

УДК 628.112

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ СЕКТОРНОГО УСТРОЙСТВА ЦИРКУЛЯЦИОННО-РЕАГЕНТНОЙ РЕГЕНЕРАЦИИ

Асп. ШЕЙКО А. М., канд. техн. наук, доц. ИВАШЕЧКИН В. В.,  
канд. физ.-мат. наук, доц. ВЕРЕМЕНЮК В. В.

*Белорусский национальный технический университет*

Разработанная математическая модель движения жидкости в закольматированной прифилтровой зоне скважины, фильтр которой разделен на нагнетательные и всасывающие сектора [1], позволяет определить давление  $h_1$  и основной параметр кинетики растворения кольматирующих образований при циркуляционно-регентной регенерации – скорость реагента  $v(\theta, r)$  в любой точке закольматированной зоны радиусом  $r_0$ .

Задача определения оптимальных конструктивных параметров состоит в том, чтобы при прочих равных условиях достигнуть максимума основного параметра конвективного диффузионного переноса вещества – скорости  $v(\theta, r)$  в прифилтровой закольматированной зоне. Цель работы – определение оптимальных конструктивных параметров секторного устройства для равномерного и качественного увеличения проницаемости фильтра и прифилтровой зоны при циркуляционно-регентной регенерации скважин.

При определении оптимальных конструктивных параметров секторного устройства приняты следующие допущения:

- скважина предполагается совершенной по степени и характеру вскрытия водоносного горизонта мощностью  $M$ ;
- прифилтровая закольматированная зона скважины принимается с постоянной и однородной проницаемостью  $k_1$  как по глубине скважины, так и в зоне от  $r_c$  до  $r_0$ ;
- при количестве секторов  $m \geq 2$  скважинного устройства предполагается, что расход равномерно распределен между смежными секторами одного типа;
- при длине секторного устройства  $L_y$  меньше, чем мощность водоносного горизонта,  $M$  принимается таким образом, что линии тока лежат в горизонтальной плоскости при циркуляции жидкости в прифилтровой зоне. Тогда  $M = L_y$ .

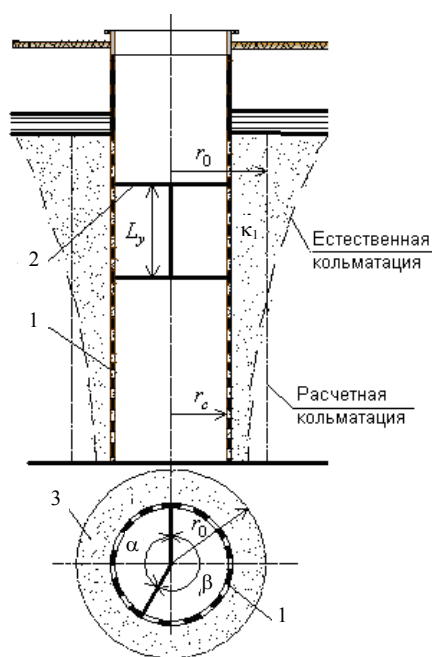


Рис. 1. Расчетная схема скважины: 1 – фильтр скважины; 2 – секторное устройство; 3 – прифилтровая зона

го устройства для обработки скважины необходимо обеспечить: 1) равенство расходов и углов нагнетательного и всасывающего секторов, т. е.  $Q_{сн} = Q_{св}$  и  $\alpha = \beta$ ; 2) определенное соотношение между  $Q_{сн}$  и  $Q_{св}$  при  $\alpha \neq \beta$  или соотношение между  $\alpha$  и  $\beta$  при  $Q_{сн} \neq Q_{св}$ . Второе условие, с точки зрения изготовления секторного устройства и технологии циркуляционной регенерации, более сложно.

В этой связи целесообразно использование в секторном циркуляционном устройстве погружного насоса, который обеспечивает равенство расходов закачки и откачки, т. е.  $Q_{сн} = Q_{св} = Q_{ц}$ , где  $Q_{ц}$  – расход, циркулирующий в прифилтровой зоне скважины.

Теоретические и экспериментальные данные показали, что в случае  $Q_{сн} = Q_{св} = Q_{ц}$  и  $\alpha = \beta$  распределение давления в прифилтровой зоне, следовательно, и скоростей носит симметричный характер относительно нагнетательного и всасывающего секторов [1]. Поэтому для дальнейшего анализа рассматривается только нагнетательный сектор с углом  $\alpha$ .

**Анализ радиальной составляющей скорости.** Области изменения переменных:  $r_c \leq r \leq r_0$  и  $0 \leq \theta \leq \alpha$ . Исследование проведем для случая

$$\begin{cases} \kappa_2 \geq \kappa_1 > 0; \\ Q_{сн} = Q_{св} = Q_{ц}; \\ \alpha = \beta = \frac{\pi}{m}. \end{cases} \quad (1)$$

Согласно принятым допущениям расчетная схема скважины с секторным устройством поинтервальной циркуляционно-реагентной регенерации будет иметь вид, как изображено на рис. 1.

При исследовании циркуляции жидкости показано [2, с. 54; 3, 4], что в результате несоблюдения баланса расхода закачки и откачки происходит нарушение симметрии гидродинамики циркуляционного потока. При превышении расхода закачки над расходом откачки часть жидкости уходит в пласт, а при превышении расхода откачки происходит отбор жидкости из пласта. Следовательно, для обеспечения максимальных размеров зоны обработки прифилтровой зоны необходимо использовать симметричную схему.

Для симметричной схемы циркуляции при использовании секторно-

Используя операции почленного дифференцирования и интегрирования [5, с. 602], получим следующие разложения. Во-первых:

$$\Phi_r(\theta, r) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n-1)m\theta}{2n-1} r^{2n-1} = \operatorname{arctg} \left( \frac{2r}{1-r^2} \sin m\theta \right), \quad (2)$$

где

$$0 < r < 1, \theta \in \left[ \frac{\pi}{m} \right].$$

Во-вторых:

$$\Phi_\theta(\theta, r) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(2n-1)m\theta}{2n-1} r^{2n-1} = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1+2r \cos m\theta + r^2}{1-2r \cos m\theta + r^2} \right), \quad (3)$$

где

$$0 < r < 1, \theta \in R.$$

Свойства функций  $\Phi_r(\theta, r)$  и  $\Phi_\theta(\theta, r)$  хорошо иллюстрируют графики (рис. 2, 3).

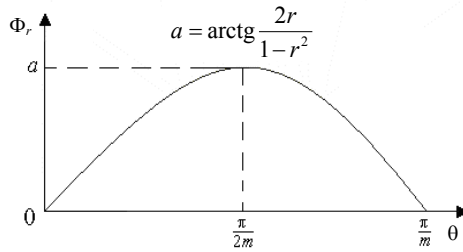


Рис. 2. График функции  $\Phi_r(\theta, r)$

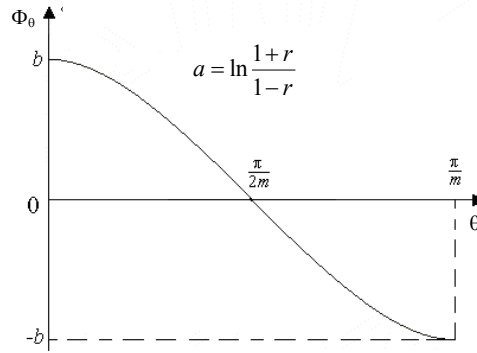


Рис. 3. График функции  $\Phi_\theta(\theta, r)$

В нагнетательном секторе радиальную составляющую скорости с учетом (3) можно найти по формуле

$$v_r(\theta, r) = \frac{2mQ_{11}}{\pi^2 L_y r} \bar{\bar{W}}_r(\theta, r); \quad (4)$$

где  $\bar{\bar{W}}_r(\theta, r) = \Phi_r(\theta, \Delta_r^m) - \kappa_0 \Phi_r(\theta, \varepsilon_{1r}^m) + \kappa_0 \Phi_r(\theta, \varepsilon_{2r}^m) - \kappa_0^2 \Phi_r(\theta, \varepsilon_{3r}^m); \quad (5)$

$$\Delta_r = \frac{r_c}{r}, \varepsilon_{1r} = \frac{rr_c}{r_0^2}; \varepsilon_{2r} = \frac{r_c^3}{rr_0^2}; \varepsilon_{3r} = \frac{rr_c^3}{r_0^4}.$$

Анализ равенств (4), (5) позволяет сделать следующие выводы:

- 1) при каждом  $r \in (r_c; r_0]$  график  $v_r(\theta, r)$  имеет вид, указанный на рис. 2 (в частности, при  $\theta = 0$  и  $\theta = \alpha$  скорость равна 0, а при  $\theta = \frac{\alpha}{2}$  – достигает своего максимального значения);

- 2) при каждом  $\theta \in (0; \alpha)$  скорость  $v_r(\theta, r)$  убывает при увеличении  $r$  от

$r_c$  до  $r_0$  (так как убывают величины  $\Delta_r, \varepsilon_{1r}, \varepsilon_{2r}, \varepsilon_{3r}$ ); максимальное значение, равное  $\frac{mQ_{\perp}}{\pi L_y r_c}$ , она принимает на границе  $r = r_c$ ;

3) при фиксированных значениях  $\theta \in (0; \alpha)$  и  $r \in (r_c; r_0]$  значения  $v_r(\theta, r)$  убывают с ростом  $m$  (так как убывают величины  $\Delta_r^m$  и  $\varepsilon_{ir}^m$ ).

**Анализ угловой составляющей скорости.** Угловую составляющую с учетом (1) и (3) определим следующим образом:

$$v_{\theta}(\theta, r) = \frac{2mQ_{\perp}}{\pi^2 L_y r} \bar{\bar{W}}_{\theta}(\theta, r), \quad (6)$$

$$\text{где } \bar{\bar{W}}_{\theta}(\theta, r) = -(\Phi_{\theta}(\theta, \Delta_r^m) + \kappa_0 \Phi_{\theta}(\theta, \varepsilon_{1r}^m) + \kappa_0 \Phi_{\theta}(\theta, \varepsilon_{2r}^m) + \kappa_0^3 \Phi_{\theta}(\theta, \varepsilon_{3r}^m)). \quad (7)$$

Анализ (6) с использованием (7) и свойств функции  $\Phi_{\theta}(\theta, r)$  позволяет сделать следующие выводы:

1) при каждом  $r \in (r_c; r_0]$  график  $v_{\theta}(\theta, r)$  имеет вид, указанный на рис. 3 (в частности, при  $\theta = \frac{\alpha}{2}$  эта скорость равна 0, а при  $\theta = 0$  и  $\theta = \alpha$  величина  $|v_{\theta}(\theta, r)|$  достигает своего максимального значения);

2) при каждом  $\theta \in (0; \alpha)$  величина  $|v_{\theta}(\theta, r)|$  убывает с ростом  $r$  от  $r_c$  до  $r_0$  (так как убывают величины  $\Delta_r, \varepsilon_{1r}, \varepsilon_{2r}, \varepsilon_{3r}$ );

3) при фиксированных значениях  $\theta \in (0; \alpha)$  и  $r \in (r_c; r_0)$  величина  $|v_{\theta}(\theta, r)|$  убывает с ростом  $m$  (так как убывают величины  $\Delta_r^m$  и  $\varepsilon_{ir}^m$ ).

С учетом (4) и (6) скорость в прифилтровой закольматированной зоне можно найти по формуле

$$v(\theta, r) = \sqrt{v_r^2(\theta, r) + v_{\theta}^2(\theta, r)} = \frac{2mQ_{\perp}}{\pi^2 L_y r} \sqrt{\bar{\bar{W}}_r^2(\theta, r) + \bar{\bar{W}}_{\theta}^2(\theta, r)}, \quad (8)$$

где  $\bar{\bar{W}}_r(\theta, r)$  и  $\bar{\bar{W}}_{\theta}(\theta, r)$  задаются формулами (5) и (7) соответственно. Для избежания больших погрешностей при  $m > 1$  должно быть  $\frac{r_c}{r_0} < 0,4$ , а при  $m = 1 - \frac{r_c}{r_0} < 0,3$ .

Окончательно можно сделать следующие выводы:

1) график скоростей  $v(\theta, r)$  при фиксированном  $r \in (r_c; r_0]$  симметричен относительно  $\theta = \frac{\alpha}{2}$ ;

2) при каждом  $\theta \in (0; \alpha)$  величина  $v(\theta, r)$  убывает с ростом  $r$  от  $r_c$  до  $r_0$ ;

3) при каждом  $\theta \in (0; \alpha)$  и  $r \in (r_c; r_0]$  величина  $v(\theta, r)$  убывает с увеличением  $m$ ;

4. при фиксированном  $r \in (r_c; r_0]$  максимальное значение  $v(\theta, r)$  принимает либо при  $\theta = 0$  (если  $r$  близко к  $r_c$ ), либо при  $\theta = \frac{\alpha}{2}$  (если  $r$  близко к  $r_0$ );

5. на внутренней границе  $r = r_c$  нагнетательного сектора  $v(\theta, r) > \frac{mQ_{ц}}{\pi L_y r_c}$ .

Также представляет интерес исследование  $v(\theta, r)$  при увеличении проницаемости прифильтровой зоны  $\kappa_1$  ( $\kappa_1 \square \kappa_2$ ) в процессе циркуляционно-реагентной обработки. С этой целью при постоянных значениях  $Q_{ц}$ ,  $r_c$ ,  $r_0$ ,  $R$  и  $L_y$  ( $Q_{ц} = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $r_c = 0,163 \text{ м}$ ,  $r_0 = 0,463 \text{ м}$ ,  $R = 500 \text{ м}$ ,  $L_y = 1 \text{ м}$ ) с помощью математического пакета Maple [6] была проанализирована скорость  $v(\theta, r)$  при  $\kappa_1 \rightarrow \kappa_2$ . В результате установлено, что при  $\theta = 0$  (если  $r$  близко к  $r_c$  и  $r_0$ ) скорость  $v(\theta, r)$  возрастает; при  $\theta = \frac{\alpha}{2}$  (если  $r$  близко к  $r_c$ ) скорость  $v(\theta, r)$  остается неизменной и уменьшается (если  $r$  близко к  $r_0$ ). Таким образом, вначале регенерации условия промывки на контуре прифильтровой закольматированной зоны лучше в середине сектора, а при  $\kappa_1 \rightarrow \kappa_2$  – на границе секторов. Поэтому на протяжении всего процесса регенерации обеспечивается равномерная очистка фильтра и прифильтровой зоны.

Основным конструктивным параметром секторного устройства также является его длина  $L_y$ , определение которой ведется из условия обеспечения фильтрационной скорости на контуре закольматированной зоны, достаточной для растворения кольматирующих отложений. При  $r < r_0$  скорость  $v(\theta, r)$  выше, чем на контуре закольматированной зоны, так как величина  $v(\theta, r)$  монотонно убывает с ростом  $r$  от  $r_c$  до  $r_0$ .

Перспективно использовать погружной насос при циркуляционно-реагентной регенерации, который обеспечивает равенство расходов закачки и откачки. При увеличении проницаемости прифильтровой зоны напор насоса уменьшается, а расход увеличивается, что повышает фильтрационные скорости на контуре закольматированной зоны.

В качестве погружных насосов можно использовать агрегаты ЭЦВ, выпускаемые ОАО «Завод Промбурвод» г. Минска. Выпускаемые агрегаты ЭЦВ и станции управления имеют широкую гамму типоразмеров, отличаются по применению в диаметрах обсадных колонн от 100 до 300 мм, по подаче от 1 до 160 м<sup>3</sup>/ч, по напору от 15 до 300 м. Рабочие ступени погружных насосов изготовлены из полимерных материалов, широко используемых в насосостроении, имеющих стабильность к водопоглощению и высокую износостойкость. Имеется возможность устанавливать двигатели к насосам различных фирм, таких как Franklin Electric (Германия) либо ПЭДВ или ДАПВ (Республика Беларусь). Перечисленные выше характеристики двигателя и насоса полностью соответствуют условиям при проведении реагентной регенерации фильтров скважин.

Ограничением при использовании погружных насосов является условие недопущения кавитации во всасывающем секторе:  $h_1^{bc} \leq h_{ст} + h_v$ , где  $h_1^{bc}$  –

давление во всасывающем секторе;  $h_v$  – вакуумметрическая высота всасывания, определяемая в зависимости от давления насыщенных паров жидкости, скорости движения, гидравлических сопротивлений, учитывающих конструктивные особенности секторного устройства, и т. д.

**Методика определения длины секторного циркуляционного устройства  $L_y$  на основе погружного насоса.** Определение длины секторного циркуляционного устройства  $L_y$  на основе погружного насоса проводится в предположении, что потерями расхода в насосе можно пренебречь, и распределение общего расхода насоса происходит равномерно по нагнетательным и всасывающим смежным секторам:

$$Q_{сн} = Q_{св} = Q_{ц} = \frac{Q_{ном}}{m\phi}, \quad (9)$$

где  $Q_{ном}$  – номинальный расход насоса, соответствующий максимальному КПД агрегата;  $\phi$  – коэффициент запаса, учитывающий утечки расхода через уплотнительные перегородки. В общем случае коэффициент  $\phi$  будет зависеть от типа уплотнения (пакера), закольматированного фильтра скважины и его состояния, количества секторов, расхода и др.

Расчет проводится в следующей последовательности:

1) для диаметра фильтра скважины подбирается погружной насос с определенной напорной характеристикой;

2) обращаясь к [1] при заданном угле сектора  $\theta = \frac{\alpha}{2}$ , которому соответствует максимальная скорость движения реагента  $v\left(\frac{\alpha}{2}, r_0\right)$  на контуре закольматированной зоны радиусом  $r_0$ , определяется в первом приближении  $L'_y$ . Чтобы не уменьшать длину секторного устройства, достаточно задать скорость в середине сектора. Нет необходимости задавать скорость на границе секторов на контуре закольматированной зоны, так как в процессе регенерации ( $\kappa_1 \rightarrow \kappa_2$ ) скорость  $v(\theta, r)$  при  $\theta = 0$  возрастает. Увеличение скорости на всей границе  $r_0$  также связано с изменением напорной характеристики насоса;

3) также на основе с [1] при угле  $\theta = \frac{\alpha}{2}$  и  $r = r_c$ , которому соответствует максимальное повышение напора в скважине, строится характеристика сектора скважины  $S = f(Q)$ , где  $S$  – это повышение уровня при закачке ( $S > 0$ ), т. е.  $S = h_1 - h_{ст}$ .

Далее при помощи напорной характеристики насоса (графической либо аппроксимированной зависимостью  $H = f(Q)$ ) при  $L'_y$  определяются рас-

ход системы насос-скважина  $Q'_p$  и соответствующий  $Q'_ц = \frac{Q'_p}{\phi}$ ;

4) рассчитываем уточненное значение  $L''_y$  согласно  $Q'_ц$ ;

5) после двух-трех приближений согласно пунктам 1 и 2 определяем окончательное значение  $L_y$ , соответствующее  $Q_{ц}$ ;

б) наконец определяются циркуляционный расход  $Q_{\text{цк}}$ , скорость реагента после процесса регенерации продолжительностью  $t$ . Результатом очистки фильтра после реагентной декольматации является повышение проницаемости прифилтровой зоны  $\kappa_1$ , и соответственно изменяется напорная характеристика насоса в сторону увеличения  $Q_p$  и уменьшения напора насоса  $H_p$ , что улучшает условия промывки фильтра и прифилтровой зоны скважины.

## ВЫВОДЫ

1. На основании принятых допущений и анализа уравнения (8) показано, что график скоростей  $v(\theta, r)$  при фиксированном  $r \in (r_c; r_0]$  симметричен относительно  $\theta = \frac{\alpha}{2}$ . При каждом  $\theta \in (0; \alpha)$  величина  $v(\theta, r)$  убывает с ростом  $r$  от  $r_c$  до  $r_0$ . При каждом  $\theta \in (0; \alpha)$  и  $r \in (r_c; r_0]$  величина  $v(\theta, r)$  убывает с увеличением  $m$ . При фиксированном  $r \in (r_c; r_0]$  максимальное значение  $v(\theta, r)$  принимает либо при  $\theta = 0$  (если  $r$  близко к  $r_c$ ), либо при  $\theta = \frac{\alpha}{2}$  (если  $r$  близко к  $r_0$ ). На внутренней границе  $r = r_c$  нагнетательного сектора  $v(\theta, r) > \frac{mQ_{\text{ц}}}{\pi L_y r_c}$ .

2. Оптимальное количество секторов ( $\kappa_1 \square \kappa_2$ ) при проведении циркуляционно-реагентной регенерации ( $\kappa_1 \rightarrow \kappa_2$ ) в случае симметричной схемы циркуляции ( $Q_{\text{сн}} = Q_{\text{св}} = Q_{\text{ц}}$  и  $\alpha = \beta$ )  $m = 1$ .

3. На базе агрегата ЭЦВ приведена методика определения длины секторного устройства циркуляционно-реагентной регенерации  $L_y$ , обеспечивающая растворение кольматирующих образований в закольматированной прифилтровой зоне скважины.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шейко, А. М. Моделирование установившегося циркуляционного движения жидкости в прифилтровой зоне скважины / А. М. Шейко, В. В. Ивашечкин, Ю. В. Пулко // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2007. – № 4. – С. 77–87.
2. Тесля, В. Г. Циркуляционная регенерация скважин и пласта: дис. ... канд. техн. наук: 04.00.06 / В. Г. Тесля. – Минск, 1986. – 144 с.
3. Алексеев, В. С. Опыт циркуляционной регенерации водозаборных скважин / В. С. Алексеев, Г. М. Коммунар, В. Г. Тесля // Водоснабжение и санитарная техника. – 1985. – № 9. – С. 9–10.
4. Тесля, В. Г. Технология циркуляционной регенерации скважин / В. Г. Тесля // Повышение эффективности работы водозаборов из поверхностных и подземных источников: сб. науч. тр. / МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского. – М., 1985. – Вып. 74. – С. 114–121.
5. Фихтенгольц, Г. М. Курс дифференциальных и интегральных исчислений: в 3 т. / Г. М. Фихтенгольц. – 4-е изд. – М.: Наука, 1966. – Т. 3.
6. Гандер, В. Решение задач в научных вычислениях с применением Maple и Matlab / В. Гандер, И. Гржебичек. – Минск: Вассамедиа, 2005. – 520 с.

Представлена кафедрой  
гидравлики

Поступила 26.06.2007