

УДК 626.862: 66.067.32, 628.16.067

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СТРУКТУРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВОЛОКНИСТЫХ ДРЕНАЖНЫХ ФИЛЬТРОВ

Н. Г. БУГАЙ, А. И. КРИВОНОГ, В. В. КРИВОНОГ,
Н. Г. ПИВОВАР, В. Л. ФРИДРИХСОН

Институт гидромеханики НАН Украины, Киев

Получено 15.03.2001

Приведены результаты исследований физико-механических и фильтрационных характеристик, защитных свойств и структурных параметров волокнистых материалов из минеральных и полимерных волокон, которые используются в качестве фильтров горизонтального, вертикального и лучевого дренажа, предназначенного для защиты от подтопления сельскохозяйственных угодий, территорий населенных пунктов и отдельных объектов. Представлены результаты исследований водоприимной способности дренажа в зависимости от конструкции дрены, способов строительства дренажа и свойств дренируемых грунтов. Предложена методика расчета и рекомендации, необходимые при проектировании дренажа. Даны рекомендации по технологии строительства волокнистых фильтров и снабженного ими дренажа в различных гидрогеологических и гидрохимических условиях. Приведены объемы внедрения и результаты многолетних натурных исследований, которые подтверждают работоспособность новых конструкций дренажей, их техническую и экономическую эффективность в мелиоративном, гидротехническом и других областях водохозяйственного строительства.

Наведено результати досліджень фізико-механічних та фільтраційних характеристик, захисних властивостей і структурних параметрів волокнистих матеріалів з мінеральних та полімерних волокон, що використовуються як фільтри горизонтального, вертикального та променевого дренажу, призначеного для захисту від підтоплення сільськогосподарських угідь, територій населених пунктів та окремих об'єктів. Представлено результати досліджень водоприйнятної здатності дренажу в залежності від конструкції дрени, способів будівництва дренажу та властивостей дренованих ґрунтів. Запропоновано методику розрахунку і рекомендації, необхідні при проектуванні дренажу. Дано рекомендації з технології виробництва волокнистих фільтрів та будівництва обладнаного ними дренажу в різних гідрогеологічних і гідрохімічних умовах. Приведено обсяги впровадження та результати багаторічних натурних досліджень, що підтверджують працездатність нових конструкцій дренажів, їх технічну й економічну ефективність у мелиоративній, гидротехнічній та інших областях водогосподарчого будівництва.

The results of research of the physical-mechanical and filtration characteristics, protective abilities and structural parameters of fibrous materials of mineral and polymer fibres, that are used as filters of horizontal, vertical and radial drainage, intended for protection against waterlogging of agricultural land, territories of settlements and separate objects are given. The results of research of waterabsorbing abilities of drainage depending on the construction of drain, ways of building of drainage and the characteristics of the drained grounds. Ways of calculation and advices required for designing the drainage are offered. The advices about the technology of producing the fibrous filters and the drainage using them in different hydro-geological and hydrochemical conditions are also given. The capacities of intrusion and results of national investigations of many years, which confirm the functionability of new drainage constructions, their technical and economical efficiency in meliorational, hydrotechnical and other areas of watereconomic construction.

ВВЕДЕНИЕ

Основным мероприятием для защиты от подтопления сельскохозяйственных земель, территорий населенных пунктов и отдельных объектов является устройство горизонтального, вертикального и лучевого дренажей, эффективность работы которых зависит, в первую очередь, от качества и работы защитных фильтров.

В недалеком прошлом при создании таких фильтров применялись песчано-гравийные материалы, устройство которых сложно и трудоемко, а затраты на их строительство составляли 25÷30 % от стоимости строительства дренажа. Кроме того, во многих районах строительства дренажных систем ощущается недостаток песчано-гравийных материалов необходимого грануломе-

трического состава. Данная статья посвящена обоснованию возможности использования новых фильтровых материалов из искусственных минеральных и полимерных волокон в качестве фильтров дренажа в мелиоративном, гидротехническом и других областях водохозяйственного строительства в различных гидрогеологических, гидрохимических и климатических условиях.

Широкое внедрение дренажа с волокнистыми фильтрами в практику мелиоративного, гидротехнического и других областей строительства сдерживалось недостаточной изученностью комплекса сложных и взаимосвязанных проблемных вопросов. В этих условиях возникла необходимость поиска новых технических решений и выполнения теоретических и экспериментальных исследований, связанных с разработкой новых конструкций,

методов расчета, принципов проектирования, способов и технологии строительства мелиоративного дренажа и других дренажных устройств гидротехнических сооружений, с прогрессивными и перспективными волокнистыми защитно-фильтровыми материалами и внедрение их в водохозяйственное и другие области строительства.

Для решения этой проблемы в Институте гидромеханики Национальной Академии Наук Украины авторами статьи были выполнены комплексные экспериментальные, теоретические и многолетние натурные исследования нетканых и тканых материалов из стеклянных, базальтовых и полимерных волокон с целью использования их в качестве защитных фильтров для горизонтальных, вертикальных и лучевых трубчатых дренажей. Применение новых конструкций дренажа с волокнистыми фильтрами позволило бы механизировать процессы строительства, повысить качество и снизить стоимость дренажа, организовать заводское изготовление фильтровых материалов и дренажно-фильтровых трубчатых дренажей. Все это определяет актуальность и значение проведенных исследований.

При выполнении исследований по указанной проблеме необходимо было решить следующие вопросы:

1. Исследовать физико-механические характеристики и структурные параметры волокнистых фильтров (деформации, пористость, плотность, распределение пор, средний диаметр пор).

2. Исследовать фильтрационные свойства волокнистых нетканых и тканых фильтров, которые позволили бы найти критические числа Рейнольдса, определяющие режимы фильтрации (линейная, переходная и квадратичная области сопротивления), коэффициент фильтрации, проницаемость и гидравлические сопротивления.

3. Исследовать защитные свойства фильтров из искусственных волокнистых материалов, обеспечивающие необходимую водоприемную способность и надежную защиту трубчатого дренажа от заиления при различных способах строительства дренажа и свойств дренируемых грунтов.

4. Исследовать водоприемную способность трубчатого дренажа (горизонтального, вертикального и лучевого) и определить оптимальную перфорацию дренажных труб, толщину фильтра, диаметр дренажа, обеспечивающих максимальный приток воды в дренаж при минимальных фильтрационных сопротивлениях.

5. Разработать конструкции и способы строительства трубчатого дренажа.

6. Разработать конструкцию фильтра буровых скважин с водоприемным слоем из защитно-

фильтрующего полиэтиленового материала.

1. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И СТРУКТУРНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВОЛОКНИСТЫХ ФИЛЬТРОВ

Были исследованы деформация, пористость, плотность, распределение пор, средний диаметр пор волокнистых фильтров.

Деформация фильтров в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии исследована экспериментально при однократном и многократном нагружении. При однократном нагружении (до 0,3 МПа) для нетканых объемных (маты из стеклянных и базальтовых волокон) и рулонных (холсты из стеклянных и полимерных волокон) фильтров в воздушно-сухом и водонасыщенном состоянии ветвь загрузки достаточно хорошо аппроксимируется зависимостью

$$\frac{P}{\varepsilon} = E_0 + C_1(P - P_0), \quad (1)$$

где P – давление; P_0 – начальное давление; ε – относительная деформация; C_1 – коэффициент пропорциональности; E_0 – модуль упругости. Соотношение (1) позволяет определить толщину δ , плотность γ и пористость n в зависимости от P .

Деформация фильтра при многократном, циклическом нагружении исследовалась экспериментально на специальной установке, на которой моделировалось воздействие на бетонное крепление волн высотой до 2 м. Форма эпюры давления была близка к синусоиде, частота – около 1 Гц, количество циклов $N_{\text{ц}}$ доводилось до $7 \cdot 10^5$, что соответствует действию штормовых волн 1 % обеспеченности высотой до 2 м в течение 20 лет для условий Кременчугского водохранилища, р. Днепр. Получена зависимость

$$\varepsilon = \varepsilon_{1,k} + f \cdot \lg N_{\text{ц}}, \quad (2)$$

где $\varepsilon_{1,k}$ – относительная деформация в конце первого цикла нагружения; f – экспериментальный коэффициент, который зависит от амплитуды давления и модуля упругости фильтра. Свойства фильтра при увеличении количества циклов нагружения непрерывно изменяются. Модуль упругости возрастает за счет переукладки и разлома волокон. Значения E_0 , C_1 и f для исследованных фильтров приведены в [3].

Распределение и средний размер пор для объемных (маты из штапельного стеклянного и базальтового волокон $d_{\text{с.в}} = 10 \div 36$ мкм) фильтров определяли методом пропрессовывания газа

через смоченный водой фильтр. Получена расчетная формула для определения среднего диаметра пор

$$d_{\text{ср}}^0 = d_{\text{э.в}} \left(\frac{\pi \gamma_{\text{в}}}{4 \gamma_{\text{кр}}} \cdot e - 1 \right), \quad (3)$$

где $d_{\text{э.в}}$ – диаметр элементарного волокна; $\gamma_{\text{в}}$ – плотность материала волокон; $\gamma_{\text{кр}}$ – критическая плотность фильтра, при которой начинается разлом волокон; e – экспериментальный коэффициент.

Для тонких тканых (стеклоткани) и нетканых (холсты из стеклянных, полимерных и полиэтиленовых волокон толщиной до 3 мм) рулонных материалов, размер пор которых более 50 мкм, распределение пор находили методом просыпания калиброванных частиц грунта. В [3] приведены результаты таких определений для исследованных стеклотканей (всего 21 наименование) и стеклохолстов. Для холста из полиэтиленовых волокон получена эмпирическая формула для определения $d_{\text{ср}}^0$:

$$d_{\text{ср}}^0 = 2,88 \cdot d_{\text{э.в}} \left(\frac{\delta}{d_{\text{э.в}}} \cdot \frac{\gamma}{\gamma_{\text{п}}} \right)^{-1,1} + 1, \quad (4)$$

где γ – плотность холста; $\gamma_{\text{п}}$ – плотность полиэтилена; δ – толщина фильтра.

Исследовано распределение и средний размер пор фильтра, образованного произвольным наложением друг на друга нескольких слоев тонких фильтров. Рассматривая образование новой поровой структуры как случайный процесс, получено теоретическое решение, которое было проверено экспериментально. При наложении стеклотканей в 2 и 3 слоя можно использовать следующую формулу для определения $d_{\text{ср.п}}^0$:

$$d_{\text{ср.п}}^0 = d_{\text{ср.0}}^0 \cdot e^{1-n_c}, \quad (5)$$

где $d_{\text{ср.0}}^0$ – средний диаметр пор элементарной сетки; $d_{\text{ср.п}}^0$ – средний диаметр пор фильтра, состоящего из n_c сеток.

2. ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ВОЛОКНИСТЫХ НЕТКАНЫХ И ТКАНЫХ ФИЛЬТРОВ

Линейная фильтрация в волокнистых нетканых фильтрах.

Нетканые волокнистые фильтры в виде матов толщиной 50÷100 мм и холстов толщиной 0,5÷2 мм из стеклянных, базальтовых, полимерных и полиэтиленовых волокон работают преимущественно в линейном режиме фильтрации, подчиняясь закону Дарси. Рассматривая образец во-

локнистого фильтра как совокупность элементарных волокон $d_{\text{э.в}}$, записывая сопротивление элементарного волокна по известной зависимости при ламинарном обтекании цилиндра и учитывая взаимное влияние волокон коэффициентом $f(\alpha)$, получаем формулу для определения коэффициента фильтрации $K_{\text{ф}}$ при фильтрации нормально к волокнам [3]:

$$K_{\text{ф}} = \frac{(1-\alpha) \cdot g \cdot d_{\text{э.в}}^2}{16\alpha \cdot \nu} \cdot \frac{2 - \ln Re}{f(\alpha)}, \quad (6)$$

где $\alpha = \frac{\gamma}{\gamma_{\text{в}}}$ – плотность укладки волокон; γ – плотность фильтра; $\gamma_{\text{в}}$ – плотность материала волокна; ν – коэффициент кинематической вязкости; g – ускорение силы тяжести; $Re = \frac{U \cdot d_{\text{э.в}}}{\nu}$, U – средняя скорость обтекания волокон; $f(\alpha)$ – функция, учитывающая гидродинамическое взаимное влияние волокон, зависит от Re . Из формулы (6) получена расчетная формула

$$K_{\text{ф}} = \frac{g(1-\alpha) \cdot d_{\text{э.в}}^2}{8\alpha \cdot \nu \cdot f^0(\alpha)}, \quad (7)$$

где $f^0(\alpha) = f(\alpha)$ при $Re = 1$. Экспериментальные графики для определения $f^0(\alpha)$ приведены на рис. 1. Формула (7) применима при количестве связки $a_{\text{св}} \leq 0,1$ от массы фильтра, а для холстов из полиэтилена – при $Re \leq 1$.

Нетканые клееные холсты из полимерных волокон могут содержать более 10 % связки. Для таких фильтров можно использовать формулу (7), но при этом (при $a_{\text{св}} \geq 10\%$) a и $d_{\text{э.в}}$ необходимо определять с учетом связки по следующим формулам:

$$\alpha_{\text{св}} = \gamma_{\text{в}} \left(\frac{a_{\text{св}}}{\gamma_{\text{св}}} + \frac{1 - a_{\text{св}}}{\gamma_{\text{в}}} \right);$$

$$d_{\text{э.в}}^{\text{св}} = \frac{d_{\text{э.в}}}{\sqrt{1 - a_{\text{св}}}} \cdot \sqrt{\gamma_{\text{в}} \left(\frac{1 - a_{\text{св}}}{\gamma_{\text{в}}} + \frac{a_{\text{св}}}{\gamma_{\text{св}}} \right)}. \quad (8)$$

Влияние смачиваемости материала волокон и связки на проницаемость фильтра исследовалась экспериментально посредством определения коэффициента проницаемости при фильтрации через один и тот же образец жидкостей, различных в отношении его смачиваемости. В качестве фильтров использованы три вида нетканых материалов: стеклохолст ВВГ - 0,5; нетканое клееное полотно из нитрона и хлорина $d_{\text{э.в}} = 15$ мкм; холст из полиэтилена $d_{\text{э.в}} = 40$ мкм. В качестве жидкости использовалась вода и уайт-спирит. Смачиваемость фильтра оценивалась высотой капиллярного поднятия $h_{\text{к}}$ и высотой противокапиллярного давления $h_{\text{п.к}}$, проницаемость

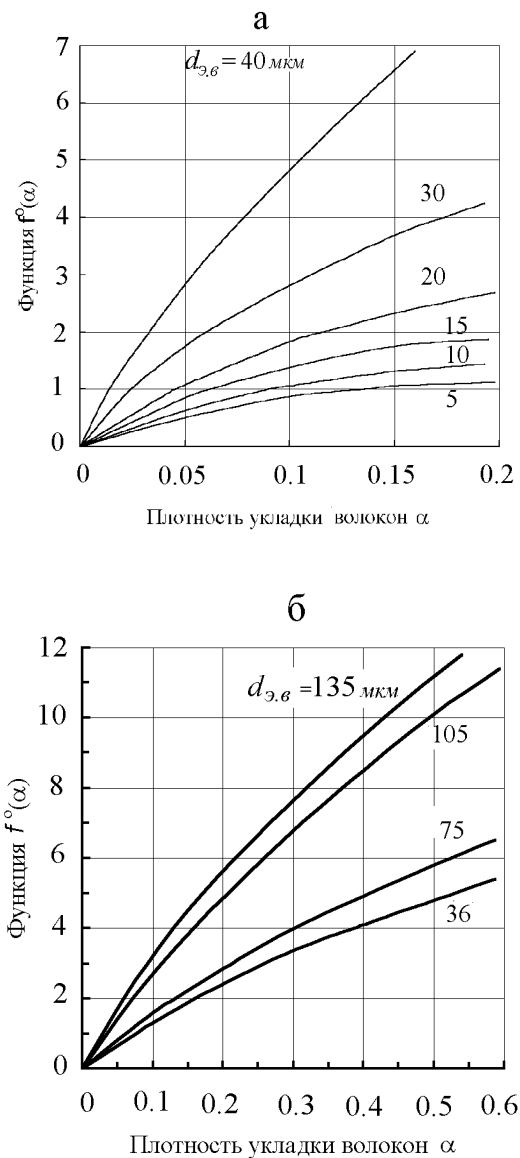


Рис. 1. Зависимости $f^0(\alpha)$ для:
 а – нетканых фильтров без связки;
 б – для полиэтиленового холста

фильтра – коэффициентом проницаемости k при фильтрации воды и уайтспирита. Опыты показали, что при фильтрации через фильтр жидкости, которая лучше смачивает фильтр, проницаемость образца больше. Полиэтиленовый холст по отношению к воде является гидрофобным, $h_{п.к} \approx 2$ см, а при смачивании уайтспиритом $h_k = 24$ см, однако коэффициенты проницаемости k при фильтрации воды и уайтспирита почти одинаковы. Это можно объяснить относительно большим размером пор, из которых легко выдавливается защем-

ленный воздух при фильтрации жидкости.

Фильтрационные свойства фильтров из тканых материалов, которые применяются для защиты дренажных труб от заиливания в несвязных грунтах или при устройстве дренажа с обсыпкой из несвязных грунтов, определяем экспериментально. При испытании фильтров из тканых материалов обычно получают экспериментальную зависимость $V = f(H)$, где V – скорость фильтрации, H – напор на образце фильтра. В общем виде эта зависимость нелинейная, но при малых значениях V всегда можно выделить линейный участок, где $V = K_1 \cdot H$. При работе дренажа скорости фильтрации по контуру дрены небольшие и ткань „работает”, в основном, в линейном режиме. Нами были проведены испытания 25 видов стеклотканей, для которых определены значения коэффициента K_1 и средний диаметр пор $d_{ср}^0$ [3].

Чтобы раскрыть структуру коэффициента K_1 , были рассмотрены все известные модели фильтрации [5–7, 16], всего 5 моделей. Сопоставление результатов экспериментов и теоретических вычислений по расчетным формулам для рассмотренных моделей показало, что ни одна из моделей не дает хорошего совпадения с экспериментами по фильтрации воды через стеклоткани. По нашему мнению это связано, в первую очередь, с неопределенностью поровой структуры стеклоткани из-за деформации нитей – жгутов, образующих стеклоткань. Интересно, что для металлических сеток [4], структура которых остается жесткой, одна из моделей дает хорошее совпадение с экспериментом (кроме сеток галунного переплетения).

Нелинейная фильтрация жидкости в искусственных волокнистых фильтрах, когда нарушается закон Дарси, исследовалась экспериментально, так как в настоящее время из-за сложности строения и многообразия видов пористых сред не разработана теоретическая модель нелинейной фильтрации, в том числе и в волокнистых материалах [7, 17]. Исследована фильтрация в волокнистом фильтре, состоящем из непрерывных, не связанных связкой волокон, расположенных преимущественно послойно. Поток воды направлен нормально к волокнам. Всего исследовано 8 образцов фильтров ($d_{э,в} = 270, 370, 430, 540, 670, 830$ и 930 мкм) при различной плотности укладки волокон $\alpha = 0, 03 \div 0,25$. При обработке опытных данных вычисляли значения коэффициента сопротивления λ и числа Рейнольдса Re по следующим формулам:

$$\lambda = \frac{\pi \cdot d_{э,в} \cdot g \cdot \Delta H}{2\alpha \cdot U^2 \cdot \delta}, \quad Re = \frac{U \cdot d_{э,в}}{\nu}, \quad (9)$$

где ΔH – напор; $U = \frac{V}{n}$ – средняя скорость обтекания волокон; n – пористость; δ – толщина образца фильтра. Анализируя зависимость $\lambda = f(Re)$, отметим следующее. Переход от линейной фильтрации к квадратичной происходит плавно. Первое критическое число Рейнольдса, соответствующее нарушению линейной фильтрации, $Re_{крI} = 1 \div 3$, второе критическое число Рейнольдса, соответствующее переходу к квадратичной фильтрации, $Re_{крII} = 700 \div 1000$.

Исследование причин нарушения линейного закона фильтрации в системе изотропно расположенных волокон.

Большинство авторов считает, что отклонение от ламинарного закона происходит вследствие возникновения турбулентности в порах пористой среды. Наши исследования [8] и исследования [9, 10], в которых изучалась гидравлика течения на уровне отдельной поры, показали, что это не так. Нами исследованы двухмерные модели пористой среды, в качестве которых были использованы толстые решетки из прозрачных цилиндров одинакового диаметра, установленные по коридорной (9 моделей) и шахматной (модель 1) схемам. Решетки собирались из цилиндров диаметром 7, 10 и 30 мм, пористость решеток $n = 0,3 \div 0,57$. Опыты проводились в прозрачном фильтрационном лотке при напорной фильтрации чистой воды. Освещение потока осуществлялось световым ножом нормально оси цилиндров, источниками света служили блок фотоламп и блок фотовспышек, визуализация потока создавалась алюминиевым порошком, фиксация потока производилась с помощью фотоаппарата. При обработке опытных данных вычислялись коэффициент сопротивления λ и число Рейнольдса Re по следующим формулам:

$$\lambda = \frac{2g \cdot \Delta H}{U^2} \cdot \frac{b}{d \cdot n}, \quad Re = \frac{U(b-d)}{\nu}, \quad (10)$$

где b – расстояние между осями цилиндров; d – диаметр цилиндра; $(b-d)$ – просвет между цилиндрами.

Были выделены следующие гидравлические режимы.

Для коридорной схемы: I – устойчивый ламинарный, II – неустойчивый ламинарный, III – устойчивый ламинарно-вихревой режим, который имеет очерченные транзитную струю в коридорном пространстве и устойчивые вихри в теневых областях с четко выраженным центром вращения, IV – турбулентный режим.

Для каждой модели построены экспериментальные зависимости $\lambda = f(Re)$, на которых показаны

границы выделенных режимов. Для всех моделей нарушение линейного закона начинается при режиме II.

В [9] изучались гидравлические режимы в порах при фильтрации воды на примере двухмерной модели (1 модель), составленной из элементов произвольной формы из прозрачного материала. Получены экспериментальные зависимости коэффициента сопротивления λ^* от Re^* , на которых показаны границы выделенных гидравлических режимов. Выделены следующие гидравлические режимы: I – ламинарный, II – ламинарный с нарушением линейного закона сопротивления, III – смешанный ламинарно-турбулентный, IV – турбулентный режим.

В [10] изучались гидравлические режимы в поре при фильтрации воздуха через пористую среду, состоящую из хорошо окатанной гальки диаметром 30,5 мм. Для измерения скорости в поре использовался термоанемометр. В результате анализа скоростной структуры в поре выделены следующие режимы: I – ламинарный режим, при котором в каждой точке микроскорости стационарны и потери напора пропорциональны скорости, II – устойчивый инерционный режим, при котором в каждой точке микроскорости все еще постоянные, но фильтрация становится нелинейной (вблизи поверхности отдельных частиц гальки отмечены обратные течения), III – турбулентный переходной, IV – турбулентный режим. Получены экспериментальные зависимости $\lambda^{**} = f(Re^{**})$, на которых показаны границы выделенных режимов.

Таким образом, отклонение от линейного закона сопротивления при фильтрации жидкости через пористую среду обусловлено не турбулентностью, а образованием в теневых зонах ламинарных вихревых течений. Для сопоставления исследований, выполненных нами и в работах [9, 10], значения λ и Re были пересчитаны, причем число Рейнольдса и коэффициент сопротивления определялись следующим образом:

$$Re' = \frac{4V\sqrt{2k}}{\nu \cdot n\sqrt{n}}, \quad \lambda' = \frac{8n \cdot g \cdot I\sqrt{2k \cdot n}}{V^2}, \quad (11)$$

где $k = K_{\phi} \cdot \nu / g$ – коэффициент проницаемости; K_{ϕ} – коэффициент фильтрации; I – градиент напора.

Особенность графика $\lambda' = f(Re')$ состоит в том, что в области линейного сопротивления все опытные точки при испытании пористых сред, а также каналов любых профилей ложатся на одну прямую [11]. В области нелинейного сопротивления каждый пористый образец имеет свою кривую.

Анализ графика $\lambda' = f(Re')$ показал, что точное значение $Re'_{крI}$ определить нельзя. Так, для естественных пористых сред (песок, щебень, галька), $Re'_{крI} = 1 \div 5$, для наших моделей с коридорной схемой расположения цилиндров $Re'_{крI} = 1 \div 14$, для модели [9] $Re'_{крI} \approx 1$, для модели [10] $Re'_{крI} \approx 3$. Для модели с шахматной схемой расположения цилиндров $Re'_{крI} \approx 50$, а по расположению $\lambda' - Re'$ эту модель следует отнести к гладким каналам переменного сечения.

3. ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ФИЛЬТРОВ ИЗ ИСКУССТВЕННЫХ ВОЛОКНИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ

Нетканые материалы в виде холстов и войлоков применяются для защиты дренажа от заилиения как самостоятельно, так и в сочетании с обсыпками, тканые материалы – в основном в сочетании с обсыпками из различных несвязных грунтов.

Контактная устойчивость при дренировании несущих несвязных грунтов исследовалась экспериментально на грунтовых моделях и теоретически. В основе теоретического метода лежит представление о проникновении частиц грунта через тонкий волокнистый фильтр как о случайном процессе.

Процесс проникновения частиц грунта через фильтр представляем так. Грунт состоит из бесконечного количества слоев. Каждый слой грунта толщиной в одну частицу имеет одинаковый гранулометрический состав. Из первого слоя грунта, который лежит на фильтре, часть его проникает через поры, а другая часть перекрывает поры фильтра. В результате получается новый фильтр, через который могут проникнуть частицы из второго слоя. И так до n -го слоя грунта, пока не прекратится проникновение грунта и образуется устойчивый контакт. Этот процесс можно описать математически так.

Первый слой грунта. Относительная вероятность того, что частица диаметром d_k проникает через фильтр, будет

$$P'_{k,I} = P_{k,гр} \sum_k^j P_{\Phi}. \quad (12)$$

Уравнение (12) имеет следующий физический смысл: частица диаметром d_k проникает через фильтр, если она попадет на пору фильтра диаметром больше или равную d_k^0 .

Свободных пор $\geq d_k^0$ в фильтре останется

$$P_{k,\Phi} \sum_1^k P_{гр} + P_{k+1,\Phi} \sum_1^{k+1} P_{гр} + P_{k+2,\Phi} \sum_1^{k+2} P_{гр} + \dots + P_{j,\Phi} \sum_1^i P_{гр}. \quad (13)$$

В этом уравнении $P_{k,\Phi} \sum_1^k P_{гр}$ означает, что пора диаметром d_k^0 останется свободной, если на нее попадут частицы $\leq d_k^0$.

Второй слой грунта. Относительная вероятность того, что через фильтр проникнут частицы d_k из второго слоя грунта, можно записать так:

$$P'_{k,2} = P_{k,гр} \left(P_{k,\Phi} \sum_1^k P_{гр} + P_{k+1,\Phi} \sum_1^{k+1} P_{гр} + \dots + P_{j,\Phi} \sum_1^i P_{гр} \right), \quad (14)$$

n-й слой грунта:

$$P'_{k,n} = P_{k,гр} \left[P_{k,\Phi} \left(\sum_1^k P_{гр} \right)^{n-1} + P_{k+1,\Phi} \left(\sum_1^{k+1} P_{гр} \right)^{n-1} + \dots + P_{j,\Phi} \left(\sum_1^i P_{гр} \right)^{n-1} \right]. \quad (15)$$

Тогда относительная вероятность проникновения частиц грунта диаметром d_k из всех n слоев будет

$$P'_k = P'_{k+1} + P'_{k+2} + \dots + P'_{k,n}, \quad (16)$$

Учитывая значения $P'_{k+1}, P'_{k+2}, \dots, P'_{k,n}$, после несложных преобразований получаем

$$P'_k = P_{k,гр} \left\{ \frac{P_{k,\Phi} \left[1 - \left(\sum_1^k P_{гр} \right)^2 \right]}{1 - \sum_1^k P_{гр}} + \frac{P_{k+2,\Phi} \left[1 - \left(\sum_1^{k+1} P_{гр} \right)^n \right]}{1 - \sum_1^{k+2} P_{гр}} + \dots + P_{j,\Phi} \right\}. \quad (17)$$

Если фильтр однородный в виде сетки с одинаковыми ячейками, тогда

$$P'_k = \frac{P_{k, \text{гр}} \left[1 - \left(\sum_1^{d=d_\Phi^0} P_{\text{гр}} \right)^n \right]}{1 - \sum_1^{d=d_\Phi^0} P_{\text{гр}}}, \quad (18)$$

где $d = d_\Phi^0$ - диаметр ячейки сетки.

Если фильтр разнородный, а грунт однородный, тогда

$$P'_k = \sum_k^j P_{\text{гр}}. \quad (19)$$

При учете эффекта сводообразования над порами необходимо уменьшить размер пор или увеличить диаметр всех частиц на коэффициент сводообразования.

Полученные формулы для различных частных случаев были проверены экспериментально. В результате разработаны методики для подбора волокнистых фильтров и обсыпок из различных несвязных грунтов [3].

Волокнистый фильтр с частично растворимыми в воде волокнами. Нетканые клееные полотна, основу которых составляют полимерные волокна (нитрон, хлорин, лавсан), могут содержать специально добавленные волокна - отходы, растворимые в воде. Количество таких волокон должно быть таким, чтобы образовавшийся после растворения их фильтр имел следующую характеристику: толщина фильтра $\delta_{\text{min}} \geq 10d_{\text{э.в}}$, средний размер пор $d_{\text{ср}}^0 \leq 0,25$ мм, водопроницаемость фильтра $K_{\Phi,10} \geq 20$ м/сут.

После укладки дренажных труб в зависимости от свойств грунта и скорости растворения волокон могут быть следующие предельные случаи:

- после растворения части волокон оставшийся фильтр не подвергается дополнительному сжатию и его толщина остается такой же, как и после укладки (случай 1). В этом случае изменяется массовая плотность, средний диаметр пор и коэффициент фильтрации;

- после растворения части волокон оставшийся фильтр подвергается сжатию и его массовая плотность остается неизменной (случай 2). В этом случае изменяется только толщина фильтра.

Массовую плотность фильтра с частично растворимыми волокнами можно представить в виде суммы

$$\gamma_0 = \gamma_{0,1} + \gamma_{0,2}, \quad (20)$$

где $\gamma_{0,1}$, $\gamma_{0,2}$ - массовая плотность растворимых и нерастворимых волокон соответственно. Обозначим содержание растворимых волокон в виде $b = \gamma_{0,1}/\gamma_0$. Тогда после выноса растворимых волокон характеристики фильтра можно определить по следующим формулам:

случай 1

$$\gamma = \gamma_{0,2} = \gamma_0(1-b), \quad d_{\text{ср}}^0 = \frac{\pi \cdot d_{\text{э.в}} \cdot \gamma_{\text{в}}}{4\gamma_0 \cdot (1-b)},$$

$$K_{\Phi} \geq 20 \text{ м/сут.} \quad (21)$$

случай 2

$$\delta = \delta_0(1-b), \quad \gamma = \gamma_0, \quad K_{\Phi} \geq 20 \text{ м/сут.} \quad (22)$$

При этом должны быть выполнены указанные выше условия. Так, для клееных полотен, выпускаемых сейчас фабриками Украины и России ($d_{\text{э.в}} = 15$ мкм, $\gamma_{\text{в}} = 0,95$ г/см³), эти условия следующие:

1. $d_{\text{ср}}^0 = \frac{11,2}{\gamma(1-b)} \leq 250$ мкм,
2. $\delta_{\text{min}} = \delta_0(1-b) \geq 150$ мкм,
3. $K_{\Phi} \geq 20$ м/сут. (23)

Условие 3 выполняется всегда, так как выпускаемые сейчас полотна в заводской упаковке имеют $K_{\Phi} > 20$ м/сут.

Условия 1 и 2 позволяют определить допустимое значение b . Обозначив b_1 и b_2 , соответственно, для первого и второго случаев, найдем из (23)

$$b_1 \leq 1 - \frac{11,2}{250\gamma_0}, \quad b_2 \leq 1 - \frac{150}{\delta_0}. \quad (24)$$

Образовавшийся фильтр после выноса растворимых волокон должен удовлетворять одновременно двум предельным случаям. Это условие будет выполнено, если значение b будет выбрано минимальным из вычисленных b_1 и b_2 . Решение задачи упрощается, так как для выпускаемых сейчас полотен существует зависимость $\gamma_0 = f(\delta_0)$. На рис. 2 построены зависимости $b_1 = f(\delta_0)$ и $b_2 = f(\delta_0)$, и выделена зона допустимых значений $b_{\text{доп}}$ при $\delta_{\text{min}} = 150$ мкм и $\delta_{\text{min}} = 500$ мкм. Видно, что содержание растворимых волокон может достигать 40÷50 %.

Кольматация волокнистого фильтра

Волокнистый фильтр, защищающий дренажные трубы от заиления, может подвергаться химической и механической кольматации. Химическая

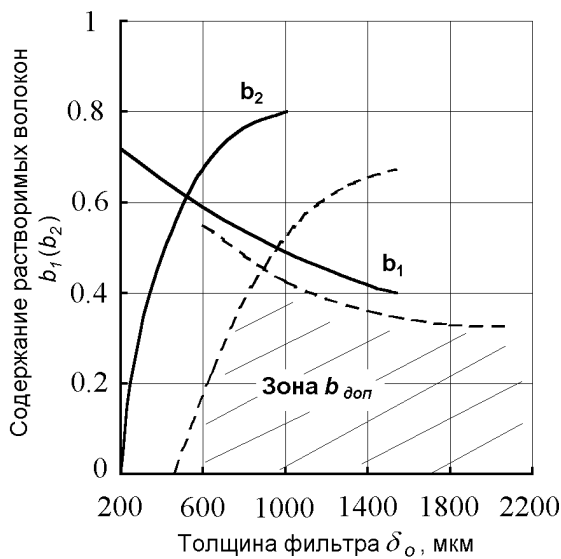


Рис. 2. Залежності $b = f(\delta_0)$
 --- $d_{min}=150$ мкм; - - - $d_{min} = 500$ мкм

кольматация нами не исследовалась. Механическая кольматация фильтров связана с переносом водой мельчайших частиц грунта и отложение их в фильтре [1, 3, 14, 15, 18, 19]. Такие условия могут быть при укладке дренажа в суффозионные несвязные грунты, при укладке в разрыхленные малосвязные и связные грунты, при укладке в разжиженные грунты. Последние два случая связаны со способом строительства дренажа и проявляются только в начальном периоде эксплуатации или в момент укладки дренажа. Ниже приведено краткое изложение результатов экспериментальных исследований кольматации волокнистых фильтров, описанных в [1, 3].

Кольматация фильтра при укладке дренажа в грунты естественной плотности и влажности исследовалась экспериментально при напорной и безнапорной фильтрации. В качестве грунтов использовались средние и легкие суглинки, супесь лессовидная и песок мелкозернистый пылеватый. В качестве фильтров использовались маты из стекловолокна ($d_{\text{с.в.}} = 14$ мкм) и базальтового волокна ($d_{\text{с.в.}} = 10, 20$ и 36 мкм). Продолжительность опытов от 245 до 900 суток. Полученные результаты свидетельствуют о том, что дрены с волокнистыми фильтрами работают удовлетворительно, фильтр не кольматируется.

Кольматация фильтра при укладке его в разжиженные грунты исследовалась экспериментально на примере фильтрации через фильтр суспензий, концентрация которых $C = T/J$ (T - масса сухого грунта, J - масса жидкости) изменялась от 0,001 до 2. Степень кольматации оценивалась отношением $\alpha_k = K_{\text{ф.н}}/K_{\text{ф.з}}$, где $K_{\text{ф.н}}$ - коэффициент фильтрации чистого фильтра, $K_{\text{ф.з}}$ - коэффициент фильтрации закольматированного фильтра.

Кроме α_k , определялась масса грунта, отложившегося в слоях фильтра, и диаметр частиц, прошедших через фильтр. В качестве фильтров использовались стекломаты и стеклохолст в несколько слоев. Анализ опытов показывает, что наибольшая степень кольматации отмечалась в поверхностном слое фильтра толщиной $0 \div 5$ мм и достигала $3 \cdot 10^4$. При $C > 0,75$ кольматация резко уменьшается и при $C > 2$ практически отсутствует. Это подтверждается и нормальной работой дренажа на опытных и производственных участках, где трубы с волокнистыми фильтрами укладывались раздельным способом часто в разжиженные грунты.

Кольматация фильтра при укладке дренажа в разрыхленные (неструктурные) грунты исследовалась экспериментально на грунтовых моделях. Разрыхленный сухой грунт укладывался на волокнистый фильтр. Замачивание производилось снизу вверх, а фильтрация - сверху вниз. Опыты с различными грунтами показали, что при замачивании образуется разжиженный грунт, который при фильтрации воды приводит к незначительной кольматации фильтра. Такая кольматация не влияет существенно на приток к дрене.

Кольматация волокнистого фильтра при работе его в контакте с обсыпками из различных несвязных мало суффозионных и суффозионных грунтов исследовалась экспериментально на грунтовых моделях. В качестве грунтов обсыпки использовали 9 видов морских ракушечных песков и 3 вида золошлаковых отходов тепловых электростанций. В качестве фильтров использовались полотна из полимерных волокон и стеклохолсты в несколько слоев. Опыты показали, что при содержании суффозионных частиц $P_{c,i} < 7\%$, кольматации фильтра практически нет. При $P_{c,i} = 8 \div 18,5\%$ степень кольматации контактного слоя может достигать $\alpha_k = 10 \div 50$. Поэтому рекомендуем не использовать в качестве обсыпки грунты, для которых $P_{c,i} > 5\%$.

4. ВОДОПРИЕМНАЯ СПОСОБНОСТЬ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ТРУБЧАТОГО ДРЕНАЖА С ВОЛОКНИСТЫМ ФИЛЬТРОМ

Гончарный дренаж со сплошным и прерывистым волокнистым фильтром.

В зоне осушения (мелкий дренаж) и в зоне орошения применяют дренаж из гончарных и бетонных труб со сплошным и прерывистым волокнистым фильтром. К последнему следует отнести и гончарный дренаж с соединительными фильтрующими муфтами.

При оценке влияния сопротивления фильтра и щелей между трубами на водоприемную способность дренажа в качестве расчетного принимаем случай работы дрены в режиме подрусловой, когда приток наибольший. Используя метод фильтрационных сопротивлений, удельный приток к дрене q определили так:

$$q = \frac{K_{гр} \cdot H}{\Phi_0 + \Phi_{пр} + \Phi_{\phi} + \Phi_1 + \Phi_n}, \quad (25)$$

где $K_{гр}$ – коэффициент фильтрации грунта; H – напор на дрене; Φ_0 – фильтрационное сопротивление "идеальной" дрены, которое определяется по известным формулам; $\Phi_{пр}$, Φ_{ϕ} , Φ_1 и Φ_n – дополнительные фильтрационные сопротивления, соответственно, за счет прерывистости, гидравлических потерь в фильтре, резкого изменения линии токов в фильтре вблизи щели и гидравлических потерь в щели между трубами.

Для определения $\Phi_{пр}$ были использованы результаты [12] и наших исследований. Предлагается при $\tau_0/l_T \geq 0,015$ формула

$$\Phi_{пр} = \frac{1}{2\pi^2} \cdot \ln \frac{4l_T}{d_T} \cdot \ln \frac{1}{S\mu n \frac{\pi \cdot \tau_0}{2l_T}}, \quad (26)$$

где l_T – длина трубы; $\tau_0 = l_1$ – длина фильтра; d_T – наружный диаметр трубы.

Для определения Φ_{ϕ} рассматривается задача о гидравлическом сопротивлении волокнистого фильтра при движении жидкости с переменным расходом [3]. В результате получены следующие формулы:

$$\Phi_{\phi} = \frac{K_{гр} \cdot l_T^2}{4\pi \cdot \delta \cdot K_{\phi} (d_T + \delta) \cdot (n + 3)}, \quad (27)$$

$$n^2 + 3n - \frac{A}{\Phi_0} = 0, \quad (28)$$

где

$$A = \frac{K_{гр} \cdot l_T^2}{4\pi \cdot \delta \cdot K_{\phi} (d_T + \delta)}; \quad (29)$$

при прерывистом фильтре

$$\Phi_{\phi} = \frac{K_{гр} \cdot l_T \cdot l_1}{4\pi \cdot \delta \cdot K_{\phi} (d_T + \delta) \cdot (n + 3)}, \quad (30)$$

$$n^2 + 3n - \frac{A}{\Phi_0 + \Phi_{пр}} = 0, \quad (31)$$

где

$$A = \frac{K_{гр} \cdot l_T \cdot l_1}{4\pi \cdot K_{\phi} (d_T + \delta)}, \quad (32)$$

где δ – толщина фильтра; K_{ϕ} – коэффициент фильтрации волокнистого фильтра. Безразмерный параметр A зависит только от величин, характеризующих конструкцию дрены, которые известны или могут быть заданы при проектировании.

Теоретическое определение Φ_1 и Φ_n [3] для реальных конструкций дренажа показало, что их величина незначительна и может не учитываться при проектировании дренажа.

Формулы (26)–(32) были проверены экспериментально на грунтовых моделях [3]. Показано, что эти формулы хорошо согласуются с экспериментами при $A \leq 1,5$. Этого достаточно, чтобы запроектировать дрены с минимальными дополнительными фильтрационными сопротивлениями.

Расчет Φ_{ϕ} и $\Phi_{пр}$ по приведенным выше формулам позволяет решить ряд практически важных задач: оценить несовершенство применяемых конструкций дрен, рассчитать рациональную конструкцию дрены с минимальным фильтрационным сопротивлением, оценить пригодность новых фильтрующих материалов в качестве защитных фильтров дренажа. В частности, было установлено, что гончарный дренаж с тонким волокнистым фильтром из стеклохолста и клееных полотен является несовершенным. Гончарный дренаж с фильтром из прошивных матов из штапельных базальтовых волокон ($\delta = 25$ мм) близок к "идеальному" при $K_{гр} \leq 1$ м/сут. Длину секций глухих бетонных труб можно увеличить до $1,5 \div 2$ м.

Гончарный дренаж с соединительными пластмассовыми муфтами был исследован экспериментально на грунтовых моделях. Изучались пять конструкций муфт, из которых четыре – внутренние муфты и одна наружная. Дренажные отверстия муфт защищались волокнистыми фильтрами из стеклохолста, клееного полотна из полимерных волокон и текстильной застежки "Репейник". Дрены работали в режиме подрусловых. В качестве грунта использовали пески $K_{гр} = (2 \div 3)$ и 20 м/сут.

В результате получено, что дренаж с соединительными муфтами является несовершенным.

Приток к дрене зависит, в основном, от ширины защитного фильтра и мало зависит от конструкции муфт. Приток к дрене с муфтами при ширине полоски фильтра 11÷16 мм не превышает 0,5 q_0 , где q_0 - приток к "идеальной" дрене. И, тем не менее, дренаж с муфтами и тонким прерывистым фильтром на производственных участках работает нормально. Это противоречие можно объяснить тем, что большинство осушительного дренажа запроектировано не по аналитическим, а по эмпирическим методикам, которые получены в результате натурных исследований заведомо не совершенной конструкции дренажа.

Горизонтальный дренаж из гладких перфорированных труб с фильтром из волокнистых материалов.

Экспериментальные исследования [1, 3] показали, что фильтрационное сопротивление дрены при увеличении степени перфорации быстро уменьшается и становится практически постоянным. Характер изменения этой зависимости такой, что можно говорить о критической степени перфорации $\Pi_{кр}$, когда увеличение степени перфорации не приводит к увеличению притока к дрене. В практическом плане $\Pi_{кр}$ можно рассматривать как рациональную $\Pi_{рац}$. Для обобщения экспериментальных исследований было разработано приближенное аналитическое решение [3], в результате чего получены следующие формулы для перфорированных гладких труб, защищенных тонким волокнистым фильтром:

для перфорации круглыми отверстиями

$$\begin{aligned} \Phi_{\phi} &= \frac{K_{гр} \cdot M^2 \cdot d_0^2}{128\pi(d_T + 2\delta)d_T^2 \cdot n^2}, \\ \Phi_{п} &= \frac{K_{гр} \cdot q}{2g \cdot \pi^2 \cdot \mu^2 \cdot d_T^2 \cdot n^2}, \end{aligned} \quad (33)$$

$$\Pi_{рац} = \left\{ \frac{1}{\xi \cdot \Phi_0} \cdot \left[\frac{K_{гр} \cdot M^2 \cdot d_T^2}{128\pi \cdot K_{\phi} \delta (d_T + 2\delta) \cdot d_T^2} + \frac{K_{гр} \cdot q}{2g\pi^2 \cdot \mu^2 \cdot d_T^2} \right] \right\}^{1/2}, \quad (34)$$

для перфорации продольными или поперечными щелями длиной s_0 и шириной τ_0

$$\Pi_{рац} = \left\{ \frac{1}{\xi \cdot \Phi_0} \cdot \left[\frac{K_{гр} \cdot M^2 \cdot f_{щ}^2}{8\pi^3 \cdot K_{\phi} \delta (d_T + 2\delta) \cdot d_T^2} + \frac{K_{гр} \cdot q}{2g\pi^2 \cdot \mu^2 \cdot d_T^2} \right] \right\}^{1/2}, \quad (35)$$

где Φ_{ϕ} , $\Phi_{п}$ – дополнительные фильтрационные сопротивления за счет потерь в фильтре и перфорации соответственно; Φ_0 – фильтрационное сопротивление "идеальной" дрены; $K_{гр}$, K_{ϕ} – коэффициенты фильтрации грунта и фильтра; d_T – диаметр трубы; δ – толщина фильтра; q – удельный приток к дрене; d_0 – диаметр отверстий перфорации; M – количество отверстий в поперечном сечении трубы; Π – степень перфорации; μ – коэффициент расхода для отверстий перфорации; $f_{щ} = s_0 \cdot \tau_0$, $\xi = (\Phi_{\phi} + \Phi_{п})/\Phi_0$. Значения ξ было определено в результате обработки экспериментальных данных и может быть принято $\xi = 0,025$.

Влияние водопроницаемости придренинной зоны грунта на водоприемную способность дренажа.

Строительство закрытого горизонтального дренажа в зоне орошения и осушения осуществляется дреноукладчиками: траншейным (ширина траншеи 0,5÷0,6 м), узкотраншейным (0,12÷0,3 м) и бестраншейным (0,2 м) способами. Проведенные нами натурные исследования на опытно-производственных участках показали [3] следующее.

При траншейном способе строительства дренажа плотность и водопроницаемость грунта обратной засыпки отличаются от грунта ненарушенной структуры. В первый год эксплуатации плотность обратной засыпки меньше, а водопроницаемость больше, чем у дренируемого грунта. Через 3÷4 года плотность грунта обратной засыпки приближается к плотности дренируемого грунта, а коэффициент фильтрации может быть в 3÷4 раза меньше.

При бестраншейном способе строительства дренажа придренинная область грунта отличается своей спецификой формирования и зависит от глубины укладки дрены, свойств дренируемого грунта, глубины предварительного рыхления и других мероприятий. Общим является уплотнение грунта вблизи дрены (до 0,3 м) и разрыхление грунта в щели над дреной. Через 3÷4 года происходит стабилизация плотности, но водопроницаемость грунта в придренинной зоне может быть меньше до 10 раз, чем дренируемого грунта.

Отрицательного влияния переработки грунта при строительстве дренажа траншейным и бестраншейным способами дреноукладчиками практически нет при дренировании легких, хорошо проницаемых грунтов ($K_{гр} > 0,3$ м/сут) и возрастает в тяжелых грунтах.

Уменьшение водопроницаемости грунта вблизи дрены по сравнению с дренируемым грунтом приводит к возникновению дополнительных фильтра-

ционных сопротивлений и уменьшению притока к дрене. Исследование этого фактора проводилось на интеграторе ЭГДА для плоской задачи притока к подрусловой дрене в однородном пласте. Рассмотрены две модели: модель 1 – дрена без обсыпки и модель 2 – дрена с обсыпкой хорошо проницаемым несвязным грунтом. Для модели 1 приток к дрене зависит от отношения $K_{гр}/K_{э}$, где $K_{гр}$ и $K_{э}$ – коэффициенты фильтрации дренируемого грунта и обратной засыпки траншеи, ширины траншеи и площади контакта дрены с грунтом ненарушенной структуры, но всегда меньше притока к "идеальной" дрене. Для модели 2 рассмотрены различные схемы устройства обсыпки. Результаты исследований показали, что наиболее эффективной конструкцией является дрена с круговой обсыпкой высотой 0,4 м. При $K_{об}/K_{гр} \geq 10$ эта дрена близка к "идеальной" по контуру обсыпки. Это подтверждено исследованиями на грунтовых моделях и натурными исследованиями на опытно-производственных участках после 5 лет эксплуатации [3].

5. КОНСТРУКЦИИ И СПОСОБЫ СТРОИТЕЛЬСТВА ГОРИЗОНТАЛЬНО ТРУБЧАТОГО ДРЕНАЖА

Основные конструкции дрен глубокого дренажа приведены на рис. 3 и 4. Толщина фильтра в уплотненном состоянии должна быть не менее 1 мм.

Приведенные на рисунках конструкции можно использовать при строительстве дренажа отдельным, полумеханизированным и механизированным способами траншейными и бестраншейными дреноукладчиками. При механизированном способе строительства дренажа используют пластмассовые гладкие, гофрированные и витые трубы, защищенные волокнистым фильтром (рис. 3, в, г и рис. 4, а). Дрены оборудуются фильтром в заводских условиях и доставляются к месту строительства в виде бухт.

Конструкции дрен (рис. 3) могут использоваться при строительстве дренажных коллекторов, при дренировании населенных пунктов, городов и промышленных площадок.

Применение волокнистых фильтров позволяет существенно снизить стоимость, повысить качество и уровень механизации строительства дренажа. До 1985 г. в Украине дренаж с волокнистыми фильтрами был построен на площади 460000 га и дренировано 375 населенных пунктов.

Лучевой дренаж. Разработана конструк-

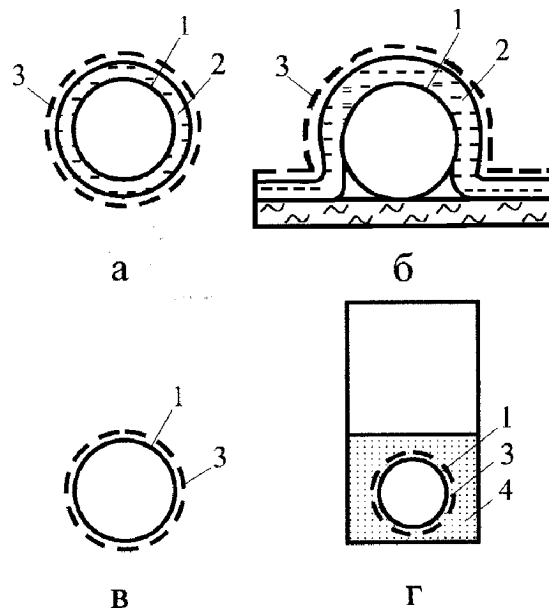


Рис. 3. Схемы конструкций дрен глубокого дренажа (глубина укладки 1,5 – 7 м)
1 – дренажная труба; 2 – маты из базальтового или стеклянного волокна;
3 – стеклохолст или стеклосетка (а, б), холст из стеклянных или полимерных волокон, трубофильтр с фильтром из полиэтилена (в, г);
4 – обсыпка из хорошо фильтрующего местного материала

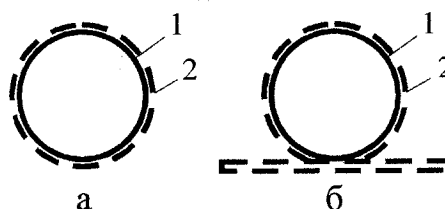


Рис. 4. Схемы конструкций дрен мелкого дренажа
1 – дренажная труба; 2 – холст из стеклянных или полимерных волокон при сплошной обертке по спирали а или полоски снизу и сверху б

ция лучевого дренажа на основе перфорированной пластмассовой трубы и защитного фильтра из волокнистого полиэтилена, который получен методом термоэкструзии в виде бесшовного фильтра, жестко скрепленного с трубой (трубофильтр).

Были исследованы 6 типов трубофильтров, в результате чего рекомендуется следующая конструкция дрены. Гладкая полиэтиленовая труба наружным диаметром 90 мм, перфорированная круглыми отверстиями диаметром 20 мм (степень перфорации 2 %), защищается двухслойным фильтром из волокнистого полиэтилена. Первый слой, прилегающий к трубе, имеет следующие характери-

стики: $d_{\text{э.в}} = 0,5 \div 0,6$ мм, $\delta = 9$ мм, $\gamma = 0,23$ г/см³, $n = 0,76$, $d_{\text{ср}}^0 = 0,85$ мм, $K_{\text{ф}} = 6000$ м/сут.; второй слой - $d_{\text{э.в}} = 0,125$ мм, $\delta = 4,5$ мм, $\gamma = 0,28$ г/см³, $n = 0,71$, $d_{\text{ср}}^0 = 0,15$ мм, $K_{\text{ф}} = 570$ м/сут. Дрена - трубофильтр изготавливается секциями длиной 1,4 м, секции соединяются с помощью резьбовых муфт.

Разработанная конструкция лучевого дренажа внедрена в г. Харькове при дренировании территории жилой застройки. Строительство дренажа осуществлялось из шахтного ствола методом горизонтального бурения под защитой обсадных труб. Дренаж двухъярусный, всего 13 лучей общей длиной 545 м. При проектировании дренажа разработана и использована методика численного моделирования и решение с помощью ЭВМ задач притока для случая неустановившейся фильтрации в двухмерных и трехмерных областях.

Дренаж построен в 1991 г. и по настоящее время работает хорошо.

6. ФИЛЬТРЫ БУРОВЫХ СКВАЖИН С ВОДОПРИЕМНЫМ СЛОЕМ ИЗ ЗАЩИТНО-ФИЛЬТРУЮЩЕГО ПОЛИЭТИЛЕНОВОГО МАТЕРИАЛА (ЗФПМ)

Исследована новая конструкция фильтра буровых водозаборных и наблюдательных скважин. Фильтр состоит из перфорированного трубчатого или стержневого опорного каркаса и водоприемного слоя, который может быть получен методом пневмоэкструзии в виде бесшовного покрытия непосредственно на опорном каркасе, а может быть устроен из отдельных листов ЗФПМ. Исследованы физико-механические ($d_{\text{э.в}}$, δ , γ , n , $d_{\text{ср}}^0$ при $P = 0,02 \div 1,3$ МПа), фильтрационные ($K_{\text{ф}}$, $Re_{\text{крп}}$ при поперечной и продольной фильтрации) характеристики, кольматация при контакте с несвязными грунтами (пески мелкозернистый $d_{50} = 0,11$ мм и среднезернистый $d_{50} = 0,25$ мм) и защитные свойства водоприемного слоя из ЗФПМ. Отметим наиболее интересные результаты. Деформация образцов ЗФПМ при сжатии наиболее интенсивно происходит при $P = 0,02 \div 0,3$ МПа и может быть описана зависимостью (1). Пористость в зависимости от $d_{\text{э.в}}$ изменяется от $0,64 \div 0,82$ при $P = 0,02$ МПа до $0,24 \div 0,3$ при $P = 1,3$ МПа, а средний диаметр пор уменьшается и стремится к $d_{\text{э.в}}$. Поровая структура материала зависит от толщины фильтра, и при $\delta \geq 20d_{\text{э.в}}$ средний диаметр пор практически не изменяется. Режим фильтрации чистой воды через ЗФПМ в общем случае является нелинейным, линейность соблю-

дается при $Re_{\text{крп}} \leq 1 \div 3$. Коэффициент фильтрации при поперечной фильтрации примерно в 2 раза меньше, чем при продольной, что говорит об анизотропии ЗФПМ. Кольматация фильтра при нисходящей напорной фильтрации зависит от отношения $d_{\text{ср}}^0/d_{50}$ и при $d_{\text{ср}}^0/d_{50} \geq 0,8$ кольматации фильтра нет. Однако ЗФПМ должен не только не кольматироваться, но и защищать скважину от недопустимого пескования. Процесс пескования через ЗФПМ изучался путем сравнения защитных свойств сетчатых фильтров, подобранных согласно рекомендаций С.К. Абрамова (при d_{50} песка, равного 0,11 мм, должна быть сетка с ячейками 0,2 x 0,2 мм, а при d_{50} песка, равного 0,25 мм - с ячейками 0,5 x 0,5 мм) [13], и различных образцов ЗФПМ ($d_{\text{э.в}} = 0,1$ мм и $d_{\text{э.в}} = 0,2$ мм). Испытания проводились при нестационарной работе скважин в режиме пуск - остановка (до 26 циклов). В результате получено, что ЗФПМ должен иметь следующие характеристики: $d_{\text{э.в}} \leq d_{50}$, $\delta = (10 \div 30)d_{\text{э.в}}$, $d_{\text{ср}}^0 = (1 \div 1,4)d_{50}$, где меньшие значения $d_{\text{ср}}^0$ применяют при средне- и крупнозернистых песках, а большие - при мелкозернистом песке.

Исследование водоприемной способности скважин с фильтром новой конструкции проводилось в лабораторных условиях на грунтовых моделях и в натуральных условиях на опытно-производственных скважинах. В лаборатории моделировался приток из напорного пласта для совершенной по степени вскрытия пласта скважины. Размеры модели: наружный диаметр 1,2 м, высота слоя - 0,9 м, грунт моделей - среднезернистый и мелкозернистый пески. При оценке работы скважины определяли полное фильтрационное сопротивление Φ , полученное в опытах, которое сравнивали с фильтрационным сопротивлением "идеальной" скважины Φ_0 , вычисленное по известным формулам. Исследовались различные конструкции фильтров с водоприемным слоем из ЗФПМ с гравийной обсыпкой и без нее. Результаты опытов показали, что все исследованные конструкции фильтров с водоприемным слоем из ЗФПМ имеют незначительное дополнительное фильтрационное сопротивление за счет конструкции ($\Phi/\Phi_0 = 1,03 \div 1,1$) и могут не учитываться при расчете притока воды к скважине.

По результатам проведенных исследований были разработаны технические условия "Материал защитно-фильтрующий полиэтиленовый для буровых скважин" (ТУ 88 УССР 541735 1.1 - 91). В соответствии с этими ТУ предусматривается производство трех типов ЗФПМ для применения в различных гидрогеологических условиях в сква-

жинах різної конструкції і призначення. Матеріал першого типу призначений для використання в скважинах режимно-наблюдальної мережі і пьезометрах. Матеріал другого типу передбачено застосовувати в фільтрах експлуатаційних скважин, що працюють в мелкозернистих пісках ($d_{50} = 0,1 \div 0,25$ мм) без гравійної обсыпки. Третій тип матеріалу призначений для роботи в фільтрах експлуатаційних скважин, що відбирають воду з середньо- і крупнозернистих пісків ($d_{50} > 0,25$ мм), а також в фільтрах скважин, побудованих без гравійної обсыпки.

В натуральних умовах на різних об'єктах були побудовані шість скважин вертикального дренажу (перфорированні полівинилхлоридні труби діаметром $220 \div 280$ мм, довжина фільтра, обладнаного ЗФПМ, $6 \div 17$ м, глибина скважин – до 63 м, дебіт – $7 \div 8$ л/с, мінералізація води – до 30 г/л при $pH = 7,6 \div 7,8$), 15 скважин глибокого будівельного водопониження і 125 скважин режимно-наблюдальної мережі, які працювали поруч зі скважинами традиційних конструкцій. Натуральні спостереження впродовж 4 років за роботою скважин, обладнаних фільтрами з водоприйнятним шаром з ЗФПМ, показали їх надійну роботу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основі узагальнення фізико-механічних характеристик і структурних параметрів фільтрів з мінеральних і полімерних волокон були отримані розрахункові залежності, які дають можливість визначити об'ємний вага, пористість, розміри пор і характер їх розподілу, середній діаметр пор, деформацію і товщину фільтра при різних тисках, діаметрах елементарних волокон при відсутності і наявності зв'язуючого матеріалу.

2. В результаті проведених досліджень фільтраційних властивостей тканинних і нетканних фільтрів з базальтових, скляних і полімерних волокон при продольній і поперечної фільтрації отримані залежності, що дозволяють визначити критичні числа Рейнольдса, при яких в досліджуваних фільтрах має місце лінійна, перехідна або квадратична область опору. Крім того, можна визначити коефіцієнт проникності і коефіцієнт фільтрації, оцінити гідравлічні опору фільтрів в залежності від їх структури і, не проводя спеціальних досліджень, отримати фільтр з заданими фільтраційними властивостями

і розмірами пор.

Розроблено метод фільтраційного розрахунку волокнистих фільтрів з урахування впливу тиску, деформацій, діаметра елементарного волокна, характеру переплетення ниток і напрямку потоку до волокон або ниток, який покладений в основу при виготовленні дренажних фільтрів.

3. На основі експериментальних, теоретичних і натуральних досліджень волокнистих фільтрів і обладнаного ними дренажу на кольматацию і контактну стійкість ґрунтів було встановлено, що вони захищають будь-які несвіязні і свіязні ґрунти від контактної фільтраційної руйнування при установившійся і не установившійся фільтрації, в них практично відсутня механічна кольматация і вони надійно захищають дренажі від замулення.

4. На основі досліджень з застосуванням фізичного і математичного моделювання і аналітичних рішень отримані розрахункові залежності, які дозволяють врахувати вплив діаметра дренажу на її водоприйнятність, визначити оптимальну площу, розміри, форму і характер розподілу перфорації по периметру труби, встановити необхідну водопрохідність, товщину і конструкцію волокнистого фільтра і визначити мінімальні фільтраційні опору і максимальний приток води в дренаж, який по величині наближається до притоку в ідеальну по характеру відкриття пласта дренаж і визначити приток до неї, закладеної в різних по водопрохідності ґрунтах.

5. Багаторічні комплексні дослідження розроблених конструкцій трубчатого дренажу з волокнистими фільтрами показали, що такий дренаж працює добре і має ряд переваг порівняно з дренажем з фільтрами з піщано-гравійних матеріалів. Це, в першу чергу, менша ціна, більш висока ступінь індустріалізації і механізації будівництва дренажу. Найбільше поширення нові конструкції дренажу отримали в меліоративному будівництві. Для цього на основі наших досліджень розроблено ряд нормативних документів, які використовували при проектуванні і будівництві дренажу. Має місце позитивний досвід використання розроблених нових конструкцій дренажу з волокнистими фільтрами в міському і промисловому будівництві. Найбільш прогресивною з запропонованих конструкцій дренажу вважається дренаж на основі труб з полімерних матеріалів з безшовним фільтром з волокнистого поліетилену, який можна застосовувати при будівництві дренажу лю-

бого назначения и при любом способе строительства.

1. Пивовар Н.Г., Бугай Н.Г., Рычко В.А. Дренаж с волокнистыми фильтрами.– К.: Наук. думка, 1980.– 214 с.
2. Бугай Н.Г., Виноградов И.Г., Внучков В.В. и др. Дренажные системы в зоне орошения.– К.: Урожай, 1987.– 192 с.
3. Пивовар Н.Г., Бугай Н.Г., Фридрихсон В.Л., Кривоног А.И., Кривоног В.В. Дренаж с волокнистыми фильтрами для защиты территорий от подтопления.– К.: Институт гидромеханики НАН Украины, 2000.– 332 с.
4. Armour J.C., Cannon J.N. Fluid flow through woven screen // Aiche J. Chem. Eng. Res. and development.– 1968.– 5.– P. 415-420.
5. Пискарев И.В. Фильтровальные ткани: изготовление и применение.– М: Изд-во СССР, 1963.– 180 с.
6. Фукс Н.А., Стечкина И.Б. К теории волокнистых аэрозольных фильтров // Докл. АН СССР.– 1968.– 147 Вып.5.– С. 1144-1147.
7. Шейдеггер А.Э. Физика течения жидкости через пористые среды.– М: Гостоптехиздат, 1960.– 249 с.
8. Бугай Н.Г. Гидравлическая структура фильтрационного потока в отдельной поре при нелинейной фильтрации // Гидромеханика.– 1974.– 23.– С. 64-69.
9. Chauvvetcau I., Thirriot C.I. Regimes diculement an millien Poreux et limite de la loi de Darcy // Hoille blanche.– 1967.– 12.– P. 85-89.
10. Wright D.E. Nonlinear flow through granular media // Hydraul. Dif. Proc. Amer. Civil Engrs.– 1968.– 4.– P. 71-76.
11. Требин Г.Ф. Фильтрация жидкостей и газов в пористых средах.– М: Гостоптехиздат, 1959.– 153 с.
12. Мурашко А.И. Пластмассовый дренаж.– Минск: Урожай, 1969.– 195 с.
13. Абрамов С.К., Алексеев В.С. Забор воды из подземного источника.– М: Колос, 1980.– 239 с.
14. Laura M. McDowell-Boyer, James R. Hunt and Nicholas Sitar Particle Transport Through Porous Media // Water Resources Research.– 1986.– Vol. 22, 13.– P. 1901-1921.
15. Abd El-Hamied Abd Abdoh, Lajos Tama's Investigation of loaded fibrous filters // Period. polytechn. Mech. eng.– 1997.– 41 1.– P. 3-20.
16. Lu Wei-Ming, Tung Kuo-Lun, Hwang Kuo-Jen Fluid flow through basic weaves of monofilament filter cloth // Text. Res. J.– 1996.– 66, 5.– P. 311-323.
17. Shibuya Yotsugi, Ookubo Jun-ichirou, Ohayoshi Tadashi Theoretical evaluation of permeability of porous media including microscopic internal flow // Nihon kikai gakkai roubunshu. B = Trans. Jap. Soc. Mech. Eng. B.– 1997.– 63, 616.– P. 3863-3868.
18. Palmeira E.M., Fannin R.J., Vaid Y.P. A study on the behaviour of soil-geotextile systems in filtration tests // Can. Geotechn. J.– 1996.– 33, 6.– P. 899-912.
19. Fu-Chun Wu, Hung-Tzu Huang Hydrayulic resistance induced by deposition of sediment in porous medium // J. of Hydrayulic Engineering.– 2000.– 126. 7.– P. 547-551.