

## РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ФИЛЬТРАЦИОННОГО ПОТОКА РЕАГЕНТА В ГРАВИЙНОЙ ОБСЫПКЕ ПРИ ГАЗОИМПУЛЬСНОЙ ОБРАБОТКЕ ФИЛЬТРОВ СКВАЖИН

**В. В. Ивашечкин**, доктор технических наук

**В. В. Веременик**, кандидат физико-математических наук

**А. Ю. Кочергин**, аспирант

**А. А. Левицкий**, студент

*Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Беларусь*

### Аннотация

Предложена методика расчета параметров фильтрационного потока реагента в гравийной обсыпке фильтра водозаборной скважины при газоимпульсно-реагентной обработке. Для определения кинематических параметров потока реагента, возникающего при пульсациях парогазового пузыря, получено дифференциальное уравнение движения реагента в системе «взрывная камера – гравийная обсыпка – воздушный колпак». Полученное уравнение решено методом Рунге – Кутты. С учетом ряда допущений получено аналитическое выражение для расчета максимальной скорости реагента во взрывной камере и гравийной обсыпке.

**Ключевые слова:** *кольматант, водозаборная скважина, реагент, фильтрационный поток, газовый пузырь, газоимпульсно-реагентная обработка.*

### Abstract

*V. V. Ivashchkin, V. V. Veremenuk, A. Yu. Kochergin, A. A. Levitsky*

### THE REAGENT FILTRATION FLOW PARAMETERS CALCULATION IN GRAVEL DUSTING DURING GAS-PULSE REGENERATION OF WELLS FILTERS

The article proposes a method for calculating the parameters of the filtration flow of the reagent in the gravel dusting of the filter of a water intake well during gas-pulse reagent treatment. To determine the kinematic parameters of the reagent flow that occurs during pulsations of a vapor – gas bubble, a differential equation of the reagent movement in the explosive chamber – gravel dusting-air cap system is obtained. The resulting equation was solved by the Runge – Kutta method. Taking into account a number of assumptions, an analytical expression was obtained for calculating the maximum speed of the reagent in the blast chamber and gravel dusting.

**Keywords:** *colmatant, water intake well, reagent, filtration flow, gas bubble, gas-pulse-reagent treatment.*

### Введение

Опыт эксплуатации водозаборных скважин показывает, что их производительность и дренажная способность существенно снижаются во времени вследствие зарастания фильтров и прифильтровых зон скважин различными химическими соединениями. Более высокая степень очистки фильтра и прифильтровой зоны водозаборных скважин достигается при использовании комбинированных методов, сочетающих гидравлическое, импульсное или вибрационное

воздействие с последующей или одновременной реагентной обработкой. Известны методы высоковольтных разрядов и пневмоимпульсов в реагенте.

Вопросами интенсификации кинетики массообмена и растворения кольматирующих отложений занимались Г. А. Аксельруд, Н. Н. Веригин, В. С. Алексеев, Г. М. Коммунар, А. Д. Молчанов, А. Е. Орадовская, А. М. Тугай, О. Я. Олейник и др. [1–9].

Процессы растворения кольматанта можно рассматривать как химические гетерогенные реакции, протекающие в несколько стадий [1, 2, 6]: перенос реагента (растворителя) к поверхности, на которой происходит реакция; собственно химическая реакция; отвод продуктов реакции от поверхности, то есть суммарная скорость процесса зависит от скоростей отдельных стадий и определяющей обычно является стадия, протекающая медленнее остальных.

Результаты теоретических исследований растворения кольматирующих осадков показывают, что растворение солей происходит в диффузионной области [2, 6]. При этом скорость растворения пропорциональна недостатку насыщения растворителя солями данного состава, величине удельной поверхности, на которой происходит химическая реакция растворения, температуре, типу реагента, факторам, определяющим гидродинамические условия.

Применительно к технологии обработки скважин по методу циклического задавливания реагента за контур фильтра предложена следующая зависимость для коэффициента массопереноса  $\beta$ , полученная из критериального уравнения [2]:

$$\beta = A_1 \sqrt{\frac{v}{dn}}, \quad (1)$$

где  $A_1$  – коэффициент, определяемый из формулы  $A_1 = (0,76 - 0,97) \left( \frac{D^4}{v} \right)^{\frac{1}{6}}$ ;

соответственно  $D$  – коэффициент молекулярной диффузии,  $v$  – коэффициент кинематической вязкости;

$v$  – скорость движения реагента;

$d$  – диаметр зерен [м];

$n$  – пористость закольматированных пород.

Для электрогидравлического разряда в реагенте предложена формула расчета коэффициента массопереноса [2]:

$$\beta = A_3 \sqrt{\frac{\bar{v}}{d}}, \quad (2)$$

где  $A_3 = \left( \frac{D^2}{v} \right)^{\frac{1}{2}}$ ,  $\bar{v}$  – средняя скорость

движения реагента, завязанная от энергии разряда  $E$  [м/с], радиуса каверны  $r$  [м], глубины  $H$  [м] и числа разрядов  $N_p$  в секунду,  $\bar{v} = EN_p / (H / \rho) r^2$ .

Анализ формул (1) – (2) показывает, что коэффициент массопереноса возрастает с увеличением скорости движения реагента в степени 0,5. При этом скорость реагента при электроразрядах прямо пропорциональна энергии в импульсе, частоте следования разрядов и радиусу каверны в квадрате, поэтому для обеспечения высокой скорости движения реагента необходимо очень мощное оборудование. Для дискретных импульсных методов, не обладающих эффектом вибрации, обеспечение высокой частоты следования мощных импульсов по этой причине проблематично. Разрядник предлагается размещать в герметичной камере в виде отрезка полиэтиленовой трубы с толщиной стенки 6–8 мм, заполненной водой [2, 3]. В зоне разряда величина давления достигает 100 МПа, что может вызвать разгерметизацию камеры разрядника и стекание разряда в раствор. Разряд кратковременный, время между импульсами составляет десятки секунд, то есть не создается необходимый вибрационный эффект при растворении отложений. Существенно снижает эффективность растворения то, что радиус каверны при электроразряде небольшой (всего 2–3 см), отсюда скорость движения реагента также небольшая и пульсации каверны практически не создает знакопеременных фильтрационных потоков в грунте, что не обеспечивает промывки отложений раствором реагента.

При проведении пневмовзрывов в реагенте герметизированную скважину заполняют реагентом и осуществляют поинтервальную пневмоимпульсную обработку [3, 5]. Недостатки этого метода: пневмоснаряд по техническим условиям не предназначен для работы в реагентах; эффективность применяемого реагента – дитионита натрия – снижается за счет его окисления кислородом воздуха; при пневмовзрыве кислород воздуха проникает в прифилтровую зону и усиливает процессы химического кольматажа [9].

В этом плане обработка фильтров газовым взрывом в реагенте более эффективна, так как размеры газового пузыря при подводном

газовом взрыве водорода многократно превышают размеры каверны электроразряда, в грунте возникают пульсирующие знакопеременные фильтрационные потоки реагента. Поэтому одним из путей повышения эффективности реагентных обработок является проведение одновременных газоимпульсно-реагентных обработок скважин. Для увеличения скорострельности газоимпульсной установки на основе водородно-кислородной газовой смеси предложено оснащать ее не погружным малопроизводительным электролизером, опускаемым в скважину в зону фильтра, а выносным высокопроизводительным газогенератором, размещаемым у оголовка скважины.

Цель настоящей работы – разработка методики расчета параметров фильтрационного потока реагента в гравийной обсыпке фильтра скважины при газоимпульсно-реагентной обработке.

На рис. 1 представлена расчетная схема по определению параметров фильтрационного потока реагента в гравийной обсыпке.

Над взрывной камерой закреплен воздушный колпак, а в кольцевых зазорах взрывной камеры и воздушного колпака установлены пакеры. Комбинация «пакер – колпак» призвана направить поток реагента при взрыве не в вышележащий ствол скважины, а в сторону газового колпака, что позволит снизить инерционные потери, разогнать реагент

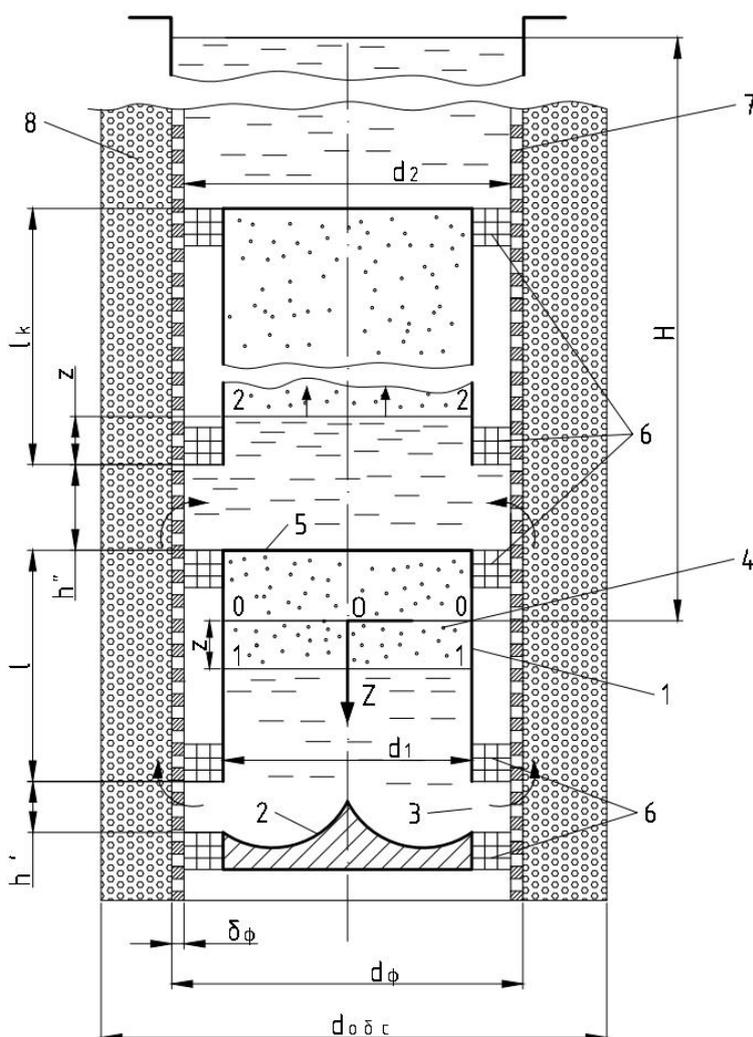


Рис. 1. Расчетная схема  
 1 – взрывная камера; 2 – отражатель; 3 – цилиндрическое отверстие;  
 4 – парогазовый пузырь; 5 – верхняя крышка взрывной камеры;  
 6 – пакеры; 7 – фильтр; 8 – гравийная обсыпка

во взрывной камере до высоких скоростей и интенсифицировать растворение кольматирующих отложений за счет создания прямого фильтрационного потока реагента в гравийной обсыпке. В связи с тем, что продуктами сгорания водородно-кислородной смеси являются перегретые водяные пары, паровой пузырь будет на первой стадии своего движения расширяться, а на второй стадии схлопываться за счет конденсации паров. Поэтому фильтрационный поток в гравийной обсыпке на первой стадии будет направлен в сторону воздушного колпака, а на второй – от воздушного колпака в сторону взрывной камеры, то есть будет знакопеременным.

С учетом высокой скорости распространения взрыва для взрывного горения давление перед расширением  $p_1$  принимаем равным давлению в замкнутом объеме после взрыва. Начальное давление продуктов взрыва перед расширением определяем по формуле

$$p_{взр} = mp_0, \quad (3)$$

где  $m$  – степень повышения давления во взрывной камере;  $p_0$  – давление на глубине взрыва  $H$  в скважине [Па],  $p_0 = p_{атм} + \rho gH$ ;  $p_{атм}$  – атмосферное давление.

Предполагаем, что при дальнейшем расширении полости с продуктами взрыва изменение их состояния происходит по политропе со средним значением показателя  $n$ :

$$p = p_{взр} \left( \frac{V_1}{V} \right)^n, \quad (4)$$

где  $p_{взр}$ ,  $V_1$  – начальное давление и исходный объем продуктов взрыва [Па];  $p$  – текущее давление [Па] и  $V$  – объем [м<sup>3</sup>].

За некоторый «разгонный» интервал времени скорость жидкости во взрывной камере возрастает от 0 до  $v_{1max}$  в сечении 1–1 и некоторое время сохраняет свое максимальное значение ( $v_{1max} = \text{const}$ ), затем из-за падения давления в продуктах сгорания и роста давления воздуха в воздушном колпаке (сечение 2–2) убывает до нуля.

Неизвестные  $z_1$  и  $v_{1max}$  можно определить из уравнения неустановившегося движения для этапа разгона жидкости в системе «рабочая камера – воздушный колпак» при допущениях: жидкость несжимаема, стенки фильтра скважины проницаемы, фильтрационный по-

ток движется в гравийной обсыпке, утечек реагента в пласт не происходит.

Уравнение движения имеет вид

$$\sum_{i=1}^3 m_i \frac{d^2 z}{dt^2} = P_{п.к.} - P_{в.к.} - \sum R, \quad (5)$$

где  $\sum_{i=1}^3 m_i \frac{d^2 z}{dt^2}$  – сумма сил инерции жидкости, то есть

$$m_1 \frac{d^2 z}{dt^2} = \rho \omega_1 [l + h' - (h + z)] \frac{d^2 z}{dt^2} - \text{сила}$$

инерции в рабочей камере;

$$m_2 \frac{d^2 z}{dt^2} = \rho \omega_1 (z + h'') \frac{d^2 z}{dt^2} - \text{сила инерции}$$

в воздушном колпаке;

$$P_{п.к.} = p_{взр} \left( \frac{h}{h + z} \right)^n \omega_1 - \text{сила давления}$$

в рабочей камере в сечении 1–1 [Н],

где  $\omega_1$  – площадь поперечного сечения рабочей камеры [м<sup>2</sup>],  $\omega_1 = \pi d_1^2/4$ ;

$$P_{в.к.} = p_k \left( \frac{l_k}{l_k - z} \right)^{n_1} \omega_1 - \text{сила давления}$$

со стороны воздушного колпака

с начальным давлением воздуха  $p_k$  [Па] ( $p_k \approx p_0$ ), приведенная к сечению 1–1 ( $n_1$  – коэффициент адиабаты воздуха) [Н].

Равнодействующая сил сопротивления  $\sum R$  может быть определена через сумму гидравлических потерь напора в системе «взрывная камера – гравийная обсыпка – воздушный колпак»:

$$\sum R = \rho g \omega_1 (h_{n1} + h_{n2} + h_{n3}), \quad (6)$$

где  $h_{n1}$  – потери напора на прохождение через фильтр при входе в гравийную обсыпку [м];  $h_{n2}$  – потери напора в гравийной обсыпке [м];  $h_{n3}$  – потери напора на прохождение через фильтр при выходе из гравийной обсыпки [м].

Потери напора  $h_{n1}$  обусловлены затратами энергии на прохождение через водопроницаемую поверхность фильтра. При турбулентном движении  $h_{n1}$  можно приближенно определить из формулы Дарси:

$$v_\phi = k_\phi \cdot I_\phi = k_\phi \cdot \frac{h_{i1}}{\delta_\phi}, \quad (7)$$

где  $v_\phi$  – средняя мгновенная скорость движения реагента при прохождении при прохождении через фильтр [м/с],

$$v_\phi = \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right) \frac{dz}{dt}; \quad \omega_2 - \text{площадь боковой}$$

поверхности участка фильтра, через который проходит реагент [м<sup>2</sup>],  $\omega_2 = \pi d_2 h'$ ;  $h'$  – величина выхлопного зазора взрывной камеры;  $I_\phi$  – гидравлический уклон фильтрационного потока при прохождении через фильтр;  $\delta_\phi$  – толщина фильтра [м],  $\delta_\phi = 20\text{--}30$  мм;  $k_\phi$  – коэффициент фильтрации каркасно-проволочного фильтра [м/с], с учетом его кольматации принимаем по данным табл. 37 [2].

Следовательно,

$$h_{n1} = \frac{v_\phi \cdot \delta_\phi}{k_\phi}; \quad (8)$$

Окончательно потери напора  $h_{n1}$  равны

$$h_{n1} = \frac{\delta_\phi \omega_1}{k_\phi \omega_2} \frac{dz}{dt}. \quad (9)$$

Скорость фильтрационного потока в гравийной обсыпке  $v_{обс}$  для случая ламинарной фильтрации равна, согласно [10],

$$v_{обс} = k_{обс} \cdot I_{обс} = k_{обс} \cdot \frac{h_{n2}}{l}, \quad (10)$$

где  $I_{обс}$  – гидравлический уклон фильтрационного потока в гравийной обсыпке;  $k_{обс}$  –

Тогда равнодействующая сил сопротивления  $\Sigma R$  на участках 1–2 после подстановки (9), (13), (14) в (6)

$$\Sigma R = \rho g \omega_1 \left\{ \frac{\delta_\phi}{k_\phi} \left[ \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right) + \left( \frac{\omega_1}{\omega_3} \right) \right] + \frac{l}{k_{обс}} \left( \frac{\omega_1}{\omega_{обс}} \right) \right\} \frac{dz}{dt}. \quad (15)$$

После подстановки (15) в (3) получим:

$$\rho \omega_1 (l - h + h' + h'') \frac{d^2 z}{dt^2} = p_{взр} \left( \frac{h}{h+z} \right)^n \omega_1 - p_k \left( \frac{l_k}{l_k - z} \right)^{n_1} \omega_1 - \rho g \omega_1 \left\{ \frac{\delta_\phi}{k_\phi} \left[ \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right) + \left( \frac{\omega_1}{\omega_3} \right) \right] + \frac{l}{k_{обс}} \left( \frac{\omega_1}{\omega_{обс}} \right) \right\} \frac{dz}{dt}. \quad (16)$$

После группирования получаем дифференциальное уравнение

$$\frac{d^2 z}{dt^2} + a \left( \frac{dz}{dt} \right) + b(h+z)^{-n} + c(l_k - z)^{-n_1} = 0, \quad (17)$$

где  $a = A/L$ ;  $b = B/L$ ;  $c = C/L$ ;

коэффициент ламинарной фильтрации материала гравийной обсыпки [м/с];  $h_{обс}$  – потери напора в гравийной обсыпке [м];  $l$  – длина пути фильтрации, равная длине взрывной камеры [м].

Тогда потери напора в гравийной обсыпке равны

$$h_{n2} = \frac{v_{обс} \cdot l}{k_{обс}}. \quad (11)$$

Выразив скорость в гравийной обсыпке через скорость реагента в сечении 1–1, получим

$$v_{обс} = \frac{\omega_1}{\omega_{обс}} \frac{dz}{dt}. \quad (12)$$

Окончательно потери напора  $h_{n2}$  равны

$$h_{n2} = \frac{l}{k_{обс}} \frac{\omega_1}{\omega_{обс}} \frac{dz}{dt}, \quad (13)$$

где  $\omega_{обс}$  – поперечное сечение гравийной обсыпки [м<sup>2</sup>] с наружным диаметром  $d_{обс}$ ,

$\omega_{обс} = \frac{\pi}{4} (d_{обс}^2 - d_\phi^2)$ , а  $d_\phi$  – внешний диаметр фильтра [м].

Потери напора на прохождении через фильтр при выходе из гравийной обсыпки  $h_{n3}$  в ствол скважины определяем аналогично потерям напора  $h_{n1}$ :

$$h_{n3} = \frac{\delta_\phi \omega_1}{k_\phi^2 \omega_3} \frac{dz}{dt}, \quad (14)$$

где  $\omega_3 = \pi d_\phi h''$ ;  $h''$  – величина расстояния от низа воздушного колпака до верха взрывной камеры [м].

$$L = l - h + h' + h''; \quad A = g \left\{ \frac{\delta_\phi}{k_\phi} \left[ \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right) + \left( \frac{\omega_1}{\omega_3} \right) \right] + \frac{l}{k_{\text{обс}}} \left( \frac{\omega_1}{\omega_{\text{обс}}} \right) \right\}; \quad B = -p_{\text{взр}} h^n / \rho; \quad C = p_{\text{к}} l_{\text{к}}^{n_1} / \rho.$$

Начальные условия  $t = 0; z = 0; dz / dt = 0$ .

Уравнение решено численным методом (Рунге – Кутта), составлена программа на ЭВМ. Решение получено в виде кривых во взрывной камере  $v = f(t)$ , фильтре  $v_\phi = f(t)$ , и гравийной обсыпке  $v_{\text{обс}} = f(t)$ .

Определим значения  $v_{1\text{max}}$  и  $z_1$  аналитически при следующих допущениях: 1) потери напора рассчитываем по скорости  $v_y$ , полученной из уравнения Д. Бернулли на случай установившегося движения на данном перемещении  $z$ .

Тогда уравнение (16) примет вид

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{p_{\text{взр}}}{\rho L} \left( \frac{h}{h+z} \right)^n - \frac{p_{\text{к}}}{\rho L} \left( \frac{l_{\text{к}}}{l_{\text{к}}-z} \right)^{n_1} - \frac{g}{L} \left\{ \frac{\delta_\phi}{k_\phi} \left[ \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right) + \left( \frac{\omega_1}{\omega_3} \right) \right] + \frac{l}{k_{\text{обс}}} \left( \frac{\omega_1}{\omega_{\text{обс}}} \right) \right\} v_{1y}. \quad (18)$$

Учитывая, что  $v = \frac{dz}{dt}$ ;  $\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{dv}{dt} = v \frac{dv}{dz}$ , проинтегрируем (18) и получим

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} v_1^2 &= \frac{p_{\text{взр}} h^n}{\rho L (h+z)^{n-1} (1-n)} - \frac{p_{\text{к}} l_{\text{к}}^{n_1}}{\rho L (n_1-1) (l_{\text{к}}-z)^{n_1-1}} - \\ &- \frac{g}{L} \left\{ \frac{\delta_\phi}{k_\phi} \left[ \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right) + \left( \frac{\omega_1}{\omega_3} \right) \right] + \frac{l}{k_{\text{обс}}} \left( \frac{\omega_1}{\omega_{\text{обс}}} \right) \right\} z v_{1y} + C. \end{aligned} \quad (19)$$

Постоянную интегрирования  $C$  найдем из начальных условий: при  $z = 0; v_1 = 0$ .

$$C = -\frac{p_{\text{взр}} h^n}{\rho L h^{n-1} (1-n)} + \frac{p_{\text{к}} l_{\text{к}}^{n_1}}{\rho L (n_1-1) l_{\text{к}}^{n_1-1}}. \quad (20)$$

Получим выражение для скорости неустановившегося движения  $v_1$  во взрывной камере при заданном  $z$  на стадии разгона:

$$v_1 = \sqrt{\frac{2}{L} \left\{ \frac{p_{\text{взр}} h}{\rho(n-1)} \left[ 1 - \left( \frac{h}{h+z} \right)^{n-1} \right] - \frac{p_{\text{к}} l_{\text{к}}}{\rho(n_1-1)} \left[ \left( \frac{l_{\text{к}}}{l_{\text{к}}-z} \right)^{n_1-1} - 1 \right] - \right.} \\ \left. - g \left\{ \frac{\delta_\phi}{k_\phi} \left[ \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right) + \left( \frac{\omega_1}{\omega_3} \right) \right] + \frac{l}{k_{\text{обс}}} \left( \frac{\omega_1}{\omega_{\text{обс}}} \right) \right\} v_{1y} z \right\}}. \quad (21)$$

При  $z = z_1$  получаем формулу для расчета  $v_{1\text{max}}$ .

$$v_{1\text{max}} = \sqrt{\frac{2}{L} \left\{ \frac{p_{\text{взр}} h}{\rho(n-1)} \left[ 1 - \left( \frac{h}{h+z_1} \right)^{n-1} \right] - \frac{p_{\text{к}} l_{\text{к}}}{\rho(n_1-1)} \left[ \left( \frac{l_{\text{к}}}{l_{\text{к}}-z_1} \right)^{n_1-1} - 1 \right] - \right.} \\ \left. - g \left\{ \frac{\delta_\phi}{k_\phi} \left[ \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right) + \left( \frac{\omega_1}{\omega_3} \right) \right] + \frac{l}{k_{\text{обс}}} \left( \frac{\omega_1}{\omega_{\text{обс}}} \right) \right\} v_{1\text{max}} z_1 \right\}}. \quad (22)$$

При подстановке условий, соответствующих окончанию этапа разгона:  $z = z_1$ ;  $v_{1y} = v_{1max}$ ;  $\frac{d^2z}{dt^2} = 0$  в выражение (18), и, выразив  $v_{1max}$ , получим:

$$v_{1max} = \frac{p_{взр} \left( \frac{h}{h+z_1} \right)^n - p_{к} \left( \frac{l_{к}}{l_{к}-z_1} \right)^{n_1}}{\rho g \left\{ \frac{\delta_{\phi}}{k_{\phi}} \left[ \left( \frac{\omega_1}{\omega_2} \right) + \left( \frac{\omega_1}{\omega_3} \right) \right] + \frac{l}{k_{обс}} \left( \frac{\omega_1}{\omega_{обс}} \right) \right\}} . \quad (23)$$

Этап разгона жидкости заканчивается достижением максимальной скорости в камере  $v = v_{1max}$  при  $z = z_1$ , которую можно найти из системы уравнений (22) и (23).

Этап квазиустановившегося движения ( $v_{1max} = const$ ) характеризуется максимальным динамическим воздействием потока реагента на стенку фильтра, максимальной скоростью фильтрационного потока в гравийной обсыпке и наибольшей интенсификацией растворения кольматирующих отложений.

На рис. 2 представлены результаты расчетов скорости реагента  $v = f(t)$  во взрывной камере с воздушным колпаком, полностью заполненным воздухом.

Из рис. 2 следует, что на участке «взрывная камера – гравийная обсыпка – воздушный колпак» поток реагента разгоняется примерно за 2,5 миллисекунды с достижением максимальной

скорости  $v = v_{1max}$  и примерно через 1,6 миллисекунды его скорость убывает до нуля. Количественные значения скоростей гидропотока в гравийной обсыпке и фильтре определяются площадями соответствующих сечений, так как в представленной постановке задачи утечек реагента в пласт не происходит.

Анализ уравнения движения (5) показывает, что с ростом количества водородно-кислородной смеси и объема воздуха в воздушном колпаке увеличивается время воздействия гидропотока на фильтр и продолжительность фильтрационного потока. Увеличение заряда во взрывной камере также приводит к возрастанию времени и эффективности динамического воздействия на отложения, приводящего к их диспергированию, расширению площади поверхности и интенсификации растворения.

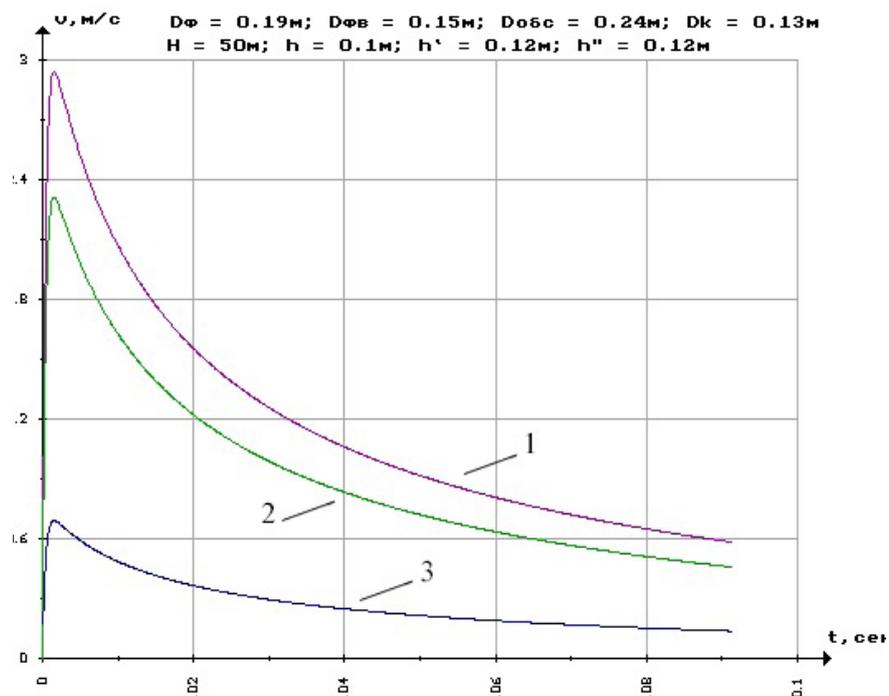


Рис. 2. Изменение скорости  $v$  реагента от времени  $t$  на этапе расширения продуктов взрыва водорода: 1 – во взрывной камере,  $v_{\phi} = f(t)$ ; 2 – при прохождении фильтра  $v_{обс} = f(t)$ ; 3 – в гравийной обсыпке  $v = f(t)$  при следующих данных:  $m = 10$ ;  $H = 50$  м;  $d_1 = 0,13$  м;  $d_2 = 0,15$  м;  $d_{обс} = 0,24$  м;  $d_{\phi} = 0,19$  м;  $\delta_{\phi} = 0,02$  м;  $k_{\phi} = 0,005$  м/с;  $k_{обс} = 0,0023$  м/с;  $h = 0,10$  м;  $h' = 0,12$  м;  $h'' = 0,12$  м;  $l = 0,5$  м;  $l_{к} = 0,8$  м;  $n = 1,17$ ;  $n_1 = 1,4$ .

### Выводы

1. Проанализированы формулы для определения коэффициента массопереноса  $\beta$  при комбинированных обработках скважин на воду методом циклического задавливания реагента за контур фильтра и электроразряда в реагенте. Анализ формул показал, что коэффициент массопереноса возрастает с увеличением скорости движения реагента в степени 0,5, причем скорость реагента, например, при электроразрядах, прямо пропорциональна энергии в импульсе, частоте следования разрядов и радиусу каверны в квадрате. Учитывая, что при электроразрядах размеры каверны незначительны, для реализации комбинированного импульсно-реагентного воздействия предложено использовать взрыв водорода в реагенте, который сопровождается образованием парогазового пузыря значительных размеров. Для увеличения частоты следования подводных взрывов предложено подавать водородно-кислородную смесь в фильтр от отдельного электролизера, установленного у оголовка скважины.

2. Для определения кинематических параметров потока реагента, возникающего при пульсациях парогазового пузыря, получено дифференциальное уравнение движения реагента в системе «взрывная камера – гравийная обсыпка – воздушный колпак» при подводном газовом взрыве в открытой снизу взрывной камере, находящейся в фильтре скважины. Уравнение решено численным методом (Рунге – Кутта), составлена программа на ЭВМ. Решение получено в виде кривых изменения скорости в функции времени: во взрывной камере  $v = f(t)$ , фильтре  $v = f(t)$  и гравийной обсыпке  $v_{\phi} = f(t)$ , и гравийной обсыпке  $v_{\text{обс}} = f(t)$ . Рассмотрен пример расчета.

3. С учетом ряда допущений получено аналитическое выражение для расчета максимальной скорости  $v_{1\text{max}}$  реагента во взрывной камере и гравийной обсыпке при различных параметрах взрыва и геометрических размерах скважины и скважинного устройства.

### Библиографический список

1. Аксельруд, Г. А. Растворение твердых веществ / Г. А. Аксельруд, А. Д. Молчанов. – М. : Химия, 1977. – 272 с.
2. Гаврилко, В. М. Фильтры буровых скважин / В. М. Гаврилко, В. С. Алексеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Недра, 1985. – 334 с.
3. Рекомендации по импульсно - реагентному восстановлению производительности скважин / В. С. Алексеев [и др.]; под общ. ред. В. С. Алексеева. – М. : ВНИИ «ВОДГЕО», 1982. – 92 с.
4. Алексеев, В. С. Восстановление дебита водозаборных скважин / В. С. Алексеев, В. Т. Гребенников. – М. : Агропромиздат, 1987. – 239 с.
5. Андреев, К. Н. Пневмореагентная регенерация скважин на воду : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.23.04 / К. Н. Андреев. – Москва, 1990. – 23 с.
6. Тугай, А. М. Продуктивність водозабірних свердловин в умовах кольматажу / А. М. Тугай, О. Я. Олейник, Я. А. Тугай : моногр. – Харків: ХНАМГ, 2004. – 240 с.
7. Гуринович А. Д. Питьевое водоснабжение из подземных источников: проблемы и решения / А. Д. Гуринович. – Минск : Технопринт, 2001. – 302 с.
8. Башкатов, Д. Н. Специальные работы при бурении и оборудовании скважин на воду : справ. / Д. Н. Башкатов [и др.] – М. : Недра, 1988. – 268 с.
9. Щеголев, Е. Ю. Регенерация водозаборных скважин импульсными методами : дис. ... канд. техн. наук : 05.23.04 / Е. Ю. Щеголев. – М. : 1987. – 140 л.
10. Веригин, Н. Н. О кинетике растворения солей при фильтрации воды в грунтах / Н. Н. Веригин // Растворение и выщелачивание горных пород : тр. Первого совещ. по вопр. выщелачивания водорастворимых горн. пород / М. П. Семенов [и др.]. – М. : Госстройиздат, 1957. – С. 84–113.