

УДК 628.112

## РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЗАТРУБНОЙ РЕАГЕНТНОЙ ЦИРКУЛЯЦИОННОЙ ПРОМЫВКИ ГРАВИЙНЫХ ФИЛЬТРОВ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН

Докт. техн. наук ИВАШЕЧКИН В. В.,  
канд. физ.-мат. наук ВЕРЕМЕНЮК В. В., инж. АВТУШКО П. А.

*Белорусский национальный технический университет*

E-mail: ivashechkin\_vlad@mail.ru

Целью работы являлось изучение темпов декольматации зернистого слоя гравийной обсыпки скважины при создании в нем промывного потока реагента с заданными гидродинамическими параметрами и определение общей продолжительности обработки. Рассмотрено радиальное движение раствора реагента при нагнетании его снаружи контура гравийной обсыпки фильтра, направленное к оси скважины в условиях квазиустановившегося режима фильтрации при равенстве расхода закачки и откачки реагента из скважины.

Закольматированный грунт гравийной обсыпки схематизирован в виде пористого кольцевого цилиндра с внешним радиусом, равным радиусу контура гравийной обсыпки, высотой, равной длине фильтра, совершенной по степени вскрытия пласта скважины. Внутренний радиус цилиндра равен радиусу фильтра. Задана начальная насыщенность грунта кольматантом. Принято, что через наружную боковую поверхность кольцевого цилиндра равномерно по всей высоте подается реагент с заданным расходом. Прифильтровая зона задана однородной, движение – квазиустановившимся.

Составлена система уравнений: объединенного уравнения движения и сохранения массы и обобщенного уравнения кинетики, описывающих кинетику растворения кольматанта в режиме осуществления затрубной промывки кольцевой гравийной обсыпки скважины с учетом изменения структуры пористой среды. Получено аналитическое решение системы уравнений, которое позволяет рассчитать в процессе выщелачивания концентрацию солей в реагенте и определить удельный объем отложений в точке гравийной обсыпки в любой момент времени в процессе закачки реагента. Получена аналитическая зависимость для расчета продолжительности полной регенерации слоя зерен грунта на внешнем контуре гравийной обсыпки. Для расчета продолжительности полной регенерации всей толщи обсыпки предложено разбить период регенерации на ряд фаз последовательного выноса солей из грунта. Продолжительность одной фазы принята равной времени прохождения реагентом кольцевого участка. Каждая фаза рассчитывается отдельно, так как начальный удельный объем отложений во входном сечении изменяется после каждой фазы, что требует корректировки граничных условий. Методика поэтапного расчета продолжительности регенерации до достижения требуемой степени декольматации реализована на ЭВМ.

**Ключевые слова:** затрубная реагентная циркуляционная промывка, параметр, гравийный фильтр, водозаборная скважина.

Ил. 3. Библиогр.: 10 назв.

# CALCULATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF OUT-PIPE REAGENT CIRCULAR IRRIGATION OF GRAVEL-PACKED FILTERS OF WATER SUPPLY WELLS

IVASHECHKIN V. V., VEREMENYUK V. V., AVTUSHKO P. A.

*Belorussian National Technical University*

The purpose of this work is the study of decolmatation rate of granular layer of gravel pack of well during creating inside of it flushing of reagent with given hydrodynamic parameters and determination the duration of treatment. This article deals with radical movement of chemical solutions by injection of it outside of gravel pack of filter when the flow directs to borehole axis under conditions of quasi-steady-state mode of filtration for equal yield of input and output reagent from borehole.

Colmataged layer of gravel pack is schematized in the form of porous ring cylinder with outside radius which is equal to radius of line of gravel pack and the height which is equal to the length of filter made in formation drilling and inside radius which is equal to radius of filter. Initial saturation of subsoil with colmatant is given. It was accepted that reagent with given rate flows through outside surface of ring cylinder equal along all height. Near-filtering zone is given uniform and movement is quasi-steady-state.

Equations' system is composed including: joint equation of movement and mass conservation and generalized equation of kinetics, which describes kinetics of colmatant dissolution in the regime of out-pipe watering of ring gravel pack of well taking into account the change of structure of porous medium. The analytic solution of equations' system was obtained, which allow to calculate salt content in reagent during the leaching process and to determine the specific volume of deposits in the point of gravel pack at any moment of time in the process of reagent injection. The analytic dependence was obtained for calculation of duration of complete regeneration of soil grains' layer of outer contour of gravel packing. For calculation of duration of full regeneration of the whole thickness of packing it is suggested to divide the regeneration period into a series of stages of salt transferring from subsoil. Duration of one stage is equal to time which is necessary for reagent to pass ring part. Each phase is calculated separately, as the initial specific volume of deposits in inflow section is changing after each previous phase, and this demands the correction of border conditions. Methods of stage calculation of regeneration duration for achievement of required level of decolmatation is realized on computer.

**Keywords:** annulus reagent circulation watering, parameters, gravel filter, water-supply well.

Fig. 3. Ref.: 10 titles.

Для регенерации гравийных фильтров скважин в мировой практике широко применяют химические методы стимулирования водоотбора: реагентную ванну, циклическое задавливание и циркуляционную промывку [1]. Последние два метода позволяют существенно интенсифицировать массообмен между реагентом и кольматантом и ускорить процесс удаления отложений. Однако обычно нагнетание реагента осуществляют изнутри каркаса фильтра, что затрудняет равномерный его подвод к закольматированной обсыпке, находящейся снаружи, так как реагент прежде всего поглощается наиболее проницаемыми участками и может безвозвратно уйти в пласт. В результате наиболее загрязненные участки фильтра обрабатываются хуже или остаются необработанными. Со временем это приводит к практически полному зарастанию гравийного фильтра, скважина становится неремонтопригодной. В последнее время предложены новые кон-

струкции скважин с затрубными системами циркуляционной регенерации, которые позволяют закачивать из бака реагент в трубчатую систему, находящуюся снаружи контура гравийной обсыпки [2]. При создании депрессии в фильтре скважины реагент проходит гравийную обсыпку, захватывается насосом и подается назад в бак. Продолжительность циркуляции реагента является важным технологическим параметром обработки, она зависит от целого ряда факторов: скорости движения реагента в пористой среде, крупности частиц обсыпки, степени коагуляции и т. д.

Цель настоящей статьи – изучение темпов декоагуляции зернистого слоя гравийной обсыпки скважины при создании в нем промывного потока реагента с заданными гидродинамическими параметрами и определение общей продолжительности обработки.

Рассмотрим физические основы массообмена при обработке зерен гравийной обсыпки методом реагентной промывки. В [3] рассмотрены гидродинамические условия обтекания жидкостью твердого сферического тела, являющегося моделью твердой дисперсной фазы и наиболее полно отражающего геометрические свойства частиц зернистого слоя. При реагентной промывке в пористой среде создается поток реагента, который обтекает частицы гравия. Гидродинамические условия обтекания сферических тел характеризуются числом Рейнольдса  $Re = \frac{v'd}{\nu}$ , где  $v'$  – скорость обтекания;  $d$  – диаметр шара;  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости. Диффузия в движущейся жидкости ( $Re > 0$ ) описывается дифференциальным уравнением конвективной диффузии [3]. Решение уравнения для обтекания единичного шара имеет вид

$$Nu = A\sqrt[3]{Pr}\sqrt{Re}, \quad (1)$$

где  $A \in (0,80-0,95)$  – численная константа;  $Pr$  – критерий Прандтля.

В связи с тем, что точное решение для уравнений конвективной диффузии при обтекании зернистого слоя, составленного из ансамбля шаров, отсутствует, для зернистого слоя рядом исследователей рекомендуется критериальное уравнение (1) при некоторой корректировке значения константы  $A$ . При этом делается допущение, что на каждой сферической поверхности возникает диффузионный слой, одинаковый для всех поверхностей [3].

Тогда, распространив уравнение (1) на зернистый слой и подставив выражения:  $Re = \frac{v'd}{\nu}$ ;  $v' = \frac{v}{n}$ ;  $Pr = \frac{\nu}{D}$ ;  $Nu = \frac{\beta d}{D}$  в (1), получим формулу для коэффициента массоотдачи  $\beta$

$$\beta = \frac{A_1 D^{2/3}}{\nu^{1/6}} \sqrt{\frac{\nu}{nd}}, \quad (2)$$

где  $A \in (0,760-0,996)$ ;  $v$  – средняя скорость фильтрации жидкости в зернистом слое;  $n$  – пористость зернистого слоя;  $D$  – коэффициент диффузии.

Исследованиями в области изучения гидравлики зернистых материалов, массопереноса в водонасыщенных горных породах и кинетики растворения

кольматирующих отложений при восстановлении дебита скважин с использованием химических реагентов занимались Д. М. Минц, Н. Н. Веригин, А. Е. Орадовская, В. М. Беляков, В. С. Алексеев, Г. М. Коммунар, А. М. Тугай и другие [4–10]. Установлено, что собственно химическая реакция растворения, происходящая на поверхности твердого тела, идет быстрее, чем перенос вещества к поверхности растворения и от нее, осуществляемый молекулярной и конвективной диффузиями [4]. Скорость растворения солей прямо пропорциональна недостатку насыщения жидкости солями данного состава и величине поверхности, на которой происходит реакция растворения. Дифференциальное уравнение кинетики растворения солей металлов в водных растворах и кислотах имеет вид [4, 5]

$$\frac{db}{dt} = \frac{\omega\beta}{\rho_{oc}} [C_m - C(t)], \quad (3)$$

где  $b$  – удельный объем отложений (количество вещества, перешедшее в раствор за время от 0 до  $t$ );  $\omega$  – удельная поверхность;  $\rho_{oc}$  – плотность кольматирующих отложений;  $C(t)$  – концентрация солей в реагенте в момент времени  $t$ ;  $C_m$  – максимальная концентрация солей в реагенте (концентрация насыщенного раствора).

Выражения для расчета изменяющихся в процессе декольматации значений пористости  $n$ , насыщенности порового пространства осадком  $a$ , удельного объема отложений  $b$ , удельной поверхности  $\omega$  и размера зерен грунта  $d$  имеют вид [5]:

$$n = n_0 - b; \quad a = \frac{b}{n_0} = \frac{n_0 - n}{n_0}; \quad \omega = \omega_0 \left(1 + \alpha b\right)^{\frac{2}{3}}; \quad d = d_0 \left(1 + \alpha b\right)^{\frac{1}{3}}, \quad (4)$$

где  $n_0$ ,  $\omega_0$ ,  $d_0$  – соответственно пористость, удельная поверхность и размер зерен незакольматированной гравийной обсыпки скважины;  $\alpha = \frac{1}{1 - n_0}$ .

В выражение для расчета суммарной поверхности  $\omega_0$  зерен шаровой формы диаметром  $d_0$  в единице объема  $\omega_0 = 6 \frac{1 - n_0}{d_0}$  [6] следует ввести понижающие коэффициенты  $\xi$  и  $\zeta$ , учитывающие соответственно степень экранизации поверхности зерен пузырьками газа и долю нерастворимых соединений в составе кольматанта. Тогда  $\omega_0 = 6\xi\zeta \frac{1 - n_0}{d_0}$ .

С учетом (2) и (4) уравнение (3) можно записать в виде

$$\frac{db}{dt} = -\frac{B_i}{\rho_{oc}} f(b) [C_m - C], \quad (5)$$

где

$$B_i = A_1 \left(\frac{D^4}{v}\right)^{\frac{1}{6}} \omega_0 \sqrt{\frac{v}{d_0}}; \quad A_1 \in 0,760 - 0,997; \quad f(b) = \sqrt{\frac{1 + \alpha b}{n_0 - b}}.$$

Фильтрация растворов в грунтах при  $n = n_0 = \text{const}$  в условиях их физико-химического взаимодействия описывается для радиального потока в виде объединенного уравнения движения и сохранения массы [9]

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( rD \frac{\partial C}{\partial r} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial (rvC)}{\partial r} - \rho_{\text{ос}} \frac{\partial b}{\partial t} = n_0 \frac{\partial C}{\partial t}, \quad (6)$$

где  $v$  – средняя скорость фильтрации в радиальном сечении радиусом  $r$  при нагнетании раствора реагента снаружи контура гравийной обсыпки фильтра, направленная к оси скважины.

В условиях квазиустановившегося режима фильтрации при равенстве расходов закачки  $Q_{\text{з}}$  и откачки  $Q_{\text{о}}$  из скважины ( $Q_{\text{з}} = Q_{\text{о}} = Q$ ) скорость фильтрации равна

$$v = \frac{Q}{2\pi mr} = \frac{q}{r}, \quad (7)$$

где  $Q$  – расход, подаваемый в затрубную систему скважины, равный расходу откачки из скважины;  $m$  – мощность (высота) пласта;  $q = \frac{Q}{2\pi m}$  – удельный расход.

Схематизируем закольматированный грунт гравийной обсыпки в виде пористого кольцевого цилиндра с наружным радиусом  $r_1$  и высотой  $m$ , равной длине фильтра совершенной по степени вскрытия пласта скважины. Внутренний радиус цилиндра равен радиусу скважины  $r_c$ . Расчетная схема реагентной промывки гравийной обсыпки представлена на рис. 1.

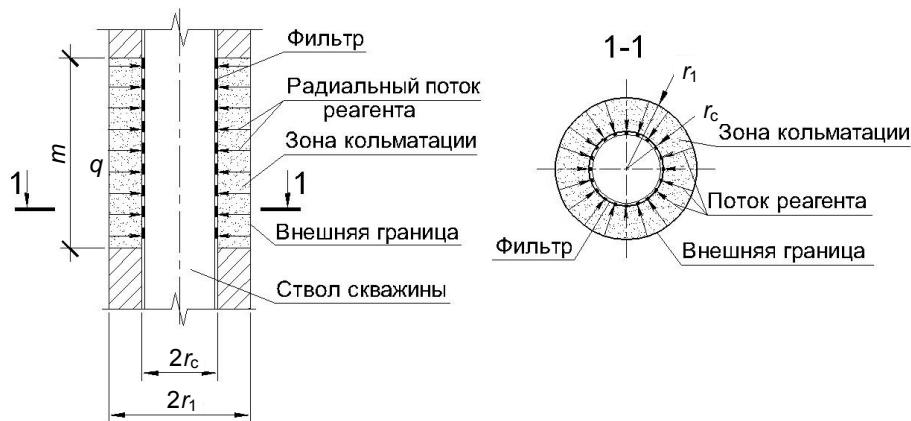


Рис. 1. Расчетная схема затрубной реагентной промывки гравийной обсыпки скважины

Начальная насыщенность грунта кольматантом составляет  $b = N_0$ . Через наружную боковую поверхность кольцевого цилиндра равномерно по всей высоте подается реагент с расходом  $Q$ . Принимаем прифилтровую зону однородной, движение – квазиустановившимся. Согласно [10], при больших значениях критерия Пекле  $Pe = \frac{vd}{D}$ , когда скорость фильтра-

ции значительно больше скорости диффузии, в первом слагаемом уравнения (6) принимают  $D = 0$ .

Уравнения движения и сохранения массы (6) и уравнение кинетики (5) дают следующую систему:

$$\begin{cases} n_c \frac{\partial C}{\partial t} - \frac{q}{r} \frac{\partial C}{\partial r} + \rho_{oc} \frac{\partial b}{\partial t} = 0; \\ \frac{\partial b}{\partial t} = -\Phi C_m - C, \end{cases} \quad (8)$$

где  $\Phi = \frac{B_i}{\rho_{oc}} f b$ ;  $n_c$  – среднее значение пористости грунта.

Вначале используем только (9) для оценки времени  $T_0$ , за которое во входном сечении кольцевого цилиндра ( $r = r_1$ ) кольматирующие отложения растворятся ( $b = 0$ ), начиная с момента времени начала подачи реагента. Для нахождения  $T_0$  проинтегрируем уравнение (9) при  $C = C_0$ ,  $r_1 \equiv C_0$ .

Преобразуем функцию  $f(b)$

$$f b = \sqrt{\frac{1 + \alpha b}{n_0 - b}} = \sqrt{\frac{1 - n_0 - b}{1 - n_0} \frac{1}{n_0 - b} - 1} = \frac{1}{\sqrt{1 - n_0}} \sqrt{\frac{1}{n_0 - b} - 1}. \quad (10)$$

Подставим (10) в (9) и получим

$$\int_{N_0}^0 \frac{db}{\sqrt{\frac{1}{n_0 - b} - 1}} = - \frac{B_i}{\rho_{oc} \sqrt{1 - n_0}} C_m - C_0 T_0. \quad (11)$$

Вычислив интеграл в левой части (11) с помощью замены  $\sqrt{\frac{1}{n_0 - b} - 1} = s$ ,  $b = n_0 - \frac{1}{s^2 + 1}$ ,  $db = \frac{2s ds}{s^2 + 1}^2$ , находим продолжительность полной регенерации  $T_0$  слоя зерен грунта во входном сечении кольцевого цилиндра

$$T_0 = \frac{\arctg \left( \sqrt{\frac{1}{n_0 - N_0} - 1} \right) + (n_0 - N_0) \sqrt{\frac{1}{n_0 - N_0} - 1}}{\frac{B_i}{\rho_{oc} \sqrt{1 - n_0}} C_m - C_0}, \quad (12)$$

где  $B_i = A_1 \left( \frac{D^4}{v} \right)^{1/6} \omega_0 \sqrt{\frac{q}{r_1 d_0}}$ . Эта формула дает оценку снизу времени полной очистки прифилтровой зоны.

Разобьем весь процесс регенерации пористого кольца на два периода времени. В течение первого периода ( $t < T_0$ ) во всем объеме пористого кольца будет сохраняться остаточный кольматант. Во второй период ( $t > T_0$ ) граница между зоной очищенного и загрязненного грунтов будет

перемещаться от внешнего контура кольца к внутреннему постепенно и в конечный момент времени  $T_{\text{кон}}$  достигнет фильтра скважины.

Целесообразно разбить весь период регенерации на ряд фаз последовательного выноса солей из грунта. Продолжительность одной фазы  $T_{\Phi}$  принимаем постоянной и равной времени прохождения реагентом участка

$(r_1 - r_c)$ , т. е.  $T_{\Phi} = \frac{r_1^2 - r_c^2}{2q_1}$ , где  $q_1 = \frac{q}{n_c}$ . Будем считать, что во входное сечение

непрерывно подается свежий реагент с начальной концентрацией  $C$ ,  $t, r_1 = C_0$ . Реагент по мере движения от внешнего контура насыщается солями и удаляется за пределы пористого кольца через выходное сечение. К концу первой фазы во входном сечении начальный удельный объем отложений  $N_0$  уменьшится и составит  $N_{01} = b(T_{\Phi})$ , что потребует при последующем расчете второй фазы изменения граничных условий на внешнем контуре пористого кольца и т. д.

Для упрощения расчетов функцию  $f$   $b$  будем определять при среднем удельном объеме отложений  $b_c$ , тогда система уравнений (8), (9) для расчета реагентной промывки примет вид:

$$\begin{cases} n_c \frac{\partial C}{\partial t} - \frac{q}{r} \frac{\partial C}{\partial r} - \Phi_c \rho_{\text{ос}} C_m - C = 0; & (13) \\ \frac{\partial b}{\partial t} = -\Phi_c C_m - C, & (14) \end{cases}$$

где  $\Phi_c = \frac{B_i}{\rho_{\text{ос}}} f b_c$ .

Начальные и граничные условия:

$$b(0, r) = N_0; \quad C(0, r) = C_0; \quad C(t, r_1) = C_0; \quad t > 0; \quad r_c \leq r \leq r_1. \quad (15)$$

Положив  $C_1(t, r) = C_m - C(t, r)$ ,  $\alpha = \frac{\Phi_c \rho_{\text{ос}}}{n_c}$ ,  $q_1 = \frac{q}{n_c}$ , получим систему:

$$\begin{cases} \frac{\partial C_1}{\partial t} - \frac{q_1}{r} \frac{\partial C_1}{\partial r} + \alpha C_1 = 0; & (16) \\ \frac{\partial b}{\partial t} = -\Phi_c C_1. & (17) \end{cases}$$

Граничные и начальные условия примут вид:

$$b(0, r) = N_0; \quad C_1(0, r) = C_1(t, r_1) = C_{01}, \quad (18)$$

где  $C_{01} = C_m - C_0$ .

Положим  $C_1(t, r) = e^{-\alpha t} u(t, r)$ . Тогда уравнение (16) и граничные и начальные условия принимают вид:

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \frac{q_1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} = 0; \quad u(0, r) = C_{01}; \quad u(t, r_1) = C_{01} e^{\alpha t}. \quad (19)$$

Делая преобразование Лапласа в (19), получаем задачу для изображения  $\bar{u}(s, r) = \int_0^{\infty} u(t, r) e^{-st} dt$ :

$$s\bar{u} - C_{01} - \frac{q_1}{r} \frac{d\bar{u}}{dr} = 0; \quad \bar{u}(s, r_1) = \frac{C_{01}}{s - \alpha}. \quad (20)$$

Решая (20), получаем  $\bar{u} = \left( \frac{C_{01}}{s - \alpha} - \frac{C_{01}}{s} \right) e^{-Rs} + \frac{C_{01}}{s}$ , где  $R = \frac{r_1^2 - r^2}{2q_1}$ . Возвращаясь к оригиналам, имеем

$$u(t, r) = C_{01} [1 - H(t - R)] + C_{01} e^{\alpha(t - R)} H(t - R),$$

где  $H(x) = \begin{cases} 1 & \text{при } x > 0; \\ 0 & \text{при } x < 0 \end{cases}$  – функция Хэвисайда.

Окончательно получаем при  $t > 0$  и  $r \in [r_c, r_1]$

$$C_1(t, r) = C_{01} [1 - H(t - R)] e^{-\alpha t} + C_{01} e^{-\alpha R} H(t - R).$$

Отметим, что параметр  $R = R(r) = \frac{r_1^2 - r^2}{2q_1}$  имеет размерность времени и  $R(r_c) = T_{\Phi}$ . На временном участке  $t \in [0, R]$

$$C_1(t, r) = C_{01} e^{-\alpha t}, \quad (21)$$

т. е. на расстоянии  $r$  от оси скважины происходит активное растворение кольматанта, а величина  $C_1(t, r) = C_m - C(t, r)$  экспоненциально уменьшается.

Теперь, используя уравнение (17) и соотношение (21), найдем изменившееся значение  $b_R$  за время  $R = R(r)$  на расстоянии  $r$  от оси скважины

$$b_R = N_0 - \frac{n_c}{\rho_{oc}} [1 - e^{-\alpha R}] C_{01}. \quad (22)$$

По формуле (22) можно определить удельный объем отложений  $b(t)$  в любой точке гравийной обсыпки в любой момент времени в процессе только одной фазы закачки реагента. Каждая фаза должна рассчитываться отдельно, так как начальный удельный объем отложений  $N_0$  изменяется после каждой фазы, что требует корректировки в условиях (18) и определения  $b_c$  и  $n_c$  в уравнениях (13), (14).

Анализ зависимости (21) показывает, что перепад концентраций  $C_{01} = C_m - C_0$  движущегося раствора, определяемый в соответствующей точке гравийной обсыпки, снижается по экспоненциальной зависимости с показателем степени  $\alpha = \frac{\Phi \rho_{oc}}{n_c}$ , что указывает на то, что интенсивность



растворения отложений при прочих равных условиях возрастает с ростом скорости реагента  $\left(\sqrt{v} = \sqrt{\frac{q}{r}}\right)$  и удельной поверхности кольматанта  $\omega_0$ .

Причем при движении реагента от внешнего кольца к внутреннему скорость фильтрации возрастает, и благодаря этому фактору улучшается массообмен, но в то же время перепад концентраций на фронте раствора  $C_m - C$  уменьшается из-за наработки раствора продуктами реакции, поэтому эти процессы частично компенсируют друг друга.

Как было сказано выше, значение  $b$  в конце первой фазы промывки может не достигнуть планируемого в процессе обработки значения  $b_0$  даже при больших значениях  $C_m$  и требуется непрерывная подача свежего раствора с последующими фазами обработки, чтобы обеспечить нужную степень декольматации. К концу первой фазы начальный удельный объем отложений  $N_0$  уменьшится и составит  $N_{01}$ , к концу второй фазы –  $N_{02}$  и т. д. Разбив процесс выноса солей на фазы, можно определить конечное число фаз  $n_{\text{кон}}$  и полное время регенерации  $T_{\text{кон}} = n_{\text{кон}} T_{\text{ф}}$ , когда вся толща пористого кольца будет освобождена от кольматанта. Предложенная методика расчета реализована на ЭВМ.

Графики изменения удельного объема  $b$  кольматирующих отложений от времени  $t$  обработки скважины для нескольких характерных диаметров частиц  $d_0 = 1,0\text{--}4,0$  мм представлены на рис. 2.

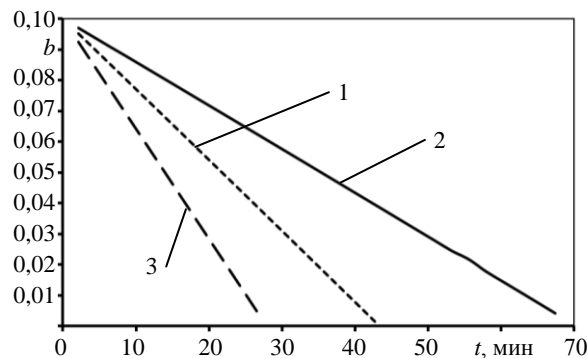


Рис. 2. Изменение удельного объема  $b$  кольматирующих отложений от времени  $t$  обработки скважины ( $b(0) = N_0 = 0,1$ ;  $n_0 = 0,4$ ;  $D = 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с;  $C_m = 40$  кг/м<sup>3</sup>;  $C_0 = 0,4$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{ос}} = 2250$  кг/м<sup>3</sup>;  $r_1 = 0,16$  м;  $r_c = 0,08$  м;  $m = 6$  м;  $Q = 1$  л/с;  $\zeta = 0,9$ );  
1 –  $d_0 = 2,5$  мм; 2 – 4,0 мм; 3 – 1,0 мм

Анализ графика на рис. 2 показывает, что удельный объем кольматирующих отложений уменьшается в процессе реагентной промывки по линейной зависимости, а интенсивность регенерации растет с уменьшением крупности частиц гравийной обсыпки, что обусловлено увеличением площади контакта реагента и кольматанта.

Графики изменения продолжительности растворения  $T_{\text{кон}}$  кольматирующих отложений на границах кольматационного кольца для ряда диаметров частиц гравийной обсыпки скважины представлены на рис. 3. Из анализа графиков на рис. 3 следует, что с увеличением диаметра закольматированных частиц гравийной обсыпки продолжительность регенерации возрастает от 29 до 70 мин при увеличении диаметра частиц гравия от 0,5 до 4,5 мм.

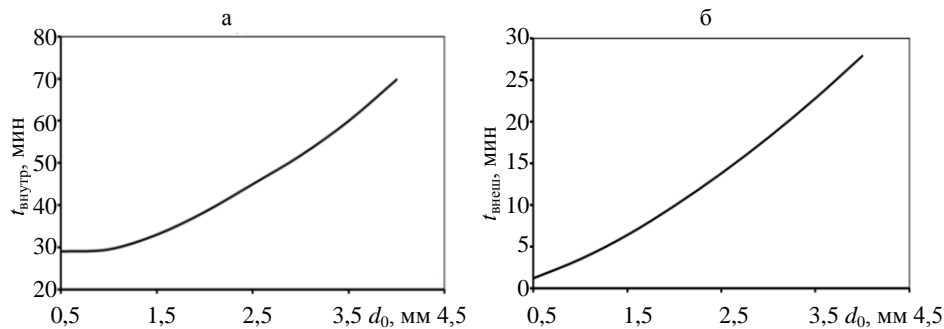


Рис. 3. Изменение продолжительности  $T_{\text{кон}}$  растворения кольматирующих отложений в зависимости от диаметра частиц на границах кольматационного кольца: а – внутренней; б – внешней (при  $b(0) = N_0 = 0,1$ ;  $n_0 = 0,4$ ;  $D = 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с;  $C_m = 40$  кг/м<sup>3</sup>;  $C = 0,4$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{ос}} = 2250$  кг/м<sup>3</sup>;  $r_1 = 0,16$  м;  $r_c = 0,08$  м;  $m = 6$  м;  $Q = 1$  л/с;  $\zeta = 0,9$ )

Предложенная методика поэтапного расчета продолжительности регенерации до достижения требуемой степени декольматации позволяет разработать технологию регенерации гравийных фильтров скважин способом затрубной циркуляционной реагентной регенерации в зависимости от параметров пласта, кольматажа и расхода закачки реагента.

## ВЫВОДЫ

1. Составлена система уравнений, состоящая из объединенного уравнения движения и сохранения массы и обобщенного уравнения кинетики, описывающих кинетику растворения кольматанта в режиме затрубной промывки кольцевой гравийной обсыпки водозаборной скважины с учетом изменения структуры пористой среды. Путем интегрирования обобщенного уравнения кинетики получена аналитическая зависимость для расчета продолжительности полной регенерации  $T_0$  слоя зерен грунта на внешнем контуре гравийной обсыпки. Эта формула дает оценку снизу времени полной очистки прифилтровой зоны, т. е. начала полного освобождения гравийной обсыпки от солей.

2. Для расчета продолжительности полной регенерации всей толщи обсыпки предложено разбить период регенерации на ряд фаз последовательного выноса солей из грунта. Продолжительность одной фазы  $T_{\text{ф}}$  принята равной времени прохождения реагентом участка от  $r = r_1$  до  $r = r_c$ ,

т. е.  $T_{\text{ф}} = \frac{r_1^2 - r_c^2}{2q_1}$ , где  $q_1 = \frac{q}{n_c}$ . Каждая фаза рассчитывается отдельно, так

как начальный удельный объем отложений  $N_0$  во входном сечении изменяется после каждой фазы, что требует корректировки граничных условий.

3. Получено аналитическое решение системы уравнений, которое дает возможность рассчитать на временном участке  $t \in 0, R$  в процессе выщелачивания концентрацию солей в реагенте  $C_1$ ,  $t$ ,  $r$  и определить удельный объем отложений  $b(t)$  в точке гравийной обсыпки в любой момент времени в процессе закачки реагента. Это позволило разработать методику поэтапного расчета продолжительности регенерации до достижения требуемой степени декольматации, реализованную на ЭВМ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. С п е ц и а л ь н ы е работы при бурении и оборудовании скважин на воду / Д. Н. Башкатов [и др.]. – М.: Недра, 1988. – 268 с.
2. И в а ш е ч к и н, В. В. Циркуляционная регенерация водозаборной скважины, оснащенной затрубной системой реагентной промывки / В. В. Ивашечкин, П. А. Автушко // Мелиорация. – 2010. – № 1 (63). – С. 70–77.
3. А к с е л ь р у д, Г. А. Экстрагирование. Система «твердое тело – жидкость» / Г. А. Аксельруд. – Л.: Химия, 1974. – 256 с.
4. О р а д о в с к а я, А. Е. Фильтрационное выщелачивание дисперснораспределенного гипса из песчано-глинистых пород / А. Е. Орадовская // Растворение и выщелачивание горных пород. Сер. Инженерная гидрогеология. – М., 1957. – С. 46–83.
5. Г а в р и л к о, В. М. Фильтры буровых скважин / В. М. Гаврилко, В. С. Алексеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985. – 334 с.
6. М и н ц, Д. М. Гидравлика зернистых материалов / Д. М. Минц, С. А. Шуберт. – М.: МКХ РСФСР, 1955. – 111 с.
7. Т у г а й, А. М. Продуктивність водозабірних свердловин в умовах кольматажу / А. М. Тугай, О. Я. Олейник, Я. А. Тугай. – Харків: ХНАМГ, 2004. – 240 с.
8. К о м м у н а р, Г. М. Внутрипластовая очистка подземных вод для целей водоснабжения: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.04 / Г. М. Коммунар. – М., 1987. – 469 с.
9. А л е к с е е в, В. С. Массоперенос в водонасыщенных горных породах / В. С. Алексеев, Г. М. Коммунар, Б. С. Шержуков // Итоги науки и техники. ВИНТИ. Сер. гидрогеология и инженерная геология. – М., 1989. – Т. 11. – 144 с.
10. В е р и г и н, Н. Н. О кинетике растворения солей при фильтрации воды в грунтах / Н. Н. Веригин // Растворение и выщелачивание горных пород. Сер. Инженерная гидрогеология. – М., 1957. – С. 84–113.

## REFERENCES

1. B a s h k a t o v, D. N., Drakhlis, S. L., Safonov, V. V., & Kvashnin, G. P. (1988) *Special Works in Drilling and Equipment*. Moscow, Nedra. 268 p. (in Russian).
2. I v a s h e c h k i n, V. V., & Avtushko, P. A. (2010) Circulation Regeneration of Water-Supply Well, Equipped Annular System of Reagent Watering. *Melioratsiia* [Melyoratsyya], 1 (63), 70–77 (in Russian).
3. A k s e l r u d, G. A. (1974) *Extraction. System "Solid Body – Liquid"*. Leningrad, Chemistry. 256 p. (in Russian)
4. O r a d o v s k a y a, A. E. (1957) Filtration Degradation of Dispersive-Distributed Salt Lime From Sand-Clay Rocks. *Resorption and Degradation of Minerals. Engineering Hydrogeology*. Moscow, 46–83 (in Russian).
5. G a v r i l k o, V. M., & Alekseev, V. S. (1985) *Filters of Drilled Holes*. Moscow, Nedra. 334 p. (in Russian).
6. M i n z, D. M., & Shubert, S. A. (1955) *Hydraulics of Granulation*. Moscow, Minzhilkomkhos RSFSR. 111 p. (in Russian).
7. Т у г а й, А. М., Олейник, О. Я., Тугай, Я. А. (2004) *Water Well Efficiency under Conditions of Colmatage (Mud Injection)*. Kharkov: Kharkov National University of Municipal Services. 240 p. (in Ukrainian).
8. К о м м у н а р, Г. М. (1987) *Vnutriplastovaia Ochistka Podzemnykh Vod dlia Tselei Vodospabzheniia. Dis. d-ra tekhn. nauk* [Intraformational Cleaning out of Underground Water for Water Supply Purposes. Dr. tech. sci. diss]. Moscow, 469 p. (in Russian).
9. А л е к с е е в, В. С., Коммунар, Г. М., & Sherzhykov, B. S. (1989) Mass Transfer in Water-Saturated Rocks. *Recapitulation of Science and Engineering. Hydro-Geology and Engineering Geology*. Moscow, Russian National Institute of Scientific-Technical Information. Vol. 11, 144 p. (in Russian).
10. В е р и г и н, Н. Н. (1957) About Kinetics of Salts Resorption in the Process of Water Filtration in Soils. *Resorption and Desalination of Rocks (Minerals). Engineering Hydro-Geology*. Moscow, 84–113 (in Russian).

Представлена кафедрой гидротехнического  
и энергетического строительства

Поступила 12.07.2013