min}$  и  $\pi_{\max}$  по содержанию водорода  $\text{H}_2$  в исходной смеси. Пределы взрываемости определены экспериментально многими исследователями. Их данные несколько отличаются друг от друга. Хикито и Урано [6] в вертикальной трубе диаметром 4 см получили  $\pi_{\min} = 6\%$   $\text{H}_2$  при поджигании смеси у нижнего конца трубы и  $11\%$   $\text{H}_2$  при поджигании у верхнего конца трубы. Линдейер [7] для трубы диаметром  $d = 1,5$  см получил значения  $\pi_{\min} = 10,4\%$   $\text{H}_2$  и  $\pi_{\max} = 83,9\%$ . В.Н. Антонов, Ю.Е. Фролов и др. [8] определяли давление при центральном зажигании в сферической бомбе диаметром  $d = 15,6$  см, изготовленной из нержавеющей стали. Значение  $\pi_{\min}$  составило (5-6) %  $\text{H}_2$  при исходных давлениях (1-3) атм. Стебенев А.В. и др. [9] определили пределы взрывобезопасности хлор-водородной смеси при нормальных условиях при зажигании у закрытого конца как 10 и 85 % в трубе диаметром 50 мм, а в более узкой трубе диаметром 32 мм этот диапазон сокращался до 15-80 %.

Отсюда следует вывод о том, что хлорводородные смеси не имеют четко выраженных пределов взрываемости. При поджиге в верхней части труб, заполненных смесью, нижний предел взрываемости составляет около 11 %, а верхний предел – около 84 %.

Реакция (3) может происходить в режиме горения и детонации.

Детонация Детонация смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$  изучалась А.С. Соколицом и К.С. Щелкиным [10], которые экспериментально определили скорость фронта детонационной волны –  $D = 1741$  м/с.

Я.Б. Зельдович и С.Б. Ратнер [11] теоретически рассчитали скорость детонационной волны для смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$  на основе закона сохранения энергии для сильных ударных волн в идеальном газе ( $p_{уд} \gg p_0$ ). Приведенные в [11] расчетные данные параметров состояния продуктов детонации в точке Жуге при показателе адиабаты Пуассона  $k=1,24$  для начального давления  $p_0 = 760$  мм рт. ст. (1 атм) представлены в таблице 1

Как указано в [11], вследствие высокой температуры в зоне реакции, возможна диссоциация хлористого водорода и образование атомарного хлора  $2\text{HCl} \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{Cl}$ . Ниже приведены (см. таблицу 2)

расчетные равновесные составы продуктов при температуре детонации для начального давления  $p_0 = 760$  мм рт. ст.

Таблица 1 – Расчетные параметры состояния продуктов детонации смеси  $H_2 + Cl_2$  в точке Жуге [11]

Исходный состав	Давление $p_{н}$ , атм	Температура $T_{н}$ , К	Скорость детонационной волны $D$ , м/с
$H_2 + Cl_2$	21,1	3130	1720

Таблица 2 – Расчетные параметры состава продуктов детонации смеси  $H_2 + Cl_2$  в точке Жуге [11]

Температура $T_{н}$ , К	HCl	$H_2$	$Cl_2$	Cl	H
3130	80,11	5,74	0,2	12,51	1,44

Гидродинамические параметры стационарной ударной волны при детонации смеси  $H_2 + Cl_2$  можно рассчитать по известным зависимостям [12]. Согласно уравнению (3) плотность  $\rho_0$  смеси  $H_2 + Cl_2$  при нормальных условиях и удельная теплота  $Q$  взрывного превращения соответственно равны:

$$\rho_0 = \frac{0,0729 \text{ кг}}{0,0448 \text{ м}^3} = 1,627 \text{ кг/м}^3,$$

$$Q = \frac{184184 \text{ Дж}}{0,0729 \text{ кг}} = 2,527 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}.$$

Используя данные таблицы 1 и известные формулы [12] для смеси  $H_2 + Cl_2$  при  $p_0 = 105$  Па,  $T_0 = 273$  К,  $\rho_0 = 1,627$  кг/м<sup>3</sup>,  $Q = 2,527$  МДж/кг,  $k = 1,24$ , принимаем, что давление в точке Жуге  $p_n = 21,1 \cdot 105$  Па, давление на фронте ударной волны  $p_{уд} = 2p_n = 42,2 \cdot 10^5$  Па. Тогда

давление продуктов взрыва в замкнутом объеме при детонации

$$p_{\text{взр}} = \frac{P_{\text{н}}}{2} \approx 10,5 \cdot 10^5 \text{ Па}. \text{ Отсюда следует, что}$$

$$p_{\text{взр}} = \frac{P_{\text{н}}}{2} \approx 10,5 p_0. \quad (4)$$

Следовательно степень увеличения давления для смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$  равна  $m = p_{\text{взр}}/p_0 \approx 10,5$ .

С ростом глубины  $H$ , на которой производится подводный взрыв смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$ , давление взрыва возрастает пропорционально возрастающей плотности  $\rho_0^{\text{н}}$  исходной газовой смеси. Плотность  $\rho_0^{\text{н}}$  смеси на глубине  $H$  можно рассчитать, зная плотность  $\rho_0$  смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$  при нормальных условиях.

В дальнейшем, для расчета пульсаций продуктов детонации смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$ , можно использовать гипотезу «мгновенной детонации» [12] и принимать начальное давление в продуктах взрыва перед расширением равным  $p_{\text{взр}}$ .

Детонацию можно получить при поджигании горючей газовой смеси, в трубе у закрытого конца [13]. Здесь происходит расширение газа. Пламя действует как поршень: продукты сгорания занимают больший объем, чем первоначальный объем холодного горючего газа, толкают по трубе холодный газ. Поршень вызывает повышение давления в газе, которое распространяется со скоростью звука в невозмущенном газе. Фронт пламени ускоряется, генерируются волны сжатия, распространяются по несгоревшему газу. Все волны сжатия соединяются в одну ударную волну, которая нагревает вещество и начинает интенсивно идти реакция горения. Образуется детонационная волна, происходит разгон горения до высоких скоростей. Этот процесс изучался в работе [9]. Авторы исследовали сгорание смесей  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$  различного состава в вертикальных трубах диаметром 32 и 50 мм и длиной 1,5 м при нормальных начальных условиях.

**Взрывное горение.** Если процесс взрывного горения смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$  происходит в камере с замкнутым постоянным объемом при отсутствии теплообмена с окружающей средой, то давление в ней по мере протекания реакции повышается и может достигнуть максималь-

ной величины, называемой равновесным давлением адиабатического сгорания  $p_{\text{взр.г}}$ , приближенно определяемой по формуле термодинамики для изохорического процесса [14]

$$p_{\text{взр.г}} = \eta p_0 \frac{T}{T_0}, \quad (5)$$

где  $p_0$  – начальное давление исходной газовой смеси;  $T_0$  – начальная температура газовой смеси, К;  $T$  – температура продуктов взрывного горения, К;  $\eta$  – множитель, учитывающий, что из одного моля исходной газовой смеси образуется  $\eta$  молей продуктов сгорания.

Для стехиометрической смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$  принимаем  $\eta = 1$ ,  $T = 3000$  К (при допущении о режиме полного торможения диссоциации [14]),  $T_0 = 300$  К и получаем десятикратное повышение давление в замкнутой камере при горении, т.е.

$$p_{\text{взр.г}} = 10 p_0. \quad (6)$$

Степень возрастания давления в замкнутом объеме у смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$  при горении  $m = p_{\text{взр.г}} / p_0 = 10$ .

Для смеси 30 %  $\text{H}_2 + 70$  %  $\text{Cl}_2$  величина  $m = 8$  [9]. Для смесей, содержащих не более 10% водорода, рост давления в замкнутом объеме составляет 2,1-3,3 [8]. Следовательно, наибольший рост давления при сгорании в замкнутом объеме имеет место для смеси стехиометрического состава 1:1.

Процесс взрывного горения изучался в работе [9]. Авторы исследовали сгорание смесей  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$  различного состава в вертикальных трубах диаметром 32 и 50 мм и длиной 1,5 м при нормальных начальных условиях. По длине трубы устанавливали 4-е мембранных датчика давления типа ДД-10 для измерения давления ударной волны. Датчики Д1-Д3 фиксировали изменение давления в падающей ударной волне и были установлены по образующей трубы, а датчик Д4 был установлен в торце трубы и измерял отраженную волну. Распространение зоны горения фиксировалось термопарами Т1-Т3, размещенными аналогично датчикам давления Д1-Д3.

В опытах подтверждено, что на участке 1-3 произошло ускорение пламени до скорости  $u = 500$  м/с, которая во много раз выше

нормальной скорости горения, не превышающей  $u_n = 2-3$  м/с. На всех участках между датчиками скорость горения максимальна для смеси стехиометрического состава. Получено, что на последнем участке между датчиками скорость горения в 220 раз превышала нормальную скорость у смеси стехиометрического состава. У самых медленно горящих смесей с избытком водорода (>80 %) пламя ускорилося только в 4-5 раз.

Замеры давления показали, что давление, как и скорость пламени, повсюду достигает максимального значения у смеси стехиометрического состава. Для падающей ударной волны зарегистрировано возрастание давления до десятикратного значения для смеси стехиометрического состава, а для отраженной - до трехкратного значения по сравнению с падающей.

Перегретый хлористый водород образует в жидкости газовую полость высокого давления, которая совершает ряд затухающих пульсаций. При этом потенциальная энергия продуктов взрыва переходит в энергию волн сжатия и кинетическую энергию гидротока. В процессе пульсаций происходит растворение продуктов взрыва.

Степень растворения хлористого водорода зависит от глубины обработки и может достигать 450 объемов на один объем воды. Образуемая соляная кислота обеспечивает дополнительное реагентное воздействие на кольматирующие отложения. При растворении в скважинной воде остатков хлора, не прореагировавшего в ходе реакции (1) образуется раствор активного хлора, позволяющий производить хлорирование фильтра и прифилтровой зоны.

Таким образом, преимущества ХВГС заключаются в возможности проведения комбинированной импульсно-реагентной обработки скважины с одновременным хлорированием. Подобный вариант обработки фильтров скважин предпочтителен при наличии процессов биологического кольматажа.

Расчет энергозатрат для декольматации фильтров с помощью взрыва ХВГС. Известно, что осуществление газоимпульсной обработки фильтра в запакованном интервале позволяет наиболее эффективно использовать энергию взрыва газообразного энергоносителя для разрушения кольматирующих отложений. Поэтому расчет необходимых энергозатрат для декольматации фильтров с помощью

ХВГС произведем по методике, изложенной в работе [15], используя те же допущения.

Пусть взрывную камеру заполнили стехиометрической газовой смесью  $H_2 + Cl_2$ , в которой инициировали взрыв. Начальное давление в продуктах взрыва перед расширением рассчитываем по формулам (4) и (6), в зависимости от вида химического превращения.

**Пример:** определить необходимое количество стехиометрической смеси  $H_2 + Cl_2$  для создания сквозных трещин в закольматированной обсыпке при импульсной декольматации 1 м.п. каркасно-стержневых фильтров с проволочной навивкой, технические характеристики которых представлены в таблице 23 [16]. 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) с модулем упругости  $E_{пр} = 240000$  МПа. Просвет проволочной навивки  $t = 2,5$  мм. Глубина обработки  $H = 90$  м, которой соответствует давление  $p_0 = 1$  МПа.

**Решение:**

1. Параметры фильтров наиболее применяемых диаметров: 5, 6, 8, 10, 12 дюймов возьмем из таблицы 23 [16].

2. Примем режим химического превращения - детонацию. Согласно выражению (4) начальное давление в продуктах взрыва составит

$$p_{взр} \approx 10,6 p_0 = 10,6 \cdot 1 = 10,6 \text{ МПа} .$$

Давление на фронте волны давления в полости фильтра будет равно  $\Delta p_{уд} = p_{взр} - p_0 = 10,6 - 1 = 9,6$  МПа. Выполняем проверку достаточности величины  $\Delta p_{уд}$  для образования в закольматированной обсыпке при взрыве ХВГС сквозных трещин. Сравнение величины  $\Delta p_{уд}$  с величинами второго предельного давления  $p_{II}$  показывает, что для всех диаметров фильтров выполняется соотношение  $\Delta p_{уд} > p_{взр}$ , следовательно в закольматированной обсыпке будут образовываться сквозные трещины.

3. Акустический и гидравлический КПД примем такими же, как у смеси  $2\text{H}_2 + \text{O}_2$ , учитывая одинаковые значения степеней роста  $m$  давления после взрыва и близкие значения коэффициентов адиабаты:  $k = 1,21$  у смеси  $2\text{H}_2 + \text{O}_2$  и  $k = 1,24$  у смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$ . Тогда  $\eta_a \approx 0,002$ ,  $\eta_r = 0,05$ ,  $k_3 = 0,15$ . Соотношение  $V_{1.п.}/V_{2.п.}$  примем приближенно равным 0,8.

Результаты расчетов объема ХВГС в камере  $V_{0.п.}$  приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты расчетов запасаемой энергии в камере для декольматации 1 м.п. фильтров взрывом смеси  $\text{H}_2 + \text{Cl}_2$

Типо-размер фильтра	$f_{пр,2}$ м <sup>2</sup>	S, м	$r_{в,}$ м	$h'$ , м	c, м/с	$V_{0.п.}$ дм <sup>3</sup>	$V_{0.п.}$ при Н.У. дм <sup>3</sup>	$V_{0.п.}$ при Н.У. на 1 м.п., дм <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	8	9	11
СП-5Ф	$3,14 \cdot 10^{-6}$	0,0045	0,087	0,035	1239	0,2	2	57
СП-6Ф	$3,14 \cdot 10^{-6}$	0,0045	0,098	0,04	1219	0,3	3	76
СП-8Ф	$3,14 \cdot 10^{-6}$	0,0045	0,124	0,055	1178	0,8	8	142
СП-10Ф	$7,07 \cdot 10^{-6}$	0,0055	0,151	0,07	1168	1,2	12	171
СП-12Ф	$7,07 \cdot 10^{-6}$	0,0055	0,177	0,08	1131	2,1	21	263

## Выводы

1. На основании аналитического обзора литературных источников рассмотрены энергетические возможности хлор-водородной газовой смеси при двух режимах химического превращения: взрывном горении и детонации. Преимущества ХВГС заключаются в возможности проведения комбинированной импульсно-реагентной обработки скважины с одновременным хлорированием.

2. Выполнены расчеты необходимых энергозатрат для декольматации фильтров скважин с помощью взрывов ХВГС.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Способ регенерации водозаборной скважины: а.с. 1768722 СССР. /А.Д. Гуринович, В.Н. Ануфриев, В.В. Ивашечкин: Белор. политех. инс-т., 4426835/33; заявл. 31.07.89; опубл. 15.10.92. – Открытия. Изобрет., 1992. – № 38.
2. Устройство для регенерации фильтров скважин: а.с. 1512194 А1 СССР; МКИ E03B3/15, E21B 37/00 /А.Д. Гуринович, В.В. Ивашечкин, В.Н. Ануфриев, Б.В. Сабадах и Л.С. Ивашечкина; Белор. политехн. ин-т, № 4320394/23-33; заявл. 27.10.87; не публик.
3. Ануфриев В.Н. Технология обработки скважин хлорсодержащими реагентами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.04 / В.Н. Ануфриев. – Минск, 1999. – 29 с.
4. Ануфриев, В.Н. Исследование анодных покрытий титановых электродов при получении гипохлорита натрия электролизом водных растворов хлорида натрия/В.Н. Ануфриев, В.В. Ивашечкин, Е.А. Новиков, В.Б. Буссе-Мачукас// Энергетика - Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 1992, № 7-8. – С. 75-81.
5. Семенов, Н.Н. Цепные реакции / Н.Н.Семенов. – М.: Госхимтехиздат, 1934. – 156 с.
6. Hikita, T., Urano T. /J. Chem. Soc. Japan, 1957, v. 60, – P. 48-56.
7. Lindeijer E. W. Rec. Travaux chim. Pays Bas, 1937, v. 56, – P. 97-103.
8. Антонов, В.Н. Взрывоопасность смесей водорода с хлором / В.Н. Антонов, А.И. Розловский, А.С. Мальцева // Химическая промышленность. 1974, № 3, – С. 205-208.
9. Стеблев, А.В. Закономерности сгорания хлор-водородных смесей в трубах/ А.В. Стеблев, А.С. Мальцева, А.И. Розловский, Ю.Е. Фролов// Химическая промышленность. – 1976. – № 2. – С. 135-138.
10. Соколик, А.С. Детонация в газовых смесях. Изменение скорости детонационной волны с давлением/ А.С. Соколик, К.И. Щелкин // Журн. Физ. Химии.- 1934, т. 5, – С. 1459-1464.
11. Зельдович, Я.Б. Расчет скорости детонации в газах / Я.Б. Зельдович, С.Б. Ратнер// Журнал экспериментальной и теоретической физики. 1941. – т. 11, вып. № 1. – С.170-183.
12. Физика взрыва / Ф.А. Баум [и др.]. – М: Наука, 1975. – 704 с.

13. Математическая теория горения и взрыва / Я.Б. Зельдович [и др.]. – М.: Наука, 1980. – 478 с.

14. Розловский А.И. Основы техники взрывобезопасности при работе с горючими газами/А.И. Розловский. – М.: Химия, 1980. – 376 с.

15. Ивашечкин, В.В. Расчет энергозатрат при газоимпульсной регенерации фильтров водозаборных скважин// Энергетика–Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. – 2004. – № 1. – С. 77-86.

16. Гаврилко, В.М. Фильтры буровых скважин/ В.М. Гаврилко, В.С. Алексеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985. – 334 с.

*УДК 628.15*

Т.В. Козицин (БНТУ)

## **СРАВНЕНИЕ ДВУХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ВОДОПРОВОДНЫХ СЕТЕЙ**

Затраты на строительство и эксплуатацию водопроводных сетей составляют одну из наиболее важных статей расходов в целом по всей системе водоснабжения, и отклонение при проектировании от оптимального варианта сети приводит к значительному перерасходу средств. Поэтому очевидность подробного технико-экономического расчета не должна вызывать ни у кого сомнения. Однако в настоящее время на практике получил широкое распространение приближенный метод определения диаметров труб участков сети по так называемым «средним экономическим скоростям». В связи с этим было принято решение провести исследование, с целью определить к чему же приводит такой подход при проектировании.

Сравнение существующих методов расчета производилось на условной модельной сети, в которой для большей наглядности и упрощения расчетов отсутствовали конструктивные участки (рисунок 1). Узловые отборы были приняты фиксированными и равными во всех узлах сети.