

УДК 628.112

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА РЕАГЕНТНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ СКВАЖИН, ОБОРУДОВАННЫХ ЗАТРУБНЫМИ СИСТЕМАМИ ПРОМЫВКИ**

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

*Белорусский национальный технический университет*

Реагентные методы регенерации длительно эксплуатирующихся скважин эффективнее импульсных методов, так как позволяют растворять и извлекать кольматирующие образования как с водоприемных элементов фильтра скважины, так и из гравийной обсыпки. В скважинах типовых конструкций реагентные обработки могут осуществляться только изнутри фильтров, что не всегда обеспечивает высокую степень извлечения отложений из гравийной обсыпки. Более высокую эффективность регенерации можно ожидать в скважинах с затрубными системами промывки. На внешнем контуре гравийной обсыпки фильтров таких скважин установлена трубчатая система, включающая четыре-пять нагнетательных полиэтиленовых трубок диаметром 20–25 мм, перфорированных напротив фильтра и выведенных на устье скважины [1, 2]. Подавая реагент по трубкам непосредственно в гравийную обсыпку, можно обеспечить более равномерную обработку зафильтровой зоны как по высоте, так и по толщине. Реагентные обработки здесь могут осуществляться в основном способами реагентной ванны и циркуляционно-реагентной промывки. Тот или иной способ обработки назначается в зависимости от возраста скважины, степени снижения ее дебита и физико-химических свойств кольматанта.

Для разработки технологий регенерации необходимо знать кинетику растворения кольматирующих отложений при применении вышеперечисленных способов обработки с учетом особенностей работы затрубной системы регенерации. Поэтому целью настоящей работы являлось исследование кинетики растворения кольматирующих отложений способами реагентной ванны в условиях работы затрубной системы регенерации.

В процессе регенерации водозаборных скважин с помощью затрубной системы реагентной промывки можно условно выделить три характерных этапа:

- 1) заливку реагента в затрубную систему;
- 2) проникновение реагента в прискважинную зону;

3) растворение кольматанта в прискважинной зоне в режиме реагентной ванны или циркуляционно-реагентной промывки.

Для практических расчетов процесса декольматации можно ограничиться только третьим этапом, так как скорость растворения кольматанта на третьем этапе значительно выше, чем на первых двух. Исследованиями в области изучения кинетики растворения кольматирующих отложений при восстановлении дебита скважин с использованием химических реагентов занимались Н. Н. Веригин, В. М. Беляков, В. С. Алексеев, Г. М. Коммунар, А. М. Тугай и др. [3–5].

Считается, что процесс растворения солей металлов в водных растворах и кислотах протекает по диффузионному закону, и такие реакции являются необратимыми. Тогда уравнение кинетики растворения осадков имеет вид [3]

$$\frac{db}{dt} = \frac{\omega\beta}{\rho_{oc}} [C_m - C(t)], \quad (1)$$

где  $b$  – удельный объем отложений (количество вещества, перешедшее в раствор за время от 0 до  $t$ );  $\omega$  – удельная поверхность осадков,  $\text{м}^{-1}$ ;  $\beta$  – коэффициент массоотдачи,  $\text{м/с}$ ;  $\rho_{oc}$  – плотность кольматирующих отложений,  $\text{кг/м}^3$ ;  $C(t)$  – концентрация солей в реагенте в момент времени  $t$ ,  $\text{кг/м}^3$ ;  $C_m$  – максимальная концентрация солей в реагенте (концентрация насыщенного раствора),  $\text{кг/м}^3$ .

Величина  $\beta$  определяет скорость подвода реагента к поверхности (или отвода продуктов реакции от поверхности в объем реагента) и зависит от условий, в которых протекает процесс. Рассмотрим режим обработки – реагентная ванна, когда перемещения реагента относительно поверхности зерен гравийной обсыпки не наблюдается. Для реагентной ванны выражение для расчета  $\beta$ , полученное с учетом решения уравнения диффузии для растворения частицы горной породы, покрытой слоем кольматанта и помещенной в объем реагента, имеет вид [3]

$$\beta = 2D/d, \quad (2)$$

где  $D$  – коэффициент молекулярной диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;  $d$  – размер частиц,  $\text{м}$ .

Величина коэффициента  $D$  незначительно зависит от концентрации растворителя, но существенно растет с повышением его температуры. Так, для подземного растворения каменной соли коэффициент молекулярной диффузии увеличивается от  $0,706 \cdot 10^{-9}$  до  $2,610 \cdot 10^{-9}$   $\text{м}^2/\text{с}$  с ростом температуры от 273 К до 323 К при концентрации растворителя 51,7  $\text{кг/м}^3$  [6, с. 116].

Так как в процессе декольматации изменяется структура среды, выражения для расчета текущих значений пористости  $n$ , насыщенности порового пространства осадком  $a$ , удельного объема отложений  $b$ , удельной поверхности  $\omega$  и размера зерен грунта  $d$  имеют вид [3]:

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

где  $n_0$ ,  $\omega_0$ ,  $d_0$  – соответственно пористость, удельная поверхность и размер частиц незакольматированной гравийной обсыпки скважины;  $\alpha = 1/(1 - n_0)$ .

При кольматаже скважин величина удельного объема отложений  $b$ , как правило, не превышает  $0,5n_0$ .

Математическая модель процесса регенерации скважины с помощью реагентной ванны описывается системой двух уравнений: обобщенным уравнением кинетики (1) с учетом выражений (2) и (3) и уравнениями баланса вещества в обрабатываемой гравийной обсыпке [3]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{db}{dt} = -\frac{B_i}{\rho_{oc}} f(b) C_m - C ; \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d}{dt} nC + \rho_{oc} \frac{db}{dt} = 0, \end{array} \right. \quad (5)$$

где  $B_i = 2 \frac{D\omega_0}{d_0}$ ,  $f(b) = 1 + \alpha b^{1/3}$ ;  $\alpha = \frac{1}{1-n_0}$ ;  $n = n_0 - b$ .

Система уравнений (4), (5) решалась в [3] приближенно при линеаризации функции  $f(b)$  зависимостью вида  $f(b) = 1 + \gamma b$ , где  $\gamma$  – некоторая константа, обоснованный выбор которой не обсуждался, что не позволяло получить точное решение системы уравнений для обработки реагентной ванны. Здесь также не было получено выражение для расчета продолжительности реагентной обработки.

Кроме этого, при расчетах в [3] не учитывались некоторые важные факторы, такие как эффект экранизации (блокировки) поверхности частиц от реагента продуктами реакции и наличие нерастворимых соединений в составе кольматанта. Экранизация поверхности проявляется, в частности, при наличии в составе кольматанта соединений кальция (карбонатов), при взаимодействии которых с соляной кислотой образуется углекислый газ  $CO_2$ , создающий газовый кольматаж. При наличии нерастворимых соединений в составе отложений активная поверхность также уменьшается. Такими соединениями могут быть, например, частицы мелкого песка, выносимого из пласта и налипающего на кольматант, а также сульфаты и сульфиды металлов, не растворяемые реагентом – дитионитом натрия.

Поэтому в выражение для расчета суммарной поверхности  $\omega_0$  зерен шаровой формы диаметром  $d_0$  в единице объема [7]

$$\omega_0 = 6 \frac{1-n_0}{d_0} \quad (6)$$

введем понижающие коэффициенты  $\eta$  и  $\zeta$ , учитывающие соответственно степень экранизации поверхности зерен пузырьками газа и долю нерастворимых соединений в составе кольматанта:

$$\omega_0 = 6\eta\zeta \frac{1-n_0}{d_0}. \quad (7)$$

Систему уравнений (4), (5) решаем при следующих начальных условиях:

$$b(0) = N_0; \quad C(0) = C_0, \quad (8)$$

где  $C_0$  – концентрация солей кольматанта, растворенных в реагенте перед началом обработки прискважинной зоны;  $N_0$  – удельный объем кольматирующих отложений, находящихся в порах гравийной обсыпки скважины до ее обработки.

Проинтегрировав (5), получим:  $nC = \rho_{oc}n + C_1 \text{ const}$ . Так как из начальных условий (8)  $C_1 = n_0 - N_0 - C_0 - \rho_{oc}$ , то

$$C = C(b) = \rho_{oc} - \frac{n_0 - N_0 - \rho_{oc} - C_0}{n_0 - b}. \quad (9)$$

Решая уравнение  $C(b) = C_m$ , находим

$$b_{\text{крит}} = N_0 - \frac{n_0 - N_0 - C_m - C_0}{\rho_{oc} - C_m}. \quad (10)$$

Соотношения (9) и (10) показывают, что система уравнений (4), (5) имеет стационарное решение  $\begin{cases} b \equiv b_{\text{крит}} \\ C \equiv C_m \end{cases}$ , которое притягивает решение задачи (4), (5), (8) при  $t \rightarrow \infty$ , т. е.  $\lim_{t \rightarrow \infty} b(t) = b_{\text{крит}}; \lim_{t \rightarrow \infty} C(t) = C_m$ .

Используя (9), положим  $g(b) = C_m - C(b) = \frac{B + bD}{n_0 - b}$ , где  $B = n_0 - C_m - C_0 + N_0 - C_0 - \rho_{oc}$ ,  $D = \rho_{oc} - C_m$ . Тогда уравнение (4) примет вид  $\frac{db}{dt} = -\frac{B_i}{\rho_{oc}} f(b) g(b)$ . Его частный интеграл, соответствующий начальным условиям (8), имеет вид

$$\int_{N_0}^b \frac{ds}{f(s)g(s)} = -\frac{B_i}{\rho_{oc}} t, \quad b > b_{\text{крит}}. \quad (11)$$

Обозначим неопределенный интеграл  $\int \frac{n_0 - b}{\sqrt[3]{1 + \alpha b} (B + bD)} db = I_b$ . Делаем замену  $1 + \alpha b = s^3$ . Тогда  $b = \frac{s^3 - 1}{\alpha}$ ;  $db = \frac{3}{\alpha} s^2 ds$ ;  $\frac{n_0 - b}{B + bD} = \frac{\alpha n_0 + 1 - s^3}{\alpha B - D + Ds^3} = \frac{\alpha - s^3}{l^3 + ms^3}$ , где  $l = \sqrt[3]{\alpha B - D} < 0$ ;  $m = \sqrt[3]{D} > 0$ . И мы получаем

$$\begin{aligned} I_b &= \frac{3}{\alpha} \int \frac{\alpha s - s^4}{l^3 + ms^3} ds = \frac{3}{\alpha} \int \left[ -\frac{s}{D} + \left( \alpha + \alpha \frac{B}{D} - 1 \right) \frac{s}{l^3 + ms^3} \right] ds = \\ &= -\frac{3s^2}{2\alpha D} + \frac{3}{\alpha} \left( \alpha + \alpha \frac{B}{D} - 1 \right) \int \frac{s ds}{l^3 + m^3 s^3}. \end{aligned}$$

После преобразований имеем:

$$I_b = -\frac{3s^2}{2\alpha D} + \frac{1}{\alpha lm^2} \left[ -\ln|l+ms| + \frac{1}{2} \ln(m^2 s^2 - mls + l^2) + \sqrt{3} \operatorname{arctg} \frac{2ms-l}{l\sqrt{3}} \right] \times \\ \times \left( \alpha + \alpha \frac{B}{D} - 1 \right),$$

где  $s = \sqrt[3]{1+\alpha b}$ .

Преобразуем

$$\alpha - 1 + \alpha \frac{B}{D} = \frac{n_0}{1-n_0} + \alpha \frac{n_0 C_m - C_0 + N_0 C_0 - \rho_{oc}}{\rho_{oc} - C_m} = \alpha \frac{n_0 - N_0 \rho_{oc} - C_0}{\rho_{oc} - C_m}.$$

$$\text{Обозначим } F(b) = C_2 s^2 + C_3 \left[ \ln \frac{\sqrt{m^2 s^2 - mls + l^2}}{|l+ms|} + \sqrt{3} \operatorname{arctg} \frac{2ms-l}{l\sqrt{3}} \right], \text{ где}$$

$$C_2 = -\frac{3}{2\alpha D}; \quad s = \sqrt[3]{1+\alpha b}; \quad C_3 = \frac{1}{lm^2} \frac{n_0 - N_0 \rho_{oc} - C_0}{\rho_{oc} - C_m} \quad (\text{значения } m \text{ и } l \text{ ука-}$$

заны выше).

С учетом (9) и (11) получаем точное решение системы уравнений (4) и (5) при начальных условиях (8), описывающих кинетику растворения кольматанта в прискважинной зоне с учетом изменения структуры пористой среды:

$$\begin{cases} F(b) - F(N_0) = -\frac{B_i}{\rho_{oc}} t, \quad b > b_{\text{крит}}; \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} C = \rho_{oc} - \frac{n_0 - N_0 \rho_{oc} - C_0}{n_0 - b}. \end{cases} \quad (13)$$

Отметим, что  $F(b_{\text{крит}}) = -\infty$ . Это означает, что решение  $b(t)$  попадет в  $b_{\text{крит}}$  за бесконечное время. Поэтому имеет смысл ограничиться промежуток времени  $T_{\text{фин}}$ , за который будет достигнуто равенство  $\frac{C}{C_m} = K$  (заданная величина  $K = 0,995-0,999$ , т. е. отклонение  $C$  от  $C_m$  составит от 0,5 до 0,1 %).

Используя (13), находим из соотношения  $C(b) = KC_m$  значение  $b_{\text{фин}} = \frac{N_0 \rho_{oc} - C_0 - n_0 KC_m - C_0}{\rho_{oc} - KC_m}$ . Тогда из (12) следует, что рациональная продолжительность этапа обработки

$$T_{\text{фин}} = -\frac{\rho_{oc}}{B_i} \left[ F(b_{\text{фин}}) - F(N_0) \right]. \quad (14)$$

Используя выражения (12)–(14), можно рассчитать, как изменяются в процессе выщелачивания удельный объем отложений  $b(t)$ , концентрация солей в реагенте  $C(t)$ , и определить рациональную продолжительность этапа обработки  $T_{\text{фин}}$  прифилтровой зоны в режиме реагентной ванны при различных условиях регенерации.

Анализ расчетных зависимостей показывает, что скорость растворения отложений пропорциональна удельной поверхности кольматанта  $\omega_0$ , разности концентраций солей в реагенте  $(C_m - C)$ , коэффициенту диффузии  $D$  и обратно пропорциональна диаметру зерен закольматированной обсыпки  $d_0$  и плотности кольматирующих отложений  $\rho_{\text{ос}}$ . В процессе выщелачивания происходит сначала сравнительно интенсивное уменьшение начального удельного объема отложений  $b = N_0$ , а затем с уменьшением величины  $(C_m - C)$  значение  $b$  практически стабилизируется, плавно монотонно убывая до  $b_{\text{фин}}$ . Это подтверждают расчеты, выполненные на ЭВМ.

На рис. 1 представлены графики зависимости  $b/N_0 = f(t)$  первой обработки для трех значений крупности частиц грунта ( $d_0 = 1,5$  мм;  $d_0 = 2,0$  мм;  $d_0 = 2,5$  мм), построенные при следующих данных:  $b(0) = N_0 = 0,1$ ;  $C(0) = C_0 = 0,1$  кг/м<sup>3</sup>;  $n_0 = 0,35$ ;  $D = 0,5 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup>/с;  $\eta = 0,95$ ;  $\zeta = 0,95$ ;  $C_m = 50$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{ос}} = 2200$  кг/м<sup>3</sup>;  $K = C/C_m = 0,995$ .

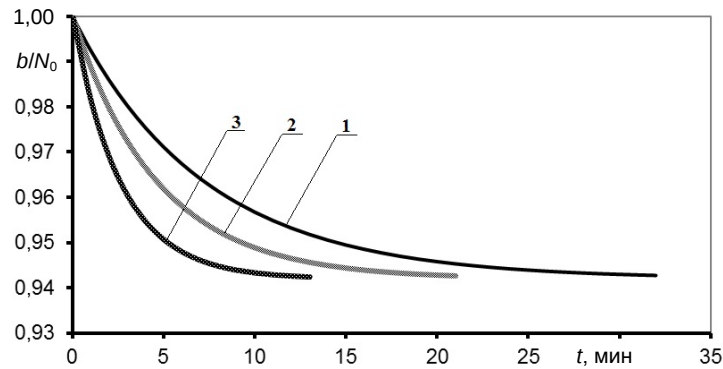


Рис. 1. Зависимость  $b/N_0 = f(t)$  первой обработки скважины методом реагентной ванны: 1 –  $d_0 = 2,5$  мм; 2 – 2,0; 3 – 1,5 мм

Из графиков на рис. 1 следует, что остаточный относительный объем отложений в грунте в конце первой обработки составляет  $b_{\text{фин1}}/N_0 = 0,945$ , в то время как планируемое значение должно быть не более  $b_{\text{фин}}/N_0 = 0,1$ . Поэтому, чтобы обеспечить нужную степень декольматации, требуются последующие этапы обработки. Невозможность достижения за один прием заливки реагента полной декольматации гравийной обсыпки ( $b_{\text{фин}} = N_0$ ) обусловлена достижением предельной концентрации реагента продуктами реакции, а также сравнительно низкой пористостью закольматированной обсыпки, которая может составлять  $n = (0,5 - 0,8)n_0$ , что не позволяет сюда залить достаточный объем реагента, чтобы растворить все кольматирующие отложения. Расчеты продолжительности первого этапа обработки  $T_{\text{фин1}}$  показали, что он составляет менее получаса при обычных скважинных условиях (рис. 1). После этого необходимо залить в нагнетательные трубы затрубной системы регенерации свежую порцию реагента,

который вытеснит продукты реакции в ствол скважины и заполнит частично промытые поры. Таким образом, расчет следующего  $(i + 1)$ -го этапа обработки должен начинаться с учетом достигнутого в предыдущем этапе значения  $b_{\text{фин}}$ . Окончание процесса регенерации можно ограничить периодом времени  $T_{\text{фин}}^p$ , при котором будет достигнуто соотношение  $b_{\text{фин}}/N_0 = 0,1$ . Эта цикличность расчетов реализована на ЭВМ.

Графики зависимости  $b/N_0 = f(t)$  при тех же исходных данных, что и на рис. 1, представлены на рис. 2. Здесь точками обозначены границы этапов обработки скважины.

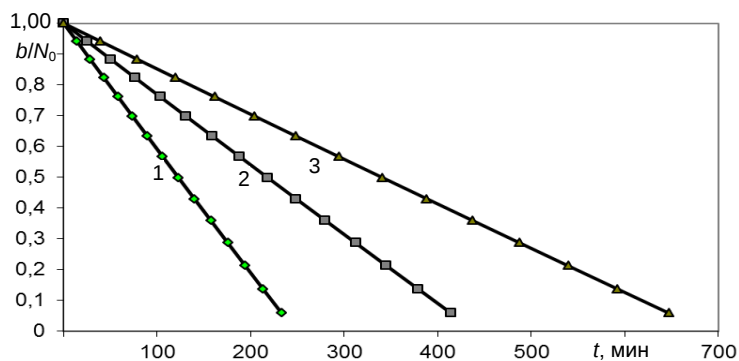


Рис. 2. Зависимость  $b/N_0 = f(t)$  для полного цикла обработки скважин методом реагентной ванны ( $b_{\text{фин}}/N_0 = 0,1$ ):  
1 –  $d_0 = 1,5$  мм; 2 – 2,0; 3 – 2,5 мм

Анализ графиков показывает, что остаточный относительный объем отложений  $b/N_0$  уменьшается с течением времени и увеличением числа закачек реагента практически по линейной зависимости. Общее время регенерации зависит от крупности частиц гравийной обсыпки и не превышает  $T_{\text{фин}}^p = 11$  ч, а число этапов обработки  $n = 15$  с продолжительностью этапов от 15 до 30 мин.

## ВЫВОДЫ

1. Получено точное решение системы уравнений – обобщенного уравнения кинетики и уравнения баланса вещества, описывающих кинетику растворения кольматанта в режиме реагентной ванны в прискважинной зоне с учетом изменения структуры пористой среды. Установлено, что система уравнений имеет стационарное решение:  $b = b_{\text{крит}}$ ;  $C = C_m$ . Решение  $(b(t), C(t))$  попадет в  $(b_{\text{крит}}, C_m)$  за бесконечное время. Предложено ограничиться промежутком времени  $T_{\text{фин}}$ , за который будет достигнуто равенство  $C/C_m = K$  (заданная величина  $K = 0,995–0,999$ , т. е. отклонение  $C$  от  $C_m$  составит от 0,5 до 0,1 %) и будет выполнено  $b(T_{\text{фин}}) = b_{\text{фин}}$ .

2. Расчеты показали, что из-за недостатка одной порции реагента для полного растворения отложений в один этап требуется ряд этапов обработки. В этой связи предложена методика поэтапного расчета полной продолжительности регенерации  $T_{\text{фин}}^p$  до достижения требуемой степени декольматации, реализованная на ЭВМ.

3. Проведенные расчеты позволили скорректировать технологию регенерации фильтров способом реагентной ванны в применении к водозаборным скважинам с затрубными системами промывки.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Конструкция водозаборной скважины при роторном бурении: пат. 9453 Респ. Беларусь, МПКС1, E21B43/00, B03B 03/00 / В. В. Ивашечкин, А. Н. Кондратович, И. А. Герасименко, Н. И. Крук, И. В. Рытько; заявитель Белор. нац. техн. ун-т. – № а20031236; заявл. 29.12.03, опубл. 30/06/2005 // Афіцыйны бюл. / Цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2007. – № 3. – С. 110.
2. Ивашечкин, 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. Гаврилко, В. М. Фильтры буровых скважин / В. М. Гаврилко, В. С. Алексеев. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985. – 334 с.
4. Алексеев, 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.
5. Тугай, А. М. Продуктивність водозабірних свердловин в умовах кольматажу / А. М. Тугай, О. Я. Олейник, Я. А. Тугай. – Харків: ХНАМГ, 2004. – 240 с.
6. Аксельруд, Г. А. Растворение твердых веществ / Г. А. Аксельруд, А. Д. Молчанов. – М.: Химия, 1977. – 272 с.
7. Минц, Д. М. Гидравлика зернистых материалов / Д. М. Минц, С. А. Шуберт. – М.: МКХ РСФСР, 1955. – 111 с.

Представлена кафедрой  
кораблестроения и гидравлики

Поступила 21.03.2013