

УДК 628.112

ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОМЫВНОГО ПОТОКА ПРИ СВАБИРОВАНИИ ВОДОЗАБОРНЫХ СКВАЖИН

В. В. Ивашечкин¹, А. А. Артёмчик², А. В. Житко³

¹ Д. т. н., профессор кафедры гидротехнического и энергетического строительства, водного транспорта и гидравлики, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: ivashechkin_vlad@bntu.by

² Ассистент кафедры водоснабжения и водоотведения, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: artemchik@bntu.by

³ Аспирант кафедры гидротехнического и энергетического строительства, водного транспорта и гидравлики, Белорусский национальный технический университет, Минск, Беларусь, e-mail: gts@bntu.by

Реферат

В статье приведена методика гидравлического расчета параметров промывного потока при освоении и стимулировании дебита водозаборных скважин способом свабиrowания. Разработана расчетная схема движения фильтрационных потоков в прифильтровой зоне скважины при рабочем ходе сваба. Составлены и решены уравнения баланса расходов и напоров в стволе и гравийной обсыпке, учитывающие обходной расход под сваб и приток воды из пласта через гравийную обсыпку, приемистость пласта, подъем уровня в надфильтровой трубе и понижение напора под свабом. Получены расчетные зависимости для определения повышения пьезометрического уровня воды в надфильтровой колонне над статическим уровнем и понижения напора под свабом в процессе его подъема. Это позволяет вычислять значения промывной скорости в гравийной обсыпке в зависимости от положения сваба в фильтре, скорости его перемещения, геометрических параметров скважины и ее гидравлических характеристик, а также рассчитывать технологические параметры обработки фильтра в зависимости от степени его кольматации.

Приведён пример расчета. Показано, что значение промывной скорости в порах обсыпки зависит от положения движущегося сваба в фильтре. Наибольшие скорости характерны для нижней части фильтра, где вначале подъема под свабом формируется наибольшее разрежение. В дальнейшем с увеличением высоты подъема сваба в фильтре промывная скорость уменьшается по экспоненциальной зависимости.

Установлено, что абсолютные значения промывных скоростей возрастают с увеличением глубины воды над верхом фильтра и скорости движения сваба. Поэтому при обработках мелких скважин промывные скорости можно увеличить за счет увеличения скорости подъема сваба.

Ключевые слова: водозаборная скважина, свабиrowание, сваб, регенерация, восстановление дебита, промывная скорость.

HYDRAULIC CALCULATION OF FLUSHING FLOW PARAMETERS DURING SWABBING OF WATER INTAKE WELLS

V. V. Ivashechkin, A. A. Artemchik, A. V. Zhytko

Abstract

The paper presents a methodology for the hydraulic calculation of flushing flow parameters during the development and yield stimulation of water intake wells by swabbing. A computational model for the movement of seepage flows in the near-screen zone of the well during the working stroke of the swab has been developed. Flow rate and head balance equations for the wellbore and gravel pack have been formulated and solved, taking into account the bypass flow rate under the swab, water inflow from the formation through the gravel pack, formation intake capacity, fluid level rise in the tubing above the screen, and pressure drop under the swab. Analytical relationships have been derived to determine the rise of the water piezometric level in the tubing above the screen relative to the static level, and the pressure drop under the swab during its upward movement. This allows for calculating the flushing velocity values in the gravel pack depending on the swab position in the screen, its movement speed, the well's geometric parameters and hydraulic characteristics, as well as calculating the technological parameters of the screen treatment depending on the degree of its clogging.

A calculation example is provided. It is shown that the flushing velocity in the pores of the gravel pack depends on the position of the moving swab in the screen. The highest velocities are characteristic of the lower part of the screen, where the maximum drawdown is initially formed under the swab at the beginning of the upstroke. Subsequently, as the swab lift height in the screen increases, the flushing velocity decreases following an exponential relationship.

It has been established that the absolute values of flushing velocities increase with the depth of water above the top of the screen and the swab movement speed. Therefore, when treating shallow wells, flushing velocities can be increased by raising the swab lifting speed.

Keywords: water intake well, water well, swabbing, swab, regeneration, flow rate recovery, flushing velocity.

Введение

Свабиrowание широко применяется в качестве способа освоения водозаборных скважин после бурения для удаления оставшейся на прифильтровой поверхности пласта глинистой корки, механических примесей из прифильтровой зоны и фильтра. Для регенерации снизивших дебит скважин в процессе эксплуатации этот способ применяется достаточно редко.

Сущность способа заключается в подъеме с достаточно высокой скоростью в фильтре скважины специального поршня-сваба [1–11]. Наибольшая эффективность свабиrowания достигается в глубоких скважинах, пробуренных в напорных водоносных горизонтах, так как здесь можно создать глубокую депрессию, обеспечивающую вынос остатков бурового раствора и кольматирующих отложений из фильтра и гравийной обсыпки. При незначительных глубинах водозаборных скважин и для ускорения работ применяют свабиrowание с одновременной откачкой эрлифтом, при этом устье скважи-

ны оборудуют специальным оголовком с сальниковым уплотнением. Положительный эффект обеспечивается также, если проводить свабиrowание с промывкой скважины [7, 12].

Свабиrowание нашло широкое применение в нефтедобыче. Его применение известно еще с 30-х годов прошлого века. Существуют различные способы и технологии свабиrowания. Величина депрессии на пласт при свабиrowании является одним из основных параметров при проектировании работ по опробованию, освоению и исследованию скважин. Процесс свабиrowания реализуется с помощью подъемных агрегатов для ремонта скважин, включающих лебедку с тартальным барабаном и соответствующим комплектом оборудования, а также специальных мобильных установок, смонтированных на шасси автомобиля высокой проходимости [13, 14]. Технология свабиrowания скважин по своим возможностям является одним из наиболее гибких способов вызова притока воды и нефти из скважин и может быть реализована с помощью свабов различных конструкций.

Строительство

<https://doi.org/10.36773/1818-1112-2026-140-2-9-14>

Чаще всего для освоения водозаборных скважин применяют свабы в виде трубы с обратным шаровым клапаном. При подъеме сваба вверх клапан закрывается, а при спуске вниз – открывается. При такой конструкции свабы можно перемещать в скважине на тросе, располагая сверху для нагрузки несколько буровых труб. В верхней части свабы находятся разгрузочные отверстия для выхода воды, переходник для крепления буровых труб, а по внешнему периметру приварен опорный фланец, на котором стяжными болтами закреплены два съемных фланца и сменная резиновая манжета. Это позволяет применять свабирование на скважинах с любыми диаметрами фильтров. Для этого необходимо изготовить набор фланцев и резиновых манжет соответствующих размеров.

В БНТУ предложено проводить регенерацию водозаборных скважин способом линейного свабирования в реагенте, который заключается в создании знакопеременных потоков реагента в фильтре и прифилтровой зоне водозаборной скважины путем возвратно-поступательного движения свабы на участке фильтра, ограниченного пакерами [15–17]. Возникающий знакопеременный фильтрационный поток реагента в прифилтровой зоне является определяющим фактором, интенсифицирующим процесс растворения колюматизирующих отложений. Для расчета значений скорости движения реагента в прифилтровой зоне были составлены и решены уравнения баланса расходов и напоров при движении свабы в замкнутой камере, ограниченной пакерами.

Однако, учитывая некоторые технологические сложности реализации реагентного свабирования на участках фильтра, ограниченных пакерами, по сравнению с обработками в открытом фильтре, представляло интерес провести теоретические исследования гидравлических параметров фильтрационного потока, возникающих при движении свабы в открытом фильтре.

В работе Джона Листа [18] представлено математическое моделирование установившегося движения фильтрационных потоков в гравийной обсыпке фильтра, возникающих в результате подъема свабы внутри фильтра скважины [18]. Результаты моделирования представлены в виде соотношений тангенциальной (продольной) и радиальной скоростей в гравийной обсыпке к некоторой «масштабирующей» скорости в точке, находящейся на границе гравийной обсыпки и пласта в сечении напротив свабы. В то же время в выражение для «масштабирующей» скорости входит перепад давления на свабе, который неизвестен. Из материалов работы [18] неясно, как определять численные значения тангенциальной скорости напротив свабы и градиента фильтрации в гравийной обсыпке в зависимости от скорости движения свабы, геометрических и фильтрационных параметров гравийной обсыпки и пласта, чтобы обеспечить эффективное удаление загрязнений и назначить необходимые технологические параметры обработки.

Отсутствие в литературе других теоретических моделей, описывающих процесс свабирования в водозаборных скважинах, сдерживает широкое внедрение этой технологии, в частности, для регенерации снизивших свою производительность скважин в процессе эксплуатации.

В этой связи была сформулирована цель работы, которая заключается в установлении зависимостей величины промывного потока от технологических параметров обработки способом свабирования в открытом фильтре, геометрических и гидрогеологических характеристик очищаемой скважины.

Для сведения гидродинамической задачи к практически применимому инженерному решению в настоящей работе предложен подход, в основе которого лежит закон сохранения массы, реализованный через два уравнения баланса расходов жидкости в надсвабовой и подсвабовой полостях скважины.

Первое уравнение учитывает расходы воды, нагнетаемые свабом в надсвабовую полость скважины: 1) в надфилтровую трубу; 2) в пласт над свабой; 3) непосредственно под свабу по гравийной обсыпке, вследствие перепада давлений между полостями. Второе уравнение баланса расходов жидкости учитывает: 1) расход, поступающий в подсвабовую полость скважины из пласта через обнажаемый участок фильтра; 2) расход, поступающий непосредственно под свабу по гравийной обсыпке, вследствие перепада давлений между полостями.

Предложенная модель, учитывает следующие факторы.

1. Геометрические параметры – диаметр скважины, длину фильтра, диаметр свабы, толщину манжеты свабы, высоту столба воды над верхом фильтра.

2. Параметры процесса по стимулированию притока воды – скорость движения свабы, задающую значения промывных скоростей в порах обсыпки, и интенсивность создания понижения напора под свабом.

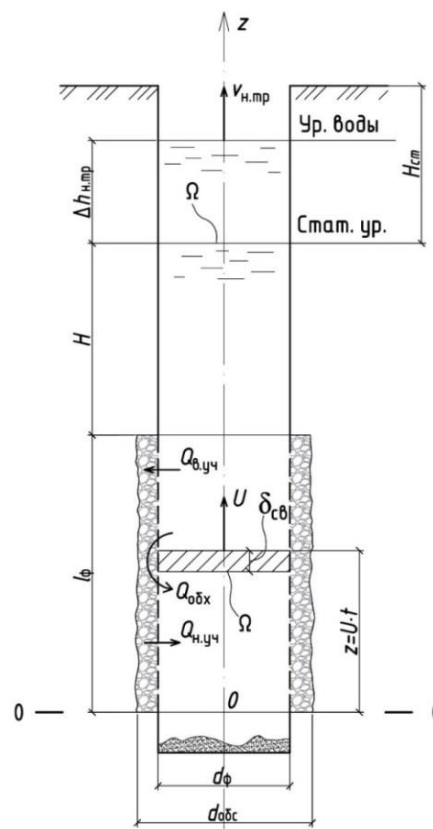
3. Гидродинамические свойства среды – коэффициент фильтрации и коэффициент пористости обсыпки, удельный дебит и приемистость водоносного пласта.

Такой подход предполагает обеспечить необходимый баланс между физической достоверностью описания гидродинамики процесса и вычислительной эффективностью, применимость к конкретным гидрогеологическим условиям, позволяя рассчитать технологический режим свабирования.

Расчет параметров фильтрационного потока

Рассмотрим гидродинамику жидкости при движении свабы внутри фильтра. Будем исходить из того, что на холостом ходу сваба смещается из верхней части фильтра в нижнюю под действием собственного веса и веса буровых штанг, при этом основной поток жидкости проходит через обратный клапан. Рабочий ход свабы (снизу вверх) осуществляют принудительным усилием, и основной поток жидкости огибает свабу по гравийной обсыпке. В дальнейшем будем рассматривать только рабочий ход свабы.

Расчетная схема движения жидкости на участке фильтра при рабочем ходе свабы представлена на рисунке 1.



$l_{ф}$ – длина фильтра; $d_{ф}$ – внутренний диаметр фильтра; $d_{обс}$ – наружный диаметр контура обсыпки; Ω – площадь манжеты свабы (равная площади поперечного сечения фильтра и надфилтровой трубы);

$\delta_{св}$ – толщина манжеты свабы; $H_{ст}$ – глубина статического уровня;

H – высота столба жидкости над фильтром до статического уровня;

$\Delta h_{н.тр}$ – повышение пьезометрического уровня воды в надфилтровой трубе над статическим уровнем в скважине; $V_{н.тр}$ – средняя скорость подъема уровня жидкости в скважине; U – скорость подъема свабы;

t – время перемещения свабы от начала отсчета; z – расстояние, пройденное свабой;

$Q_{н.тр}$ – расход, поступающий в надфилтровую трубу;

$Q_{в.уч}$ – расход, вытесняемый в пласт через верхний участок фильтра;

$Q_{обх}$ – обходной расход под свабу по гравийной обсыпке

Рисунок 1 – Расчетная схема движения жидкости в фильтре при рабочем ходе свабы

Начало отсчета – плоскость 0–0 – разместим на уровне низа фильтра длиной l_ϕ . Вертикальную ось z направим вертикально вверх вдоль оси скважины. Глубину воды над верхом фильтра обозначим через H . Пусть сваб, имеющий манжету толщиной δ с площадью Ω , перемещается вверх равномерно со скоростью U и находится через время t на расстоянии $z = U \cdot t$ от начала отсчета.

При принудительном движении сваба вверх, он как бесклапанный поршневой насос одностороннего действия создает избыточный напор в верхней полости фильтра, под действием которого некоторая часть жидкости вытесняется через верхнюю часть фильтра в пласт, другая часть – в надфильтровую трубу, а оставшаяся часть перетекает в обход сваба по гравийной обсыпке в зону низкого давления под сваб. Обозначим через $Q_{св}$ подачу сваба

$$Q_{св} = U \cdot \Omega, \quad (1)$$

где U – скорость подъема сваба;

Ω – площадь манжеты сваба (равная площади поперечного сечения фильтра и надфильтровой трубы).

При равномерном движении сваба вверх получаем два уравнения:

1) баланс расходов жидкости, вытесняемых свабом

$$Q_{св} = Q_{н.тр} + Q_{в.уч} + Q_{обх}, \quad (2)$$

где $Q_{н.тр}$ – расход, поступающий в надфильтровую трубу;

$Q_{в.уч}$ – расход, вытесняемый в пласт через верхний участок фильтра;

$Q_{обх}$ – обходной расход под сваб по гравийной обсыпке;

2) баланс расходов жидкости, поступающих под сваб

$$Q_{св} = Q_{н.уч} + Q_{обх}, \quad (3)$$

где $Q_{н.уч}$ – расход, поступающий в нижний участок фильтра из пласта.

Входящие в выражения (2) и (3) параметры определяем следующим образом.

1. Расход жидкости $Q_{н.тр}$, поступающий в надфильтровую трубу, определяем через среднюю скорость $v_{н.тр}$ подъема уровня жидкости в скважине:

$$v_{н.тр} = \frac{\Delta h_{н.тр}}{t}, \quad (4)$$

где $\Delta h_{н.тр}$ – повышение пьезометрического уровня воды в надфильтровой трубе над статическим уровнем в скважине;
 t – время перемещения сваба от начала отсчета.

Тогда расход $Q_{н.тр}$ в надфильтровой трубе на участке подъема уровня равен

$$Q_{н.тр} = \frac{\Delta h_{н.тр} \cdot \Omega}{t}. \quad (5)$$

2. Расход, вытесняемый свабом в пласт через верхний участок фильтра $Q_{в.уч}$, а значит, и поглощаемый пластом, будем находить через коэффициент приемистости q_1 поглощающей скважины, который в общем случае численно равен отношению расхода закачиваемой жидкости Q к повышению пьезометрического уровня Δh над статическим уровнем в скважине, т. е. $q_1 = Q/\Delta h$ [19]. При этом исходим из того, что коэффициент приемистости q_1 совершенной по степени вскрытия пласта водозаборной скважины, как и ее удельный дебит q , прямо пропорционален мощности пласта m , равной длине фильтра l_ϕ , т. е. $m = l_\phi$ [20]. Принимая равномерное поглощение жидкости по всей длине верхнего участка фильтра длиной $(l_\phi - Ut)$, получим

$$Q_{в.уч} = \frac{q_1 (l_\phi - Ut)}{l_\phi} \Delta h_{н.тр}, \quad (6)$$

3. Обходной расход под сваб $Q_{обх}$ по гравийной обсыпке найдем исходя из формулы Дарси, записанной для турбулентного режима движения:

$$Q_{обх} = v_{обс} \cdot \omega_{обс} = k_{обс} l^{0.5} \omega_{обс} = k_{обс} \cdot \omega_{обс} \cdot \left(\frac{(l_\phi - Ut) + H + (\Delta h_{н.тр} + \Delta h_{св})}{\delta_{св}} \right)^{0.5}, \quad (7)$$

где $v_{обс}$ – средняя скорость движения жидкости в поперечном сечении гравийной обсыпки;

$\omega_{обс}$ – площадь поперечного сечения гравийной обсыпки;

$k_{обс}$ – коэффициент фильтрации обсыпки;

l – градиент фильтрации в гравийной обсыпке;

H – высота столба жидкости над фильтром до статического уровня;

$\Delta h_{св}$ – понижение напора под свабом по отношению к пьезометрическому напору;

$\delta_{св}$ – толщина манжеты сваба.

После подстановки выражений (5)–(7) в выражение (2) получим:

$$U\Omega = \frac{\Delta h_{н.тр} \cdot \Omega}{t} + \frac{q_1 (l_\phi - Ut)}{l_\phi} \Delta h_{н.тр} + k_{обс} \cdot \omega_{обс} \left(\frac{(l_\phi - Ut) + H + (\Delta h_{н.тр} + \Delta h_{св})}{\delta_{св}} \right)^{0.5}. \quad (8)$$

4. Промывную скорость в порах обсыпки найдем с учетом коэффициента пористости n материала обсыпки:

$$v'_{обс} = \frac{v_{обс}}{n} = \frac{k_{обс} \left(\frac{(l_\phi - Ut) + H + (\Delta h_{н.тр} + \Delta h_{св})}{\delta_{св}} \right)^{0.5}}{n}, \quad (9)$$

где n – коэффициент пористости обсыпки.

5. Расход, поступающий из пласта в момент времени t в нижний участок фильтра длиной $U \cdot t$, найдем через удельный дебит q_2 сква-

жины и понижение напора под свабом $\Delta h_{св}$. При этом будем исходить из того, что удельный дебит q_2 скважины прямо пропорционален мощности пласта m , равной длине фильтра l_ϕ , т. е. $m = l_\phi$ [20]. Будем считать, что расход $Q_{н.уч}$ поступает равномерно по длине нижнего участка фильтра длиной $U \cdot t$ из пласта. Тогда получим

$$Q_{н.уч} = \frac{q_2 (Ut)}{l_\phi} \Delta h_{св}. \quad (10)$$

6. При подстановке (7) и (10) в (3) получим

$$U\Omega = \frac{q_2 (Ut)}{l_\phi} \Delta h_{св} + k_{обс} \cdot \omega_{обс} \left(\frac{(l_\phi - Ut) + H + (\Delta h_{н.тр} + \Delta h_{св})}{\delta_{св}} \right)^{0.5}. \quad (11)$$

7. Найдем выражения для $\Delta h_{н.тр}$ и $\Delta h_{св}$ с целью вычисления промывной скорости в порах гравийной обсыпки $v'_{обс}$ по выражению (9).

Для этого вычтем из уравнения (8) уравнение (11) и выразим $\Delta h_{св}$:

$$\Delta h_{\text{св}} = \frac{\left(\frac{\Omega}{t} + \frac{q_1(I_{\text{ф}} - Ut)}{I_{\text{ф}}} \right) I_{\text{ф}}}{q_2(Ut)} \Delta h_{\text{н.тр}} = A \Delta h_{\text{н.тр}}, \quad (12) \quad \text{где } A = \frac{\left(\frac{\Omega}{t} + \frac{q_1(I_{\text{ф}} - Ut)}{I_{\text{ф}}} \right) I_{\text{ф}}}{q_2(Ut)}.$$

Подставив выражение (12) в уравнение (11), получим

$$U\Omega = \frac{q_2(Ut)}{I_{\text{ф}}} A \Delta h_{\text{в}} + k_{\text{обс}} \cdot \omega_{\text{обс}} \left(\frac{(I_{\text{ф}} - Ut) + H + (\Delta h_{\text{в}} + A \Delta h_{\text{в}})}{\delta_{\text{св}}} \right)^{0.5}, \quad (13)$$

После преобразования уравнения (13) имеем квадратное уравнение относительно $\Delta h_{\text{н.тр}}$

$$a \Delta h_{\text{н.тр}}^2 - b \Delta h_{\text{н.тр}} + c = 0, \quad (14)$$

$$\text{где } a = \frac{q_2^2(Ut)^2}{I_{\text{ф}}^2} A^2;$$

$$b = - \left(k_{\text{обс}}^2 \omega_{\text{обс}}^2 \left(\frac{1+A}{\delta_{\text{св}}} \right) + 2U\Omega \cdot \frac{q_2(Ut)}{I_{\text{ф}}} A \right);$$

$$c = (U\Omega)^2 - k_{\text{обс}}^2 \omega_{\text{обс}}^2 \left(\frac{I_{\text{ф}} - Ut + H}{\delta_{\text{св}}} \right).$$

Уравнение (14) имеет два корня. Нас интересует корень, удовлетворяющий условию $0 < \Delta h_{\text{н.тр}} < I_{\text{ф}}$.

8. Вычисления производим в следующей последовательности.

Подъем уровня воды $\Delta h_{\text{н.тр}}$ в надфильтровой трубе находим из уравнения (14). Понижение напора $\Delta h_{\text{св}}$ под свабой определяем из выражения (12). Величину промывной скорости $v'_{\text{обс}}$ находим по выражению (9).

$$a = \frac{0,0011^2 (0,3 \cdot 20)^2}{9^2} \cdot 1,727^2 = 1,604 \cdot 10^{-6},$$

$$b = - \left(0,00023^2 \cdot 0,037^2 \left(\frac{1+1,727}{0,1} \right) + 2 \cdot 0,3 \cdot 0,018 \cdot \frac{0,0011(0,3 \cdot 20)}{9} \cdot 1,727 \right) = -1,368 \cdot 10^{-5},$$

$$c = (0,3 \cdot 0,018)^2 - 0,00023^2 \cdot 0,037^2 \cdot \left(\frac{9 - 0,3 \cdot 20 + 30}{0,1} \right) = 2,914 \cdot 10^{-5}$$

Тогда уравнение (14) имеет вид

$$0,1604 \Delta h_{\text{н.тр}}^2 - 1,368 \Delta h_{\text{н.тр}} + 2,914 = 0.$$

Откуда получим $\Delta h_{\text{н.тр}} = 4,122$ м.

$$v_{\text{обс}} = 0,00023 \left(\frac{(9 - 0,3 \cdot 20) + 30 + (4,122 + 7,120)}{0,1} \right)^{0.5} = 0,0048 \text{ м/с},$$

Промывную скорость в порах гравийной обсыпки найдем по формуле (9)

$$v'_{\text{обс}} = \frac{0,0048}{0,25} = 0,019 \text{ м/с} = 1,9 \text{ см/с}.$$

На рисунке 2 представлены графики зависимости промывной скорости в порах гравийной обсыпки $v'_{\text{обс}}$ от положения свабы при различных скоростях его рабочего хода.

Анализ характера кривых $v'_{\text{обс}} = f(z)$ показал, что промывная скорость в порах обсыпки $v'_{\text{обс}}$ уменьшается по экспоненциальной зависимости с увеличением высоты подъема свабы z в фильтре. Сравнительно быстрое снижение промывных скоростей (почти в три раза) характерно для нижней четверти фильтра. На остальной части фильтра темп снижения промывной скорости замедляется. Такой

Рассмотрим пример расчета.

Пример расчета

Исходные данные: высоту столба воды над верхом фильтра $H = 30$ м; фильтр трубчатый с проволоочной обмоткой из нержавеющей стали ТП-6Ф2В с наружным диаметром 188 мм, внутренним диаметром $d_{\text{ф}} = 152$ мм, длина фильтра $l_{\text{ф}} = 9$ м; глубина статического уровня $H_{\text{ст}} = 10$ м; скорость движения свабы $U = 0,3$ м/с; толщина слоя обсыпки $t_{\text{обс}} = 0,05$ м, наружный диаметр контура обсыпки $d_{\text{обс}} = 0,288$ м; толщина манжеты свабы $\delta_{\text{св}} = 0,1$ м; диаметр манжеты свабы $d_{\text{св}} = d_{\text{ф}} = 152$ мм, площадь манжеты свабы $\Omega = 0,018$ м²; коэффициент фильтрации обсыпки $k_{\text{обс}} = 20$ м/сут = $0,00023$ м/с, коэффициент пористости обсыпки $n = 0,25$; коэффициент приемистости и удельный дебит скважины равны между собой, $q_1 = q_2 = 4$ м²/ч = $0,0011$ м²/с.

Решение.

1) Задаём $z = 6$ м, тогда время подъема свабы на эту отметку составит

$$t = \frac{z}{U} = \frac{6}{0,3} = 20 \text{ с}.$$

2) Определяем величину коэффициента A из выражения (12)

$$A = \frac{\left(\frac{0,018}{20} + \frac{0,0011(9 - 0,3 \cdot 20)}{9} \right) \cdot 9}{0,0011 \cdot (0,3 \cdot 20)} = 1,727.$$

3) Находим значения коэффициентов, входящих в уравнение (14)

Тогда, согласно (12), $\Delta h_{\text{св}} = 1,727 \cdot 4,122 = 7,120$ м.

4) Находим скорость движения жидкости через сечение обсыпки с учетом выражения (7):

характер изменения промывной скорости $v'_{\text{обс}}$ при подъеме свабы объясняется снижением значения градиента фильтрации l , обусловленного ростом множителя $U \cdot t$ и уменьшением значения $\Delta h_{\text{св}}$.

С ростом скорости подъема свабы U в диапазоне от 0,3 до 0,9 м/с происходит увеличение промывных скоростей в 1,1–1,5 раза. Наибольшая степень роста промывных скоростей наблюдается в нижней части фильтра.

Достиженные значения промывных скоростей $v'_{\text{обс}} = (1,8–7,5)$ см/с при минимальной скорости подъема свабы $U = 0,3$ м/с обеспечивают создание условий для выноса фильтрационным потоком мелких частиц колыманта из пор гравийной обсыпки и увеличения ее проницаемости.

Графики зависимости промывной скорости в порах обсыпки $v'_{\text{обс}}$ от положения свабы при скорости подъема свабы $U = 0,3$ м/с при различных глубинах воды над верхом фильтра H ($1 - H = 30$ м, $2 - H = 60$ м, $3 - H = 90$ м) представлены на рисунке 3.

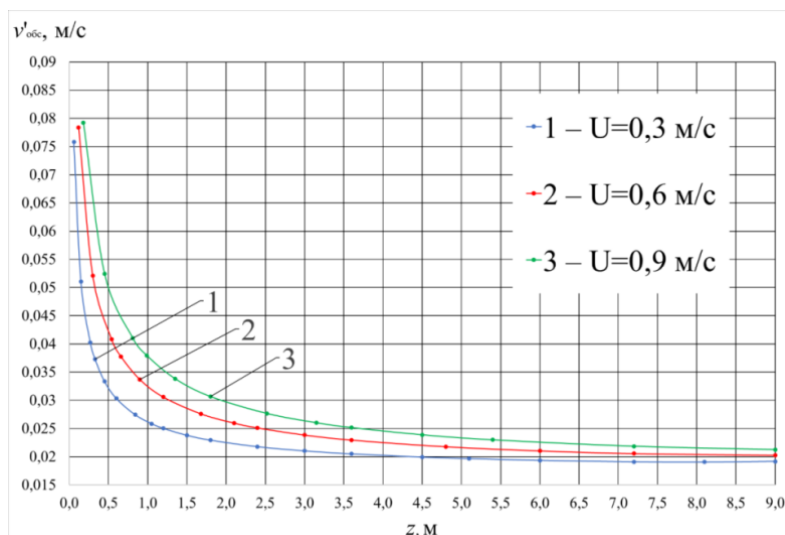


Рисунок 2 – Графики зависимости промывной скорости в порах обсыпки от положения сваба в фильтре скважины $v'_{обс} = f(z)$ при различных скоростях его рабочего хода (1 – $U = 0,3$ м/с, 2 – $U = 0,6$ м/с, 3 – $U = 0,9$ м/с)

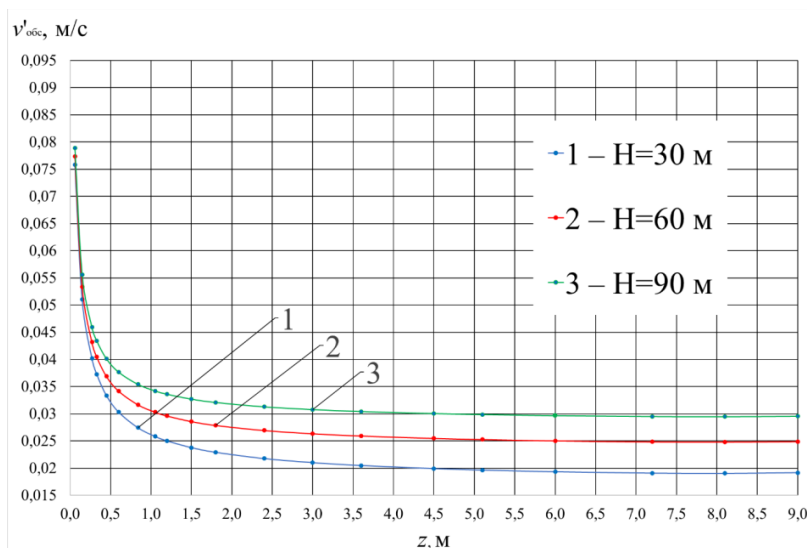


Рисунок 3 – Графики зависимости скорости движения жидкости в порах обсыпки $v'_{обс}$ от положения сваба при скорости подъема сваба $U = 0,3$ м/с при различных глубинах воды над верхом фильтра H (1 – $H = 30$ м, 2 – $H = 60$ м, 3 – $H = 90$ м)

Анализ графиков показал, что с увеличением глубины H в диапазоне от 30 до 90 м происходит рост промывных скоростей в среднем в 1,5 раза при неизменной скорости подъема сваба. Это достигается ростом градиента фильтрации I с увеличением глубины H .

Выводы

1. Проведенный анализ применения способа свабирования в водозаборных скважинах показал, что этот способ широко применяется для освоения водозаборных скважин после бурения с целью удаления оставшейся на прифильтровой поверхности пласта глинистой корки, механических примесей из прифильтровой зоны и фильтра. Отмечено, что этот способ может также применяться для регенерации снизивших дебит скважин в процессе эксплуатации, фильтры которых закольматированы рыхлыми отложениями. В этом случае он может использоваться как самостоятельный способ регенерации. Для регенерации длительно эксплуатирующихся скважин, закольматированных прочными отложениями, способ свабирования можно применять как завершающий этап комплексной импульсно-реагентной обработки, для удаления остаточных отложений из прифильтровой зоны скважин. Указано на отсутствие теоретических исследований, позволяющих рассчитать гидравлические параметры промывных фильтрационных потоков при свабировании в зависимости от геометрических размеров водоза-

борных скважин, гидрогеологических условий их эксплуатации и технологических параметров обработки.

2. Разработана расчетная схема движения фильтрационных потоков в прифильтровой зоне водозаборной скважины при свабировании.

Предложена методика гидравлического расчета скорости промывного фильтрационного потока в порах гравийной обсыпки, которая предусматривает решение системы уравнений баланса воды в стволе и прифильтровой зоне скважины при рабочем ходе сваба. Методика позволяет получить значения промывной скорости в зависимости от скорости движения сваба, геометрических размеров скважины и ее гидравлических характеристик. Установлено, что промывная скорость в порах обсыпки $v'_{обс}$ уменьшается по экспоненциальной зависимости с увеличением высоты подъема сваба z в фильтре и возрастает с увеличением глубины воды H над верхом фильтра и скорости U сваба.

Приведен пример расчета свабирования скважины диаметром 150 мм. С ростом скорости подъема сваба U в диапазоне от 0,3 до 0,9 м/с произошло увеличение промывных скоростей в 1,1–1,5 раза. Наибольшая степень роста промывных скоростей наблюдается в нижней части фильтра.

Достижение значений промывных скоростей в диапазоне $v'_{обс} = (1,8–7,5)$ см/с (при минимальной скорости подъема сваба

$U = 0,3$ м/с) обеспечивает создание достаточных условий для выноса фильтрационным потоком мелких частиц колыманта из пор гравийной обсыпки и увеличения ее проницаемости.

Показано что с увеличением глубины H в диапазоне от 30 до 90 м происходит рост промывных скоростей в среднем в 1,5 раза при неизменной скорости подъема свабы. Это достигается ростом градиента фильтрации i с увеличением глубины H .

Список цитированных источников

1. Тугай, А. М. Эксплуатация и ремонт систем артезианского водоснабжения / А. М. Тугай, И. Т. Прокопчук. – Киев : Будивельник, 1988. – 176 с.
2. Алексеев, В. С. Учебная книга мастера по ремонту скважин на воду / В. С. Алексеев, Г. А. Волоховский, В. Т. Гребенников. – М. : Колос, 1983. – 255 с.
3. Справочник по бурению и оборудованию скважин на воду / В. В. Дубровский, М. М. Керченский, В. И. Плохов [и др.]. – М. : Недра, 1972. – 512 с.
4. Тугай, А. М. Водоснабжение из подземных источников : справочник / А. М. Тугай, И. Т. Прокопчук. – Киев : Урожай, 1990. – 264 с.
5. Квашнин, Г. П. Технология вскрытия и освоения водоносных пластов / Г. П. Квашнин. – М. : Недра, 1987. – 247 с.
6. Sterrett, R. J. Groundwater and wells : a comprehensive guide for the design, installation and maintenance of a water well / R. J. Sterrett. – 3rd ed. – New Brighton : Johnson screens, 2007. – 798 p.
7. Handbook of Suggested Practices for the Design and Installation of Ground-Water Monitoring Wells / L. Aller, R. J. Petty, J. H. Lehr [et al.]. – Las Vegas : U.S. Environmental Protection Agency, 1991. – 221 p.
8. Морозов, Э. А. Справочник по эксплуатации и ремонту водозаборных скважин / Э. А. Морозов, А. В. Стецюк. – Киев : Будівельник, 1984. – 96 с.
9. Ahmed, N. Hydraulics of Wells Design, Construction, Testing, and Maintenance of Water Well Systems / N. Ahmed, S.W. Taylor, Z. Sheng. – Reston : American Society of Civil Engineers, 2014. – 498 p.
10. Shuter, E. Techniques of Water-Resource Investigations of the United States Geological Survey : in 2 books / Department of the interior, U.S. Geological survey. – Washington : U.S. Government Printing Office, 1989. – Book 2 : Chapter F1 Application of drilling, coring, and sampling techniques to test holes and wells / E. Shuter, W. E. Teasdale. – Book 2. Chapter F1. Drilling and Construction of Water Wells / U.S. Geological Survey. – 97 p.
11. Ground Water Manual : a guide for the investigation, development, and management of ground-water resources / W.T. Moody, R. E. Glover, R.W. Ribbens [et al.]. – U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation. – 2nd ed. – Denver : U.S. Government Printing Office, 1995. – 580 p.
12. Башкатов, Д. Н. Справочник по бурению скважин на воду / Д. Н. Башкатов, В. Я. Вальдман, Г. П. Квашнин ; под ред. Д. Н. Башкатова. – М. : Недра, 1979. – 500 с.
13. Валовский, В. М. Техника и технология свабирования скважин / В. М. Валовский, К. В. Валовский. – М. : ОАО «ВНИИОЭГ», 2003. – 396 с.
14. Мордвинов, А. А. Освоение эксплуатационных скважин : учебное пособие / А. А. Мордвинов. – Ухта : УГТУ, 2004. – 107 с.
15. Реагентная декольматация водозаборных скважин методом свабирования в замкнутых камерах / В. В. Ивашечкин, А. М. Шейко, Ю. А. Медведева [и др.] // Мелиорация. – 2018. – № 2 (84). – С. 20–27.
16. Медведева, Ю. А. Расчет режимов регенерации водозаборной скважины методом линейного свабирования / Ю. А. Медведева, И. Е. Амелишко, В. В. Ивашечкин // Мелиорация. – 2023. – № 1. – С. 31–38.
17. Патент ВУ 16996, МПК E03B 3/15 (2006.01). Устройство для реагентной обработки скважины на воду : № а 20101725 : заявлено 01.12.2010 : опубликовано 30.04.2013 / Автушко П. А., Ивашечкин В. В., Автушко А. В. ; заявитель Белорусский национальный технический университет. – 3 с.
18. List, J. Analysis of Development Methods for Gravel Envelope Wells / J. List. – Auckland : University of Auckland, 1985.
19. Справочное руководство гидрогеолога : в 2 т. / под ред. В. М. Максимова. – 3-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Недра, 1979. – Т. 2 / С. П. Албул, В. Д. Бабушкин, Б. В. Боревский [и др.]. – 295 с.
20. Гордеев, П. В. Гидрогеология : учебник для геологоразведочных техникумов / П. В. Гордеев, В. А. Шемелина, О. К. Шулякова. – М. : Высшая школа, 1990. – 448 с.

References

1. Tugaj, A. M. Eksploataciya i remont sistem artezianskogo vodosnabzheniya / A. M. Tugaj, I. T. Prokopchuk. – Kiev : Budivelnik, 1988. – 176 s.
2. Alekseev, V. S. Uchebnaya kniga mastera po remontu skvazhin na vodu / V. S. Alekseev, G. A. Volohovskij, V. T. Grebennikov. – M. : Kolos, 1983. – 255 s.
3. Spravochnik po bureniu i oborudovaniyu skvazhin na vodu / V. V. Dubrovskij, M. M. Kerchenskij, V. I. Plohov [i dr.]. – M. : Nedra, 1972. – 512 s.
4. Tugaj, A. M. Vodosnabzhenie iz podzemnyh istochnikov : spravochnik / A. M. Tugaj, I. T. Prokopchuk. – Kiev : Urozhaj, 1990. – 264 s.
5. Kvashnin, G. P. Tekhnologiya vskrytiya i osvoeniya vodonosnyh plastov / G. P. Kvashnin. – M. : Nedra, 1987. – 247 s.
6. Sterrett, R. J. Groundwater and wells : a comprehensive guide for the design, installation and maintenance of a water well / R. J. Sterrett. – 3rd ed. – New Brighton : Johnson screens, 2007. – 798 p.
7. Handbook of Suggested Practices for the Design and Installation of Ground-Water Monitoring Wells / L. Aller, R. J. Petty, J. H. Lehr [et al.]. – Las Vegas : U.S. Environmental Protection Agency, 1991. – 221 p.
8. Morozov, E. A. Spravochnik po eksploatacii i remontu vodozabornyh skvazhin / E. A. Morozov, A. V. Stecyuk. – Kiev : Budivelnik, 1984. – 96 s.
9. Ahmed, N. Hydraulics of Wells Design, Construction, Testing, and Maintenance of Water Well Systems / N. Ahmed, S.W. Taylor, Z. Sheng. – Reston : American Society of Civil Engineers, 2014. – 498 p.
10. Shuter, E. Techniques of Water-Resource Investigations of the United States Geological Survey : in 2 books / Department of the interior, U.S. Geological survey. – Washington : U.S. Government Printing Office, 1989. – Book 2 : Chapter F1 Application of drilling, coring, and sampling techniques to test holes and wells / E. Shuter, W. E. Teasdale. – Book 2. Chapter F1. Drilling and Construction of Water Wells / U.S. Geological Survey. – 97 p.
11. Ground Water Manual : a guide for the investigation, development, and management of ground-water resources / W.T. Moody, R. E. Glover, R.W. Ribbens [et al.]. – U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation. – 2nd ed. – Denver : U.S. Government Printing Office, 1995. – 580 p.
12. Bashkatov, D. N. Spravochnik po bureniu skvazhin na vodu / D. N. Bashkatov, V. YA. Val'dman, G. P. Kvashnin ; pod red. D. N. Bashkatova. – M. : Nedra, 1979. – 500 s.
13. Valovskij, V. M. Tekhnika i tekhnologiya svabirovaniya skvazhin / V. M. Valovskij, K. V. Valovskij. – M. : ОАО «ВНИИОЭГ», 2003. – 396 s.
14. Mordvinov, A. A. Osvoenie eksploatatsionnyh skvazhin : uchebnoe posobie / A. A. Mordvinov. – Uhta : UGTU, 2004. – 107 s.
15. Reagentnaya dekol'matatsiya vodozabornyh skvazhin metodom svabirovaniya v zamknutyh kamerah / V. V. Ivashechkin, A. M. Shejko, YU. A. Medvedeva [i dr.] // Melioratsiya. – 2018. – № 2 (84). – S. 20–27.
16. Medvedeva, YU. A. Raschet rezhimov regeneracii vodozabornoj skvazhiny metodom linejnogo svabirovaniya / YU. A. Medvedeva, I. E. Amelishko, V. V. Ivashechkin // Melioratsiya. – 2023. – № 1. – S. 31–38.
17. Patent BY 16996, MPK E03B 3/15 (2006.01). Ustrojstvo dlya reagentnoj obrabotki skvazhiny na vodu : № а 20101725 : zayavleno 01.12.2010 : opublikovano 30.04.2013 / Avtushko P. A., Ivashechkin V. V., Avtushko A. V. ; zayavitel' Belorusskij nacional'nyj tekhnicheskij universitet. – 3 s.
18. List, J. Analysis of Development Methods for Gravel Envelope Wells / J. List. – Auckland : University of Auckland, 1985.
19. Spravochnoe rukovodstvo gidrogeologa : v 2 t. / pod red. V. M. Maksimova. – 3-e izd., pererab. i dop. – Leningrad : Nedra, 1979. – T. 2 / S. P. Albul, V. D. Babushkin, B. V. Borevskij [i dr.]. – 295 s.
20. Gordeev, P. V. Gidrogeologiya : uchebnik dlya geologorazvedochnyh tekhnikumov / P. V. Gordeev, V. A. SHe melina, O. K. SHulyakova. – M. : Vysshaya shkola, 1990. – 448 s.

Материал поступил 09.07.2026, одобрен 14.07.2026, принят к публикации 15.07.2026