

скачком, т. е. при определенной температуре. Этому явлению предшествует процесс уплотнения кристаллов и уменьшения межкристалльных расстояний.

Образование твердой кристаллической породы из кека хвостов при охлаждении жидкости происходит за счет кристаллизации при определенной температуре – температуре кристаллизации. В момент кристаллизации вследствие уменьшения энергии тепловых движений выделяется энергия в виде скрытой теплоты кристаллизации.

ВЫВОД

Экспериментально доказано, что складываемые в терриконы отходы калийного производства (кек хвостов) по истечении времени приобретают высокие прочностные и противотриационные свойства, исключающие ми-

грацию рассолов в подземные воды и обеспечивающие устойчивость отвалов калийного производства.

ЛИТЕРАТУРА

1. Колпашников Г. А. Процессы засоления пород и подземных вод твердыми отходами калийных производств Солигорских калийных комбинатов // Доклады АН БССР. – 1970. – № 5, т. 14. – С. 443–445.
2. Колпашников Г. А., Клементьева В. П., Еременко Ю. П. Уплотнение галитовых отходов как фактор защиты подземных вод от проникновения в них рассолов // Доклады АН БССР. – 1973. – № 3, т. VII.
3. Колпашников Г. А., Еременко Ю. П. Влияние поровых растворов на изменение физико-механических свойств галитовых отходов калийной промышленности. – Киев: Наукова думка, 1974. – С 95–99.
4. Кикоин И. К., Кикоин А. К. Молекулярная физика. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит., 1963.
5. Кулле П. А. Разработка месторождений соли подземным выщелачиванием // Труды ВНИИТА. – 1949. – Вып. 20.

УДК 628.112

ОСНОВЫ РАСЧЕТА НЕОБХОДИМОГО ДАВЛЕНИЯ ДЛЯ ДЕКОЛЬМАТАЦИИ ПРИФИЛЬТРОВОЙ ЗОНЫ ВОДОЗАБОРНОЙ СКВАЖИНЫ

Канд. техн. наук, доц. ИВАШЕЧКИН В. В.

Белорусский национальный технический университет

Для правильного построения технологического процесса импульсной регенерации фильтров водозаборных скважин [1] следует учитывать ремонтпригодность их фильтров, т. е. назначать такую величину давления в импульсе, которой будет достаточно для разрушения кольтатирующих отложений на данном интервале обработки с сохранением прочностных качеств самого фильтра.

Исследованиями [2] установлено, что радиус зон, в которых сказываются кольтатиционные процессы, не превышает 0,5 м, при этом интенсивность процессов кольтатации

существенно уменьшается с увеличением расстояния от стенки фильтра. Максимальной прочностью и наилучшими фильтрационными свойствами обладает слой цементированной кольтатантом гравийной обсыпки, непосредственно прилегающий к фильтру. Эта зона представляет собой песчано-гравийную фракцию, скрепленную новообразованным цементом, при этом ее прочность на осевое сжатие $\bar{R}_{с.г}$ может изменяться от 0,3 до 2 МПа.

Сказанное выше позволяет схематизировать задачу кольтатации и регенерации скважин как рассмотрение некоторой кольцевой зоны

толщиной δ , коаксиальной фильтру, в которую включается и закольматированная водопримемная поверхность. Поры гравийной обсыпки, принадлежащей этой зоне, частично или полностью заполнены поровым цементом соприкосновения, который имеет высокую степень сцепления не только с зернами обсыпки, но и водопримемной поверхностью фильтра (например, сетчатой или проволочной), что обеспечивает совместную работу водопримемной поверхности и закольматированной обсыпки при декольматации фильтра импульсами давления.

Рассмотрим напряжения, действующие в стенках однородного цилиндра толщиной δ под действием внутреннего давления p .

В тонкостенном цилиндре (толщина стенки

$$\delta \leq 0,05d_{cp},$$

где $d_{cp} = \frac{d_n + d_b}{2}$; а d_n и d_b – соответственно наружный и внутренний диаметры цилиндра) возникающие под действием внутреннего давления p в окружном направлении напряжения равномерно распределены по толщине стенки, а в радиальном – отсутствуют. Окружные растягивающие напряжения σ_θ в стенке цилиндра из уравнения Лапласа [3] можно определить по формуле

$$\sigma_\theta = \frac{pr_b}{\delta}. \quad (1)$$

В толстостенных цилиндрах ($\delta > 0,05d_{cp}$) необходимо учитывать неравномерность распределения окружных растягивающих σ_θ и сжимающих радиальных напряжений σ_r , которые подсчитываются по формулам Ламе [3]:

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{r_b^2}{r_n^2 - r_b^2} \left(1 - \frac{r_n^2}{r^2} \right) p; \end{aligned} \right. \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma_\theta &= \frac{r_b^2}{r_n^2 - r_b^2} \left(1 + \frac{r_n^2}{r^2} \right) p, \end{aligned} \right. \quad (3)$$

где r – радиус точки в стенке цилиндра, в которой определяется напряжение.

Растягивающие напряжения σ_θ изменяются по толщине стенки по гиперболическому закону, поэтому наиболее благоприятными с точки

зрения разрушения кольматирующих отложений будут являться слои, лежащие ближе к внутренней поверхности цилиндра (рис. 1).

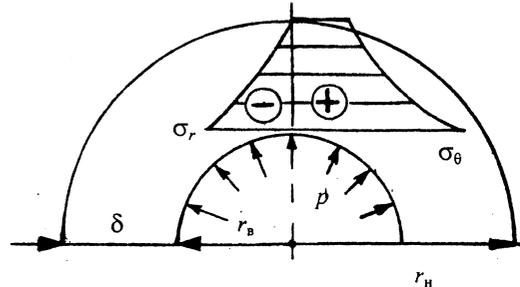


Рис. 1. Эпюры растягивающих σ_θ и сжимающих σ_r напряжений в стенке закольматированного фильтра

Напряженное состояние цилиндра относится к плоской задаче, так как вследствие осевой симметрии величины напряжений вдоль его оси не изменяются.

Поэтому для определения равнодействующей силы N_p от растягивающих напряжений σ_θ в стенке цилиндра при действии давления p на участке цилиндра длиной b необходимо проинтегрировать выражение (3), умноженное на b , в пределах от r_b до r_n :

$$N_p = b \int_{r_b}^{r_n} \frac{r_b^2}{r_n^2 - r_b^2} \left(1 + \frac{r_n^2}{r^2} \right) p dr = pr_b b. \quad (4)$$

Из выражения (4) следует, что сила N_p не зависит от толщины стенки δ , а прямо пропорциональна давлению p и внутреннему радиусу цилиндра (фильтра) r_b .

Следовательно, при прочих равных условиях (прочности кольматанта и глубине его распространения) для обеспечения того же растягивающего усилия N_p в фильтре меньшим радиусом r_{b1} необходимо создать давление p_1 большее, чем p_2 в фильтре большим радиусом r_{b2} :

$$p_1 = p_2 r_{b2} / r_{b1}. \quad (5)$$

Так, в фильтре с внутренним диаметром 6'' (150 мм) при прочих равных условиях для создания тех же напряжений необходимо иметь в 2 раза большее давление, чем в фильтре диаметром 12'' (300 мм). Это следует учитывать при регенерации фильтров.

Равнодействующая N_p будет приложена ближе к внутренней поверхности цилиндра на расстоянии от нее C_p , равном

$$C_p = r_b \left[\frac{\ln(r_n/r_b)}{1 - (r_b/r_n)^2} - 0,5 \right] < \frac{\delta}{2}. \quad (6)$$

Только в тонкостенных цилиндрах, где напряжения распределены равномерно, стенка испытывает центральное растяжение от внутреннего давления ($C_p = \delta/2$).

Рассмотрим ремонтпригодность каркасно-стержневых фильтров как наиболее распространенных. Обычно их изготавливают путем навивки проволоки на опорный каркас из круглых стержней с заданным шагом навивки. Размеры этих фильтров (ТУ 51-644-74) с проволоочной обмоткой из нержавеющей стали приведены в [2].

На рис. 2а, б представлены поперечный и продольный разрезы закольцованного каркасно-стержневого фильтра.

При создании в заполненном жидкостью закольцованном фильтре импульсов давления можно выделить три основные стадии его работы под нагрузкой (рис. 2в).

Стадия I. При приложении внутреннего избыточного давления p появляются растягивающие напряжения в проволоочной навивке и цементированной гравийной обсыпке. Эта стадия продолжается до тех пор, пока напряжения σ_θ в цементированной гравийной обсыпке не достигнут сопротивления растяжению $R_{с.г}$ ($\sigma_\theta = R_{с.г}$), а равнодействующая растягивающих напряжений N_p не станет равной $N_{pl} = p_1 r_b b$, где p_1 – первое предельное давление.

Расчет давления p_1 , которое способен выдержать цементированный кольматант перед образованием трещин, можно выполнить по способу ядровых моментов для внецентренно растянутого сечения, исходя из положения о том, что момент внешних сил M_1 будет равен моменту внутренних усилий перед образованием трещин M [4]. Момент внешних сил M_1 определяем как момент силы N_{pl} относительно оси, проходящей через условную ядровую точку. Момент внутренних усилий M перед образованием трещин находим как произведение упругопластического момента сопротивления

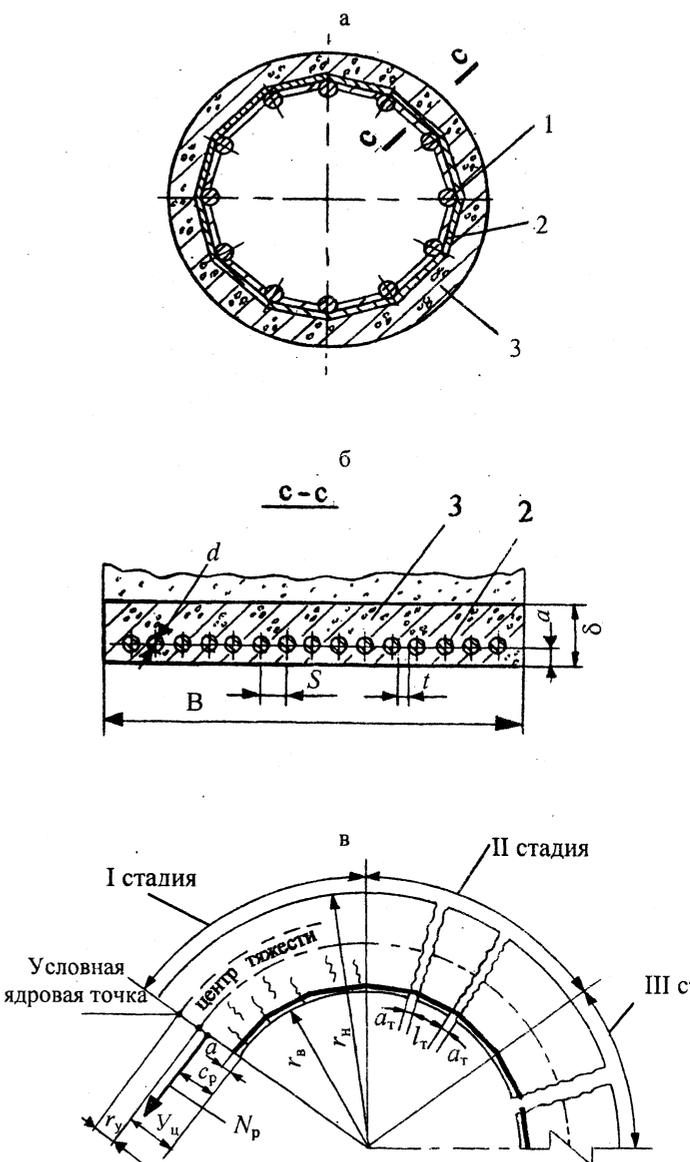


Рис. 2. Схема закольцованного каркасно-стержневого фильтра: а – поперечный; б – продольный разрезы; в – расчетная схема; 1 – стержни каркаса; 2 – проволоочная навивка; 3 – закольцованная гравийная обсыпка

W_T приведенного сечения на сопротивление растяжению $R_{с.г}$. Для случая малых эксцентриситетов e , когда $e < \delta/2$:

$$M_1 = M \text{ или } N_{pl}(e + r_y) = R_{с.г} W_T, \quad (7)$$

где e – эксцентриситет приложения силы N_{pl} относительно центра тяжести приведенного сечения площадью F_n ; r_y – расстояние от центра тяжести приведенного сечения до условной ядровой точки.

Отсюда первое предельное давление p_1 при внецентренном растяжении силой N_{pl} равно

$$p_1 = \frac{R_{с.г} W_T}{br_b(e + r_y)} = \frac{R_{с.г} W_T}{br_b(y_{ц} - C_p + r)}, \quad (8)$$

где $y_{ц}$ – положение центра тяжести приведенного сечения относительно внутренней образующей фильтра.

Площадь приведенного сечения

$$F_n = F + F_{np} \frac{E_{np}}{E_{с.г}}, \quad (9)$$

где $F = \delta b$ – геометрическая площадь сечения при $b = 1$ м; F_{np} – площадь проволочной навивки; E_{np} , $E_{с.г}$ – модули упругости проволоки и цементированной кольматантом гравийной обсыпки; $n = E_{np}/E_{с.г}$.

Статический момент приведенного сечения относительно образующей внутренней стенки фильтра

$$S_n = \frac{b\delta^2}{2} + nF_{np}a, \quad (10)$$

где a – положение центра тяжести проволочной навивки относительно образующей внутренней стенки фильтра.

Положение центра тяжести приведенного сечения относительно образующей внутренней стенки фильтра $y_{ц} = \frac{S_n}{F_n}$.

Момент инерции приведенного сечения I_n

$$I_n = \frac{b\delta^3}{12} + b\delta \left(y_{ц} - \frac{\delta}{2} \right)^2 + nF_{np} (y_{ц} - a)^2. \quad (11)$$

Момент сопротивления приведенного сечения относительно образующей внутренней стенки

$$W_n = I_n / y_{ц}. \quad (12)$$

Расстояние r_y находят по формуле

$$r_y = \frac{W_T}{F_n} = \frac{1,75W_n}{F_n}. \quad (13)$$

Площадь проволочной навивки

$$F_{np} = \frac{f_{np}}{S}, \quad (14)$$

где S – шаг навивки проволоки диаметром d (расстояние в осях); $S = d + t$, t – просвет (зазор) между витками; f_{np} – площадь сечения одной проволоки.

При центральном растяжении силой N_{pl} она равна [4]

$$N_{pl} = R_{с.г} (b\delta + 2nF_{np}). \quad (15)$$

Откуда первое предельное давление p_1 равно

$$p_1 = \frac{R_{с.г} (b\delta + 2nF_{np})}{r_b b}. \quad (16)$$

Стадия II. С ростом избыточного давления p напряжения в цементированной гравийной обсыпке увеличиваются настолько, что образуются трещины. С этого момента цементированная гравийная обсыпка полностью выключается из работы и растягивающие напряжения σ_θ воспринимаются только проволочной навивкой.

Сам факт образования трещин в цементированной гравийной обсыпке как результат возникновения растягивающих напряжений не является критерием для определения эффективности импульсной обработки фильтра, так как образование трещин еще не означает нарушения водонепроницаемости цементированного кольца. Трещины могут быть несквозными и затухать на расстояниях 0,2...0,3 толщины зоны кольматации. Остальная часть цементированной гравийной обсыпки, будучи сжатой горным давлением и избыточным давлением воды на наружной ее поверхности при включении насоса, окажется водонепроницаемой.

Это означает, что в качестве критерия для определения эффективности импульсной обработки фильтра может быть взята ширина раскрытия трещин a_r в цементированном кольце, при которой кольцо станет водопроницаемым.

Согласно СНиП 2.03.01–84 [5] предельно допустимая ширина продолжительного раскрытия трещин для железобетонных элементов, воспринимающих давление жидкостей,

обеспечивающая ограничение водопроницаемости конструкции, составляет $a_T = 0,2$ мм. Следовательно, для создания стабильной водопроницаемости цементированной гравийной обсыпки через образовавшиеся трещины шириной a_T более 0,2 мм необходимо, чтобы после прохождения импульсов давления они не закрывались вследствие сжимающих усилий от горного давления и перепада напоров во время работы скважины. Этот эффект «самозалечивания трещин» – неблагоприятный фактор после регенерации.

Для предотвращения подобного явления необходимо обеспечить долговременное раскрытие трещин на ширину более 0,2 мм в процессе регенерации, усилив имплозию. Тогда частицы песка и мелкого гравия, оказавшись вовлеченными в обратный фильтрационный поток, попадут во вновь образованные трещины и расклинят их, не давая закрыться.

Найдем необходимое давление p_{II} , которое обеспечит заданную ширину раскрытия трещин a_{II} , нормальных продольной оси закольматированного фильтра, для чего воспользуемся общими положениями расчета по определению ширины раскрытия трещин [5].

Ширина раскрытия трещин в цементированном кольматантом слое гравийной обсыпки на уровне оси проволоочной навивки может быть найдена как разность удлинения проволоочной навивки $\Delta l_{пр}$ и растянутого цементированного кольматантом слоя гравийной обсыпки $\Delta l_{с.г}$ на участке между трещинами длиной l_T

$$a_T = \Delta l_{пр} - \Delta l_{с.г} = \varepsilon'_{пр} l_T - \varepsilon'_{с.г} l_T, \quad (17)$$

где $\varepsilon'_{пр}, \varepsilon'_{с.г}$ – соответственно средние деформации растянутой проволоки и цементированного гравия.

Пренебрегая средней деформацией растянутого цементированного гравия в сравнении с деформацией растянутой проволоки, примем

$$a_T = \varepsilon'_{пр} l_T. \quad (18)$$

Чтобы перейти от деформаций в растянутой проволоке $\varepsilon'_{пр}$ на участке между трещинами к деформации проволоки $\varepsilon_{пр}$ в сечении с тре-

щиной вводится коэффициент $\psi_{пр} = \frac{\varepsilon'_{пр}}{\varepsilon_{пр}} \leq 1$,

который зависит от прочности сцепления проволоки с закольматированной гравийной обсыпкой.

Тогда ширина раскрытия трещин на уровне оси растянутой проволоочной навивки

$$a_T = \psi_{пр} \varepsilon_{пр} l_T. \quad (19)$$

Деформация проволоки в сечении с трещиной может быть найдена по формуле

$$\varepsilon_{пр} = \sigma_{пр} / E_{пр}, \quad (20)$$

где $\sigma_{пр}$ – напряжения в растянутой проволоке от действия внутреннего давления p в фильтре.

Напряжения $\sigma_{пр}$ в случае действия только внутреннего давления окажутся

$$\sigma_{пр} = N_p / F_{пр}. \quad (21)$$

При кратковременном действии нагрузки предлагается определить $\psi_{пр}$ по формуле [5]

$$\psi_{пр} = 1 - 0,7 \frac{R_{с.г} F}{N_p}. \quad (22)$$

При отсутствии опытных данных о значениях $R_{с.г}$, их можно определить по приближенной формуле [5] через кубиковую прочность $\bar{R}_{с.г}$ цементированного гравия

$$R_{с.г} = 0,233 \sqrt[3]{\bar{R}_{с.г}^2}. \quad (23)$$

Расстояние между трещинами на уровне оси растянутой проволоочной навивки найдем из условия, что разность усилий в растянутой проволоке в сечениях с трещиной и в сечениях между трещинами уравнивается сцеплением проволоки со цементированной гравийной обсыпкой

$$R_{с.г} F = Y_c x l_T \omega, \quad (24)$$

где Y_c – максимальное напряжение сцепления проволоки со цементированной гравийной

обсыпкой; x – периметр сечения проволоки; ω – коэффициент полноты эпюры сцепления.

Отсюда,

$$l_{\tau} = \frac{R_{c,r} F}{\omega Y_c x} \quad (25)$$

Если умножить числитель и знаменатель правой части на F_{np} , получим:

$$l_{\tau} = \frac{u}{\mu} \eta, \text{ где } \eta = \frac{R_{c,r}}{\omega Y_c}, \quad u = \frac{F_{np}}{x}, \quad \mu = \frac{F_{np}}{F} \quad (26)$$

Для круглой проволочной навивки $u = d/4$ и по рекомендациям [5] $\eta = 1,25$.

Подставив в исходное уравнение (19) выражения (20)...(22), (26) и учитывая, что в конце второй стадии напряженного состояния проволочной навивки со цементированным слоем гравийной обсыпки, когда ширина раскрытия трещины достигает $a_{тII}$, необходимое давление равно p_{II} и $N_{pII} = p_{II} r_b b$, окончательно получим

$$p_{II} = \frac{a_{тII} E_{np} F_{np} + 0,7 R_{c,r} F \frac{u}{\mu} \eta}{\frac{u}{\mu} \eta r_b b} \quad (27)$$

Стадия III характеризуется тем, что при дальнейшем увеличении давления p в импульсах напряжения в проволочной навивке достигают временного сопротивления на растяжение R_{np} и при $p = p_{III}$ происходит разрушение фильтра.

В соответствии с этим равнодействующая растягивающих напряжений N_{pIII} составит

$$N_{pIII} = R_{np} F_{np}, \quad (28)$$

где $N_{pIII} = r_b b p_{III}$.

Окончательно давление p_{III} составит

$$p_{III} = \frac{R_{np} F_{np}}{r_b b} \quad (29)$$

Рассмотренные стадии напряженного состояния проволочного фильтра со цементированным слоем гравийной обсыпки позволяют рекомендовать диапазон давления $p_{II} < p < p_{III}$ на внутренней поверхности фильтра при де-

кольматации прифильтовой зоны, обеспечивающий сохранность водопримной поверхности и разрушение кольца цементированной гравийной обсыпки с шириной раскрытия трещин не менее $a_{тII}$.

Пример.

Определить значения p_I, p_{II}, p_{III} для закольматированных каркасно-стержневых фильтров с проволочной навивкой согласно [2], если $\delta = 0,06$ м, кубиковая прочность $\bar{R}_{c,r} = 2$ МПа. Проволочная навивка – сталь марки 12Х18Н10Т (ГОСТ 14964–79) с временным сопротивлением разрыва $R_{np} = 1400$ МПа [6] и модулем упругости $E_{np} = 240000$ МПа. Просвет проволочной навивки $t = 2,5$ мм. Ширина раскрытия трещин $a_{\tau} = 0,2$ мм. Модуль упругости цементированной гравийной обсыпки $E_{c,r} = 20000$ МПа (как для бетона).

Решение.

1. Характеристики фильтров диаметрами 5, 6, 8, 10, 12, 16 дюймов возьмем из [2].

2. Давление p_I для этих фильтров при внецентренном растяжении определим по (8) в МПа: $p_{I(5)} = 0,29$; $p_{I(6)} = 0,26$; $p_{I(8)} = 0,22$; $p_{I(10)} = 0,217$; $p_{I(12)} = 0,19$; $p_{I(16)} = 0,15$;

3. Давление p_I при центральном растяжении определим по (16), используя (5), в МПа: $p_{I(5)} = 0,32$; $p_{I(6)} = 0,30$; $p_{I(8)} = 0,22$; $p_{I(10)} = 0,22$; $p_{I(12)} = 0,17$; $p_{I(16)} = 0,15$.

Характер изменения предельных давлений представлен на рис. 3.

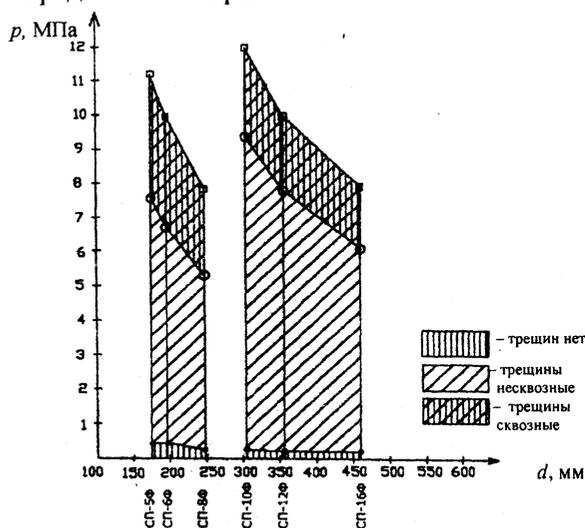


Рис. 3. Характер изменения предельных давлений при трех стадиях работы закольматированных фильтров с различными внутренними диаметрами d : ● – p_I ; ○ – p_{II} ; □ – p_{III}

ВЫВОДЫ

1. В результате анализа напряженного состояния закольматированного каркасно-стержневого фильтра с проволочной навивкой от действия сил давления предложено рассматривать III стадии его работы: I – стадия появления несквозных трещин; II – стадия образования сквозных трещин с шириной раскрытия, достаточной для обеспечения водопроницаемости; III – стадия разрушения водопримной поверхности фильтра.

2. Получены выражения для расчета величин предельных давлений p_I , p_{II} , p_{III} для начала каждой стадии.

3. Рассмотрен пример, показывающий, что с целью упрощения расчетов, первое предельное давление p_I можно определять по формулам для центрального растяжения силой N_p с погрешностью не более 10%.

4. Полученные сравнительно небольшие значения давления p_I указывают на то, что

цементированная гравийная обсыпка плохо сопротивляется растягивающим напряжениям и основную роль при расчете давления p_{II} имеют характеристики водопримной поверхности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ивашечкин В. В., Козлов Д. А., Сабадах Б. В. Использование водорода в качестве энергоносителя в аппаратах для очистки фильтровых труб скважин // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1984. – № 10. – С. 118–122.
2. Гаврилко В. М., Алексеев В. С. Фильтры буровых скважин. – М.: Недра, 1985. – 334 с.
3. Кочетов В. Т., Павленко А. Д., Кочетов М. В. Сопротивление материалов. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2001. – 366 с.
4. Байков В. Н., Сигалов Э. Е. Железобетонные конструкции: Общий курс: Учеб. для вузов. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1991. – 767 с.
5. СНиП 2.03.01–84. Бетонные и железобетонные конструкции. – М.: Стройиздат, 1985.
6. ГОСТ 14964–79. Проволока для сеток. – М.: Изд-во стандартов, 1980.

УДК 624.151.5.001.4

УСТОЙЧИВОСТЬ И НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ОСНОВАНИЯ ЛЕНТОЧНЫХ МЕЛКОЗАГЛУБЛЕННЫХ ЩЕЛЕВЫХ ФУНДАМЕНТОВ

Инж. БАННИКОВ Д. Н.

Научно-исследовательское и экспериментально-проектное унитарное предприятие «Институт БелНИИС»

Известно, что в фундаментах мелкого заложения, рассчитанных на благополучные грунтовые условия, несущая способность основания и прочность материала фундамента используются не полностью. Один из путей, позволяющих устранить недостатки фундаментов мелкого заложения, – применение щелевых фундаментов мелкого заложения, представляющего узкие щели, прорезанные в связном грунте и заполненные монолитным бетоном. Сверху они объединяются ростверком, образуя П-образное сечение. Эксплуатация ряда зданий с щелевыми фундаментами свидетельствует об их надежно-

сти и долговечности при высокой эффективности.

В данной статье рассматриваются основания, сложенные грунтами, обладающими внутренним трением и сцеплением, под фундаментами, имеющими относительное заглубление (d/b) в пределах от 0,5 до 2,0.

При модельных испытаниях щелевых фундаментов установлено, что поверхности скольжения достигают плоскости на уровне подошвы фундамента под углом к горизонтальной поверхности $\alpha = 90^\circ - \varphi$. Они сохраняют этот наклон на большей части высоты слоя d , и