

## Глава 5

●

# ФИЛЬТРЫ

В процессе сооружения высокодебитных скважин после расширения и создания каверны заданного профиля и размеров забой оборудуют каркасом фильтра и гравийной обсыпкой. Считается, что существенно улучшить гидравлические свойства приемной части скважины можно формированием естественного фильтра в гравийной обсыпке или околоскважинной зоне пласта и установкой прогрессивных конструкций фильтров-каркасов.

### 5.1. ЕСТЕСТВЕННЫЕ ФИЛЬТРЫ

При откачке из околоскважинной зоны выносятся наиболее мелкие фракции песка, шлам и коагулирующие частицы. Фильтрационные параметры околоскважинной зоны при этом существенно улучшаются. Вынос частиц песка из прифильтровой зоны, по И.Ф. Володько, определяется скоростью фильтрации, которая вызывает суффозию частиц различной гидравлической крупности. По мере удаления от каркаса фильтра в направлении пласта скорость фильтрации уменьшается и соответственно уменьшается крупность выносимых песчаных частиц.

Известно, что на суффозию влияет не только скорость фильтрации, но и гранулометрический состав частиц водоносного пласта. При сооружении в скважине гравийного фильтра с коэффициентом межслойности  $k = 4-6$  (отношение средних размеров гравия и песка) суффозии не наблюдается при любых режимах эксплуатации. Поэтому можно предположить, что суффозию в значительной степени определяет геометрический критерий и частицы песка или гравия задерживают в 6 и менее раз меньшие по размеру частицы независимо от скорости фильтрации.

Рассмотрим характер формирования естественного фильтра из неоднородного песка с учетом геометрического критерия суффозии. Частицы песка диаметром  $d_i$  будут задерживать более мелкие частицы, если выполняется неравенство

$$d_i < k d_{\min} = d_{\text{кр.мин}},$$

где  $k$  – коэффициент межслойности;  $d_{\min}$  – минимальный размер песка водоносного пласта;  $d_{\text{кр.мин}}$  – минимальный диаметр частиц, через которые происходит миграция частиц диаметром  $d_i$ .

Частицы диаметром  $d_i$  не будут выноситься из скважины сквозь частицы больших размеров, если их размер меньше отношения максимального размера частиц песка к коэффициенту межслойности:

$$d_i > k^{-1} d_{\max} = d_{\text{кр.мах}}.$$

Частицы песка размером от  $d_{\text{кр.мин}}$  до  $d_{\text{кр.мах}}$ , с одной стороны, не будут выноситься из скважины, а с другой стороны, предупреждают суффозию частиц, находящихся на большем расстоянии от каркаса фильтра. Если частицы размером от  $d_{\text{кр.мин}}$  до  $d_{\text{кр.мах}}$  равномерно распределены в водоносном пласте, то можно сделать вывод, что они будут располагаться от каркаса фильтра в направлении стенок скважины и продуктивного пласта через определенное расстояние. Среднее расстояние между частицами размеров от  $d_{\text{кр.мин}}$  до  $d_{\text{кр.мах}}$  легко определить, если известно их процентное содержание в песке.

Вынос частиц из скважины через отверстия фильтра-каркаса в процессе откачки будет наблюдаться, если размер близлежащих к каркасу фильтра частиц  $d_1$  меньше отверстий фильтра:

$$d_1 < k^{-1} d_0, \quad (5.1)$$

где  $d_0$  – отверстия фильтра.

Вторая частица песка будет мигрировать через первую, если ее диаметр

$$d_2 < k^{-1} d_1. \quad (5.2)$$

Некоторая частица песка  $d_i$  будет мигрировать через  $n$  частиц до частицы диаметром от  $d_{\text{кр.мин}}$  до  $d_{\text{кр.мах}}$ , если выполняются неравенства

$$\begin{aligned} d_i &< k^{-1} d_1; \\ d_i &< k^{-1} d_2; \\ &\dots\dots\dots \\ d_i &< k^{-1} d_{n-1}; \\ d_i &< k^{-1} d_n. \end{aligned} \quad (5.3)$$

Кроме геометрического критерия на суффозию влияет скорость фильтрации, определяемая по формуле С.В. Избаш и

Л.И. Козловой. По мере удаления от каркаса фильтра уменьшаются скорость фильтрации и крупность частиц песка, подверженных миграции, снижается вероятность суффозии. В этой связи, с удалением от каркаса фильтра характер естественного распределения частиц песка в прифильтровой зоне менее подвержен изменению под воздействием откачки. На некотором расстоянии от каркаса фильтра естественный фильтр не образуется. По мере приближения к каркасу фильтра наиболее мелкие частицы начинают перемещаться. С некоторого расстояния от каркаса фильтра скорость фильтрации принимает значения, обеспечивающие суффозию более крупных частиц песка размером до  $d_{кр.мах}$ .

В процессе откачки в прифильтровой зоне не формируется естественный фильтр, в котором частицы укладываются в порядке убывания крупности от каркаса фильтра в направлении стенок скважины, как считалось ранее. Этому препятствуют средние фракции песка. В естественном фильтре можно выделить три характерные зоны. В первой зоне образуются цепочки из частиц близкой крупности, т.е. образуется система чередующихся гряд из нескольких частиц с постепенным увеличением или уменьшением размеров. Во второй зоне характер выделения печочек из частиц приблизительно одинаковой крупности проявляется слабее. Это объясняется тем, что с удалением от фильтра-каркаса скорости потока снижаются и не все частицы участвуют в формировании естественного фильтра. В третьей – характерной зоне естественного фильтра, наиболее приближенной к пласту, изменения первоначального сложения частиц песка в прифильтровой зоне почти не наблюдается.

## 5.2. КАРКАСЫ ФИЛЬТРА

В качестве каркасов фильтра используют разные конструкции, которые подробно описаны в работах В.С. Алексева и других авторов. В мировой практике производства фильтров наметилась четкая тенденция замены многообразных конструкций на каркасы с проволочной обмоткой. Это относится только к условиям, когда продуктивный пласт сложен песками различного фракционного состава. В относительно устойчивых породах, валунно-галечных отложениях нет смысла обматывать перфорированные каркасы проволокой или другим материалом.

Проволочные фильтры, одну из первых конструкций которых разработал Ф.С. Бояринцев в 1952 г., претерпели существенные изменения. Прежде всего это касается перехода с круглого сечения проволоки на фигурное. В случае круглого сечения прово-

лочной обмотки поверхность образуемой щели, контактирующая с породой, имеет форму клина. При откачке щель заполняется породой и возникает расклинивающий эффект, способствующий интенсивному уплотнению породы, закупорке фильтра.

Закупорка щелей при наличии в пласте мелких фракций песка и шлама, неоднородности гравийной обсыпки, наличии в ней кольматантов происходит быстро, в первые секунды откачки. Мелкие фракции и кольматант цементируют поровое пространство между более крупными частицами, находящимися в контакте с поверхностью проволоки, многократно снижая тем самым эффективную скважность фильтрующей поверхности. При этом осложняется раскольматация прифильтровой зоны, что вызывает необходимость предъявления жестких требований к технологии вскрытия пласта, расширению, фракционированию и намыву гравия.

Фирмой «Джонсон» [Великобритания] было предложено профилировать проволоку перед намоткой на каркас. Сечение профилированной проволоки получали треугольным. При навивке проволоки на опорные стержни каркаса одна из вершин треугольника направляется внутрь фильтра перпендикулярно его продольной оси симметрии.

Поверхность фильтра, контактирующая с породой, получается гладкой, без впадин около щелей и выступов между ними. В процессе откачки такая поверхность щели не способствует цементации и уплотнению породы вблизи фильтрующей поверхности, а наоборот, стимулирует вынос частиц, меньших по размеру ширины щели, и очищение прифильтровой зоны от шлама, мелких фракций и кольматантов.

Гидравлическое сопротивление фильтров с профилированным сечением обмотки меньше, чем с круглым, не только из-за большей проницаемости контактной зоны фильтрующей оболочки с породой. При прохождении потока через щель, имеющую в поперечном сечении форму расходящегося внутрь каркаса насадка, струя в момент вхождения в щель сжимается. Максимальное сжатие струи наблюдается не у фильтрующей поверхности, а на расстоянии 1–2 мм от нее внутрь. В интервале потока, характеризующегося минимальным сечением, скорости струи максимальны. С увеличением скорости, согласно уравнению Бернулли, уменьшается статическая составляющая и по аналогии со струйными аппаратами возникает вакуум. Вакуум также возникает между фильтрующей поверхностью и сечением максимального сжатия струи. На величину вакуума влияет сопротивление фильтра из профилированной проволоки меньше, чем круглой, в контакте с водной средой.

Кроме фирмы «Джонсон» аналогичные фильтры выпускают и другие ведущие фирмы, такие как «Бейкер» [США], «Нагаока» [Япония]. Профилированная проволока прикрепляется к опорным стержням каркаса контактной сваркой, что обеспечивает сплошность щели и необходимую прочность и целостность конструкции.

Недостатком известных конструкций считается перпендикулярность оси симметрии щелей фильтра оси симметрии скважины и фильтровой колонны. Такое пространственное расположение отверстий рационально только в том случае, когда мы имеем дело с плоскопараллельным фильтрационным потоком в скважину и скорость притока в фильтр в любом сечении независимо от длины постоянна. На практике плоскопараллельная фильтрация, как и радиально-сферичная, не встречается.

Обычно характер фильтрации носит промежуточный характер между плоскопараллельным и радиально-сферичным потоком. Прямое доказательство этого – эпюра входных скоростей в фильтр. Максимальные скорости фильтрации наблюдаются в верхних сечениях фильтра и постепенно (не линейно) убывают по направлению к забою скважины. При плоскопараллельной фильтрации входная скорость по длине фильтра – постоянная величина, а при радиально-сферичной фильтрации работает только верхний участок фильтра высотой, соответствующей его радиусу (остальная часть фильтра не работает). В этой связи очевидно, что градиент фильтрационного потока в реальных скважинных условиях направлен не перпендикулярно оси скважины (и параллельно пласту) и не в направлении верхних отверстий фильтра, а занимает определенное промежуточное положение, зависящее от свойств пласта, его размеров, режимов эксплуатации и др.

При фильтрации потока через известный фильтр направление движения флюида не совпадает с направлением градиента фильтрации, который перпендикулярен линии постоянного давления в околоскважинной зоне. Поэтому известная конструкция фильтра выполняет функцию местного сопротивления, заставляющего поток при прохождении через фильтрующую оболочку временно изменять свое направление. Следовательно, при использовании известного фильтра в реальных условиях возникают дополнительные потери напора, обусловленные несовпадением направления и градиента фильтрации, снижаются эксплуатационные характеристики скважины.

Несовпадение оси симметрии отверстия и фильтрационного потока в отверстиях приводит к возникновению асимметричной нагрузки на арочные, мостовые структуры из частиц песка во-

круг отверстий, что способствует снижению их устойчивости, периодическому разрушению и суффозии.

Скорости фильтрации в фильтр  $v$  возрастают от нижних к верхним отверстиям по зависимости

$$v = v_0 \operatorname{ch} \frac{566 \mu n l}{D_\phi}, \quad (5.4)$$

где  $v_0$  – скорость фильтрации в нижних отверстиях фильтра или в сечении, на котором осуществляется приток;  $d_\phi$  – диаметр фильтра (скважины);  $\mu n$  – гидравлический параметр фильтра

$$\mu n = \frac{D_\phi}{566 l} \operatorname{arctg} \left( 0,246 \frac{D_\phi^2 \sqrt{J_5}}{Q} \right); \quad (5.5)$$

$J_5$  – разность пьезометрических уровней снаружи и внутри фильтра в конечном сечении;  $Q$  – расход через фильтр.

Увеличение скорости фильтрации в верхних сечениях фильтра и соответственно уменьшение в нижних вызвано перетеканием жидкости из нижних сечений пласта в верхние по мере фильтрации, т.е. наличием вертикальной составляющей скорости потока. Переток жидкости из нижних в верхние сечения пласта и фильтра, наличие вертикальной составляющей скорости фильтрации обусловлены перепадом давления между верхними и нижними сечениями пласта и фильтра, вертикальной составляющей градиента давления. Перепад давления на верхних отверстиях фильтра значительно выше, чем на нижних. Перепад давления на фильтре как функцию высоты отверстий можно определить, пользуясь известной формулой истечения жидкости из затопленного отверстия,

$$v = \mu n \sqrt{2 g J_5}. \quad (5.6)$$

Приравнивая правые части выражения (5.4) и (5.6), получаем

$$v_0 \operatorname{ch} = \frac{566 \mu n l}{D_\phi} \mu n \sqrt{2 g J_5}$$

или

$$J_5 = \frac{1}{2g} \left( \frac{v_0}{\mu n} \right) \operatorname{ch} \frac{566 \mu n l}{D_\phi}. \quad (5.7)$$

Закон распределения перепада давления на фильтрующей оболочке по длине фильтра можно получить также, используя

известную формулу зависимости скорости фильтрации от длины фильтра, подчиняющуюся закону гиперсинусов,

$$v = \frac{\text{sh}\gamma l}{\text{sh}\gamma}, \quad (5.8)$$

где  $\gamma$  – параметр распределения притока.

Решая совместно (5.8) и (5.6), получаем

$$\frac{\text{sh}\gamma l}{\text{sh}\gamma} = \mu n \sqrt{2gJ_5}. \quad (5.9)$$

Преобразуя (5.9), получаем закон распределения давления по длине фильтра

$$J_5 = \frac{1}{g} \left( \frac{\text{sh}\gamma l}{\mu n \text{sh}\gamma} \right). \quad (5.10)$$

Закон распределения перепада давления на фильтре по его длине может быть получен при обработке данных расходомерии с учетом выражения (5.4).

С помощью зависимостей (5.7), (5.10), на основании экспериментальных данных, реальных результатов расходомерии строят в масштабе эпюру распределения скоростей фильтрации по длине фильтра (рис. 5.1). По полученной эпюре с помощью выражения (5.6) и зависимостей (5.7) и (5.10) строят эпюру перепада давления на поверхности фильтра по его длине (рис. 5.2).

Поверхность постоянного давления в околоскважинной зоне может быть найдена различными способами, например методом гидродинамического, математического и физического моделирования или непосредственным расчетом. Метод непосредственного расчета основан на сопоставлении зависимостей (5.7), (5.10) и уравнения изменения давления по мере удаления от скважины. Характер изменения давления с расстоянием от скважины определяется выражением

$$J_5 = \frac{\tau Q}{2\pi km} \ln \frac{R}{r} + \frac{\tau Q^2}{4\pi^2 k' m^2} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right), \quad (5.11)$$

где  $\tau$  – вязкость флюида;  $k$ ,  $k'$  – коэффициент соответственно ламинарной и турбулентной фильтрации;  $m$  – мощность пласта;  $R$  – радиус влияния скважины;  $r$  – расстояние от оси скважины, на котором получено значение давления  $J_5$ .

Режим фильтрации флюида в околоскважинной зоне оценивается по следующей методике. В случае ламинарной фильтрации давление в пласте по мере удаления от оси скважины определяется первым членом уравнения (5.11), а при турбулентной –





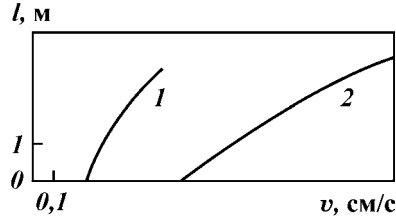


Рис. 5.1. Зависимость длины фильтра от входной скорости притока для разных режимов: 1 – ламинарный; 2 – турбулентный

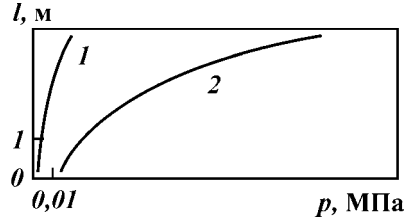


Рис. 5.2. Зависимость длины фильтра от давления на него для разных режимов: 1 – ламинарный; 2 – турбулентный

вторым. Поверхность постоянного давления определяется величиной радиуса  $r$  на некотором уровне фильтра, находящемся от нижних отверстий на расстоянии  $l$ , при котором давление остается постоянным. Зависимость  $r$  от  $l$  при  $J_5 = \text{const}$  можно определить, приравняв правые части уравнений (5.7) и (5.11).

Для ламинарного режима получим

$$\frac{v_0^2}{2g(\mu n)^2} \text{ch} \frac{566\mu n l}{D_\phi} = \frac{\tau Q}{2\pi k m} \ln(r/r_0), \quad r = r_0 e^{\left( \frac{\pi k m v_0^2}{g(\mu n)^2 \tau a} \text{ch} \frac{283\mu n l}{r_0} \right)}. \quad (5.12)$$

С учетом равенства (5.10) получим формулу поверхности постоянного давления в околоскважинной зоне, используя гиперсинусоидальный закон распределения скорости по длине фильтра,

$$\frac{1}{2g} \left( \frac{\text{sh} \gamma l}{\mu n \text{sh} \gamma} \right)^2 = \frac{\tau Q^2}{4\pi^2 k' m} \ln \frac{r}{r_0};$$

$$r = r_0 e^{\frac{\pi k m (\text{sh} \gamma l)^2}{\tau g Q (\mu n \text{sh} \gamma)}}. \quad (5.13)$$

В случае турбулентного режима фильтрации имеем

$$\frac{v_0^2}{2g(\mu n)^2} \text{ch} \frac{566\mu n l}{D_\phi} = \frac{\tau Q^2}{4\pi^2 k' m^2} \left( \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r} \right),$$

$$r = \frac{1}{\frac{1}{r_0} - \frac{k'(\pi m v_0)^2}{g \tau Q (\mu n)^2} \text{ch} \frac{283\mu n l}{r_0}}. \quad (5.14)$$

Используя уравнение (1.9) для турбулентного режима фильтрации, получаем

$$\frac{1}{g} \left( \frac{\text{sh} \gamma l}{\mu n \text{sh} \gamma} \right) = \frac{\tau Q^2}{4\pi^2 k' m^2} \left( \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r} \right),$$

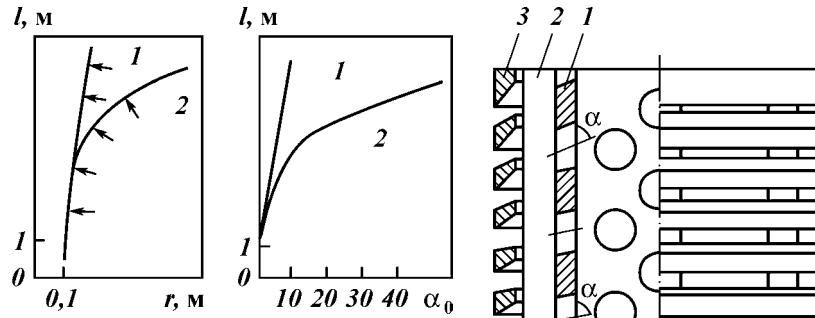


Рис. 5.3. Распределение постоянного давления в околоскважинной зоне:  
1 – ламинарный режим; 2 – турбулентный режим

Рис. 5.4. Проволочный фильтр с профилированным сечением обмотки и изменяющимся углом наклона щели к оси каркаса:  
1 – перфорированный каркас; 2 – опорные штыри; 3 – проволока

$$r = \left[ \frac{1}{r_0} - \frac{k^{-1}}{2g\tau} \left( \frac{\text{sh}\gamma l}{\mu n \text{sh}\gamma} - \frac{2\pi m}{Q} \right)^2 \right]^{-1}. \quad (5.15)$$

Формулы (5.12)–(5.15) характеризуют закон распределения зоны постоянного давления как функцию длины фильтра и расстояния от скважины для ламинарного и турбулентного режимов фильтрации флюида в околоскважинной зоне.

В масштабе строят поверхность постоянного давления в околоскважинной зоне (рис. 5.3). Проведя к полученной поверхности перпендикуляр к любой точке (эпюры на рис. 5.3), получаем направление градиента давления в данной точке (на определенном расстоянии от нижних отверстий), рациональное направление выполнения отверстий фильтра. Зная рациональное направление оси симметрии отверстий фильтра по его длине, получаем нужное расположение отверстий фильтра (рис. 5.4).

Рассмотрим пример подбора фильтра в конкретных условиях. Скважина вскрыла водоносный пласт мощностью 5 м, сложенный тонкозернистыми песками с коэффициентом фильтрации 1 м/сут. Расчеты показали, что при известной конструкции скважины при расходе 1 л/с наблюдается ламинарный режим фильтрации в околоскважинной зоне, а при расходе 2 л/с – турбулентный. При откачке с дебитом 0,8 л/с получаем характер изменения скоростей фильтрации и перепадов давления на фильт-

ре (табл. 5.1). Рассмотрим участок фильтра в интервале от 0,85 до 1,45 м от нижних отверстий.

Закон распределения скорости по длине фильтра в этом случае описывается выражением (5.8) с параметром  $\gamma = 1$ .

При использовании в расчетах удобных размерностей  $Q$ , л/с;  $l$ , м;  $k$ , м/сут;  $\Delta J_5$ , м;  $m$ , м, рекомендуется использовать в формуле (5.11) переводной коэффициент 2,73. Тогда первый член равенства (5.11) можно представить как

$$Q = \frac{2,73kl\Delta J_5}{\lg \frac{r}{r_0}}; \quad r/r_0 = 10^{\frac{2,73kl\Delta J_5}{Q}};$$

$$r = r_0 \cdot 10^{\frac{2,73kl\Delta J_5}{Q}}, \quad (5.16)$$

где  $r_0$  – радиус скважины у нижних работающих отверстий фильтра;  $r$  – радиус прифилтровой зоны выше нижних работающих отверстий фильтра, на котором наблюдается такое же давление, как и на удалении  $r_0$  у нижних отверстий.

Подставляя в уравнение (5.16) исходные данные, получаем

$$r = r_0 \cdot 10^{\frac{17,06\Delta J_5}{Q}}. \quad (5.17)$$

Расчеты по формуле (5.7) позволили определить распределение зоны постоянного давления по длине рассматриваемого интервала. Результаты расчетов представлены в табл. 5.1 в графе 5. Графа 4 характеризует перепад давления между различными сечениями фильтра. В графе 6 показана величина приращения радиуса прифилтровой зоны, на которую удаляется поверхность постоянного давления от скважины. Так, на интервале фильтра 0,85–0,95 м радиус зоны постоянного давления увеличился с 0,089 до 0,0925, т.е. приращение радиуса  $\Delta r = 0,0035$  м.

Таблица 5.1

$l$ , м	$v$ , см/с	$J_5$	$\Delta J_5$	$r$ , м	$\Delta r$ , м	$a^\circ$
1	2	3	4	5	6	7
0,85	0,26	0,0017	–	0,089	–	–
0,95	0,30	0,0027	0,001	0,0925	0,0035	2
1,05	0,347	0,0039	0,0012	0,097	0,0045	2,5
1,15	0,405	0,0056	0,0017	0,104	0,007	4
1,25	0,475	0,0074	0,0023	0,114	0,01	6
1,35	0,57	0,0105	0,0026	0,126	0,012	7
1,45	0,675	0,0132	0,0027	0,14	0,014	8

Примечание.  $\Delta l = 0,1$  м.

Угол наклона градиента давления и скорости фильтрации по поверхности, перпендикулярной оси скважины и фильтра,

$$\alpha = \arctg \frac{\Delta r}{\Delta l}. \quad (5.18)$$

Подставляя в уравнение (5.18) значения из табл. 5.1 (графа 6), получаем угол наклона градиента и скорость фильтрации к оси симметрии пласта  $\alpha$ . Как показали расчеты, вектор скорости и градиенты фильтрации на интервале фильтра 0,85–1,45 м изменяет угол наклона к поверхности, перпендикулярной оси скважины и фильтра от 2 до 8°.

В этой связи целесообразно изменять направление отверстий фильтра по длине фильтра на участке от 0,85 до 1,45 м. На участке фильтра 0,85–0,95 м рациональный наклон отверстий к поверхности, перпендикулярной оси скважины и фильтра, составил 2°, на участке 1,15–1,25 м – 6°, а на участке 1,35–1,45 м – 8°.

В данных условиях целесообразно использовать фильтр, в котором ось симметрии отверстий наклона к поверхности перпендикулярной оси скважины под расчетным углом  $\alpha$ . Оборудовали скважину новой конструкцией фильтра.

Рассмотрим турбулентный приток к фильтру на участке 0,85–0,45 м. При расходе 2,04 л/с в околоскважинной зоне наблюдалась турбулентная фильтрация. Характер распределения входных скоростей в фильтр и перепадов давления на отверстиях представлены в табл. 5.2.

Для удобства расчета второй член уравнения (5.11) преобразовали по аналогии с формулами (5.16) и (5.17):

$$\Delta J_5 = 9,7 \cdot 10^{-3} \left( \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r} \right); \quad \frac{1}{r_0} - \frac{1}{r} = 103,02 \Delta J_5. \quad (5.19)$$

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r_0} - 103,02 \Delta J_5; \quad r = \left( \frac{1}{r_0} - 103,02 \Delta J_5 \right)^{-1}. \quad (5.20)$$

Таблица 5.2

$l$ , м	$v$ , см/с	$J_5$	$\Delta J_5$	$r$ , м	$\Delta r$ , м	$\alpha^\circ$
1	2	3	4	5	6	7
0,85	0,705	0,0125	–	0,089	–	–
0,95	0,835	0,0167	0,0042	0,092	0,003	2
1,05	0,975	0,0233	0,0066	0,098	0,006	3,5
1,15	1,102	0,0337	0,0104	0,109	0,009	5,2
1,25	1,29	0,0477	0,014	0,129	0,02	1,2
1,35	1,465	0,0697	0,022	0,182	0,053	0,8
1,45	1,655	0,0978	0,0281	0,384	0,202	64,0

Примечание.  $\Delta l = 0,1$  м.

Результаты расчетов по формуле (5.20) представлены в табл. 5.2 в графах 5 и 6. Угол наклона градиента и скорости фильтрации в околоскважинной зоне определяют по формуле (5.18) (см. графу 7).

На участке фильтра 0,85–1,5 м рациональный наклон отверстий фильтра к поверхности, перпендикулярной его продольной оси, изменяется от 2 до 64°.

Сопоставляя ламинарный и турбулентный режимы фильтрации флюида к скважине, становится очевидным, что при ламинарном режиме вектор градиента и скорости фильтрации, а также и рационального направления выполнения отверстий фильтра более плавно изменяет свое пространственное положение по длине фильтра, чем при турбулентном режиме.