

УДК 626.862: 66.067.32, 628.16.067, 628.16.067

# ВОЛОКНИСТО–ПОРИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ ВОЛОКОН В МЕЛИОРАТИВНОМ И ГИДРОТЕХНИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ПРИ ОЧИСТКЕ ВОДЫ

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

*Институт гидромеханики НАН Украины, Киев**Получено 20.01.2007*

Приведены в сокращенном виде результаты исследования фильтров из волокнисто–пористого полиэтилена (ВПП), проведенные в Институте гидромеханики НАН Украины за последние 20 лет. Фильтры из ВПП выполняют роль обратных фильтров и могут применяться как самостоятельные фильтрационные полотна, так и в качестве трубофильтров. Приведены результаты исследования физико–механических, фильтрационных и защитных свойств; кольматации и водопримной способности дренажных конструкций; безреагентной, контактной реагентной очистки и обезжелезивания воды. Приведены предложения по усовершенствованию технологии строительства дренажа. Кроме того, приведены результаты определения индикаторным методом действительной пористости, концентрации и плотности осадка в порах заиленного фильтра, а также регенерации фильтров без нарушения структуры фильтра.

Наведені в скороченому вигляді результати досліджень фільтрів з волокнисто–пористого поліетилену (ВПП), які були проведені в Інституті гідромеханіки НАН України за останні 20 років. Фільтри з ВПП виконують роль зворотних фільтрів і можуть застосовуватись як самостійні фільтраційні полотна, так і як трубофільтри. Наведені результати досліджень фізико–механічних, фільтраційних та захисних властивостей; кольматациї та водоприймальної здатності дренажних конструкцій; безреагентної, контактної реагентної очистки і незалізення води. Наведені пропозиції щодо удосконалення технології будівництва дренажу. Крім того, наведені результати визначення індикаторним методом дійсної пористості, концентрації та густини осаду в порах замуленого фільтра, а також регенерації фільтрів без порушення їх структури.

Results of researches of filters from fibrous–porous polyethylene (FPP), lead in Institute of hidromechanics NAS of Ukraine for last 20 years are presented in shorthand form. Filters from FPP carry out a role of return filters and can be applied as independent filtration cloths, as pipe-filters. Results of researches of physicomechanical, filtrational and protective properties; mud injection and water intake capacity of drainage designs; reagentless, contact reagentive clearing and dechalybeate water are presented. Proposals on improvement of technology of construction of a drainage are presented. Besides results of definition by a indicator method of the real porosity, concentration and density in pores of settling filter, and also regeneration of the filter without disturbance of it's structure are presented.

## ВВЕДЕНИЕ

В Институте гидромеханики НАН Украины в отделе гидродинамики гидротехнических сооружений длительное время проводились исследования различных волокнисто–пористых материалов из искусственных минеральных и полимерных волокон, которые использовались в качестве обратных фильтров при строительстве дренажей различного назначения в мелиоративном и гидротехническом строительстве, а также при очистке воды. Результаты этих исследований опубликованы во многих научных работах [1–6] и нашли широкое внедрение при строительстве оросительных и осушительных систем в Украине и в других республиках СССР.

Наиболее прогрессивным, с нашей точки зрения, является волокнисто–пористый материал (ВПП), полученный способом пневмоэкструзии [7–9]. Этот метод позволяет получить не только плоский материал типа холстов, но и так называемые трубо-

фильтры, когда на дренажные трубы напыляется бесшовный слой фильтра, жестко скрепленный с трубой. Такие трубофильтры, изготовленные в заводских условиях, могут быть гибкими и позволяют механизировать процесс строительства дренажа.

Исследования, проведенные нами, показали, что волокнисто–пористый материал из полиэтилена может быть использован при очистке малоконцентрированной суспензии с диаметром частиц не более 10 мкм при безреагентной и контактной реагентной очистке и при обезжелезивании воды.

Ниже коротко излагаются результаты исследований по направлениям, указанным выше.

## 1. ФИЗИКО–МЕХАНИЧЕСКИЕ И ФИЛЬТРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ФИЛЬТРОВ ИЗ ВПП

Фильтр из ВПП получают пневмоэкструзионным способом. В отличие от стеклохолстов и поло-

тен из полимерных волокон полиэтиленовый холст состоит из волокон неодинакового диаметра, форма поперечного сечения волокон не цилиндрическая, а скорее эллиптическая, в местах контакта волокна спаяны. Пневмоэкструзионный способ позволяет получать материал со средним диаметром элементарных волокон  $d_{\varepsilon, \delta} = 35 \div 1000$  мкм, плотностью  $\gamma = 0.17 \div 0.45$  г/см<sup>3</sup> (при  $P_o = 0.02$  МПа), пористостью  $n = 0.53 \div 0.82$  (при плотности материала волокон  $\gamma_n = 0.95$  г/см<sup>3</sup>).

При использовании холстов из ВПП в качестве обратных фильтров горизонтальных трубчатых дренажей фильтр подвергается нормальному давлению  $P$ . При этом уменьшается его толщина и пористость. При глубине заложения дрен на глубину не более 7 м давление на фильтр  $P \leq 0.12$  МПа. В этом случае деформация фильтра может быть описана экспериментальной зависимостью

$$\frac{P}{\varepsilon} = E_o + C_1(P - P_o),$$

где  $\varepsilon$  – относительная деформация фильтра;  $P_o = 0.02$  МПа;  $E_o$  – модуль упругости;  $C_1$  – коэффициент пропорциональности. Для фильтра из ВПП при  $d_{\varepsilon, \delta} = 38$  мкм  $E_o = 0.17$  МПа,  $C_1 = 1.3$ ; при  $d_{\varepsilon, \delta} = 150 \div 200$  мкм  $E_o = 0.24$  МПа и  $C_1 = 1.3$ . При использовании холста из ВПП в вертикальных дренажах давление на фильтр значительно возрастает и при  $d_{\varepsilon, \delta} = 150 \div 200$  мкм могут быть значения  $\varepsilon = 0.6 \div 0.7$  и  $n = 0.25 \div 0.3$  [2]. Следует отметить, что при  $P \leq 1.3$  МПа разлома волокон не происходит и фильтр не разрушается.

Распределение размера пор и средний диаметр пор фильтра определяли методом просыпания калиброванных частиц [2]. Получена экспериментальная зависимость:

$$\frac{d_{cp}^o}{d_{\varepsilon, \delta}} = 2.88 \left( \frac{\delta}{d_{\varepsilon, \delta}} \cdot \frac{\gamma}{\gamma_n} \right)^{-1.1} + 1, \quad (1)$$

где  $d_{cp}^o$  – средний диаметр пор;  $\delta$  – толщина фильтра.

Анализ зависимости (1) показывает, что формирование поровой структуры фильтра в основном завершается при достижении толщины фильтра  $\delta = (10 \div 20) d_{\varepsilon, \delta}$  в зависимости от его плотности и дальнейшее увеличение толщины фильтра не приводит к заметному уменьшению  $d_{cp}^o$ .

## 2. ВОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ ФИЛЬТРА ИЗ ВПП

Водопроницаемость фильтра определяется зависимостью  $I - V$  (где  $I = \Delta H / \delta$ ;  $\Delta H$  – пере-

пад давления на фильтр толщиной  $\delta$ ;  $V$  – скорость фильтрации) или зависимостью  $C - Re$ :

$$C = \frac{\pi g d_{\varepsilon, \delta} I n^2}{2V^2(1-n)},$$

$$Re = \frac{V d_{\varepsilon, \delta}}{n \nu},$$

где  $\nu$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости.

Зависимость  $\lg C - \lg Re$  при малых значениях  $\lg Re$  линейная. Отклонение от линейности происходит плавно и в пределе стремится к постоянному значению  $\lg C$ . Обычно определяют критическое значение  $Re_{кр.1}$ , когда нарушается линейность, и  $Re_{кр.2}$ , когда  $\lg C \approx \text{const}$ . При  $Re < Re_{кр.1}$  фильтрационный поток считается ламинарным и подчиняется закону Дарси. В этом случае

$$V = K_{\phi} I,$$

где  $K_{\phi}$  – коэффициент фильтрации.

При  $Re > Re_{кр.2}$  поток считается турбулентным. Экспериментальные исследования фильтров из ВПП при  $d_{\varepsilon, \delta} = 38 \div 930$  мкм показали, что  $Re_{кр.1} = 1 \div 3$  и  $Re_{кр.2} = 700 \div 1000$ . При  $Re < Re_{кр.1}$  получена зависимость для  $K_{\phi}$  при фильтрации перпендикулярно поверхности фильтра:

$$K_{\phi} = \frac{g n d_{\varepsilon, \delta}^2}{8(1-n) \nu f^o(\alpha)},$$

где  $\alpha = 1 - n$ ;  $f^o(\alpha)$  – коэффициент, учитывающий гидродинамическое взаимное влияние волокон при движении жидкости через фильтр (см. рис.1). При движении жидкости вдоль фильтра коэффициент фильтрации примерно в 2 раза больше, что говорит об анизотропии фильтра в продольном и поперечном направлении.

Фильтр из ВПП по отношению к воде гидрофобный. Влияние гидрофобности на проницаемость фильтра исследовалось экспериментально при фильтрации воды и уайтспирита. Получено, что при  $d_{\varepsilon, \delta} = 40$  мкм и  $\gamma = 0.255$  г/см<sup>3</sup> коэффициент проницаемости  $k = 20.3 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup> при фильтрации воды и  $k = 22.4 \cdot 10^{-6}$  см<sup>2</sup> при фильтрации уайтспирита.

Видно, что влияние гидрофобности на водопроницаемость фильтра из ВПП при  $d_{\varepsilon, \delta} > 40$  мкм незначительное и может не учитываться при расчете фильтра.

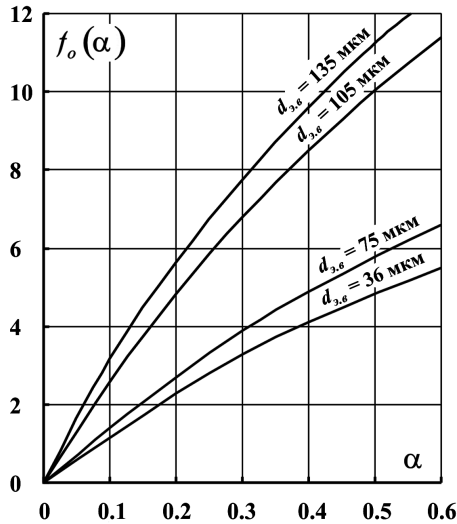


Рис. 1. Зависимость  $f^o(\alpha) = f(\alpha)$  для полиэтиленового холста

### 3. ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА ФИЛЬТРА ИЗ ВПП

Фильтр из ВПП при строительстве дренажа может применяться как самостоятельно, так и в сочетании с фильтрующей песчано-гравийной обсыпкой. При этом фильтр должен обеспечить контактную устойчивость и защитить дренаж от заиливания. Существующие методы расчета основаны на идее геометрической непроницаемости расчетной частицы грунта через расчетную пору фильтра с учетом сводообразования или без него. В действительности, несвязный грунт состоит из частиц различного диаметра и характеризуется кривой гранулометрического состава, а фильтр из ВПП – кривой распределения пор по диаметру. Поэтому в образовании устойчивого контакта принимают участие все частицы грунта или обсыпки и все поры фильтра. Этот процесс можно представить как случайный следующим образом. Грунт состоит из бесконечного количества слоев. Каждый слой одинаковой толщины (например,  $d_{50}$ ) имеет одинаковый гранулометрический состав. Из первого слоя, который лежит на фильтре, часть грунта просыпается через фильтр, а другая часть перекрывает поры фильтра. В результате образуется новый фильтр, через который могут проникать частицы второго слоя. И так до  $n$ -го слоя грунта, пока не прекратится просыпание грунта, и образуется устойчивый контакт. Математически этот процесс можно описать так.

*Первый слой грунта.* Относительная вероят-

ность того, что частица диаметром  $d_k$  проникает через фильтр, будет:

$$P'_k = P_{k, zp} \sum_k^j P_{\phi}. \quad (2)$$

Уравнение (2) имеет следующий физический смысл: частица диаметром  $d_k$  проникает через фильтр, если она попадет на пору фильтра диаметром  $d_k^o \geq d_k$ .

Свободных пор больше или равных  $d_k^o$  в фильтре остается

$$P_{k, \phi} \sum_1^k P_{zp} + P_{k+1, \phi} \sum_1^{k+1} P_{zp} + P_{k+2, \phi} \sum_1^{k+2} P_{zp} + \dots + P_{j, \phi} \sum_1^i P_{zp}.$$

В этом уравнении  $P_{k, \phi} \sum_1^k P_{zp}$  означает, что пора диаметром  $d_k^o$  остается свободной, если на нее попадут частицы меньше или равные  $d_k$ .

*Второй слой грунта.*

$$P'_{k, 2} = P_{k, zp} \left( P_{k, \phi} \sum_1^k P_{zp} + P_{k+1, \phi} \sum_1^{k+1} P_{zp} + \dots + P_{j, \phi} \sum_1^i P_{zp} \right).$$

Свободных пор больше или равных  $d_k^o$  в фильтре остается

$$P_{k, \phi} \left( \sum_1^k P_{zp} \right)^2 + P_{k+1, \phi} \left( \sum_1^{k+1} P_{zp} \right)^2 + \dots + P_{j, \phi} \left( \sum_1^i P_{zp} \right)^2.$$

И так далее.

Относительная вероятность проникновения частиц грунта диаметром  $d_k$  из всех  $n$  слоев будет

$$P'_k = P'_{k, 1} + P'_{k, 2} + \dots + P'_{k, n}.$$

$$P'_k = P_{k, zp} \left\{ \frac{P_{k, \phi} \left[ 1 - \left( \sum_1^k P_{zp} \right)^n \right]}{1 - \sum_1^k P_{zp}} \right\} +$$

$$\left. \begin{aligned} &+ \frac{P_{k+1, \phi} \left[ 1 - \left( \sum_1^{k+1} P_{zp} \right)^n \right]}{1 - \sum_1^{k+1} P_{zp}} + \dots + P_{j, \phi} \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Если фильтр однородный в виде сетки с одинаковыми ячейками диаметром  $d_{\phi}^o$ , тогда будет:

$$P'_k = \frac{P_{k, zp} \left[ 1 - \left( \sum_1^{d=d_{\phi}^o} P_{zp} \right)^n \right]}{1 - \sum_1^{d=d_{\phi}^o} P_{zp}}. \quad (4)$$

Если фильтр разнородный, а грунт однородный, то

$$P'_k = \sum_k^j P_{\phi}. \quad (5)$$

Приведенные выше формулы получены без учета эффекта сводообразования. Чтобы учесть сводообразование, необходимо уменьшить размер пор или увеличить диаметр частиц на коэффициент сводообразования.

Зависимость (5) позволяет определить распределение площади пор фильтра по диаметру следующим образом. Если принять, что  $P_{\phi}$  означает вероятность площади пор по диаметру, то грунт, насыпанный тонким слоем на фильтр, просыпется с площади  $\omega \sum_k^j P_{\phi}$ , где  $\omega$  – площадь фильтра. Поэтому можно записать:

$$\frac{g_k}{g_o} = \sum_k^j P_{\phi},$$

где  $g_k$  – масса просыпавшегося грунта,  $g_o$  – масса навески грунта. Нетрудно видеть, что, изменяя диаметр частиц от такого, когда не просыпется ни одной частицы, до такого, когда просыпется весь грунт, можно получить распределение площади пор по диаметру.

Для проверки этого метода были проведены опыты со специальными сетками, для которых распределение площади пор по диаметру определяли после обработки фотографий, а диаметр пор находили по диаметру вписанного круга [15]. В качестве грунта использовали калиброванные частицы грунта. Ограничением этого метода является минимальный размер калиброванных частиц 50 мкм, которые можно использовать в опыте.

Зависимость (4) позволяет определить гранулометрический состав грунта, просыпавшегося через сетку с одинаковыми ячейками. Проведенные расчеты показали, что при расчете по (4) необходимо учитывать, что просыпание из первого слоя происходит без образования сводиков, а из остальных – с их образованием. Эту особенность необходимо учитывать и при просыпании неоднородного грунта через фильтр с неодинаковыми ячейками по зависимости (3).

Приведенные зависимости позволяют определить количество грунта, проникающего в дренажную трубу, и оценить возможность использования фильтра с точки зрения заиливания трубы. На рис. 2 приведена зависимость  $G_{np}/G_o = f(n)$ , где  $n$  – количество условных слоев грунта толщиной  $d_{50}$ . Видно, что основное количество грунта просыпается из контактных слоев и очень быстро убывает с увеличением  $n$ . Для несuffозионных грунтов в приконтактной зоне четко проявляется эффект образования естественного обратного фильтра.

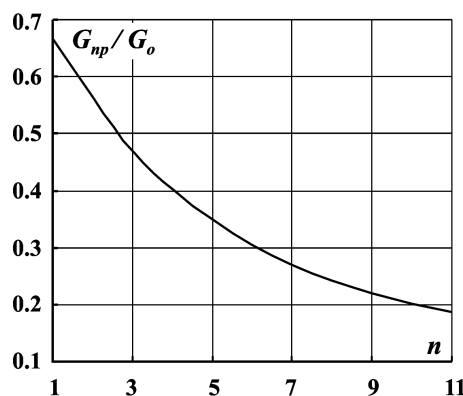


Рис. 2. Зависимость  $G_{np}/G_o = f(n)$

На рис. 3 приведена зависимость  $G_{np}/G_o = f(d^o)$ , из которой видно, что с увеличением диаметра пор количество просыпавшегося грунта сначала медленно, а затем резко возрастает. Это позволяет говорить о том, что если фильтр имеет такие параметры, что  $G_{np}/G_o$  лежит на начальном пологом участке, то количество грунта, проникшего в трубу, будет незначительным и такой фильтр можно применять для защиты дренажа.

В [2] приведена методика расчета фильтра при заданном грансоставе обсыпки или подбор грансостава обсыпки, если известны характеристики фильтра. Приведены примеры расчетов для фильтра из ВПП при  $d_{э,г} = 100$  мкм.

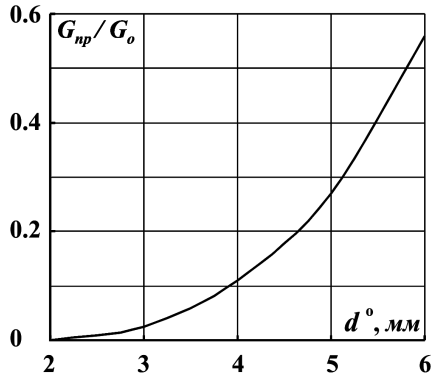


Рис. 3. Зависимость  $G_{np}/G_o = f(d^o)$

#### 4. КОЛЬМАТАЦИЯ ФИЛЬТРА ИЗ ВПП

Водопроницаемость фильтра из ВПП при давлении 0.1 МПа значительно больше водопроницаемости большинства дренируемых грунтов. Однако в зависимости от характеристик фильтра и дренируемого грунта фильтр может подвергаться химической и механической кольматации, что приведет к уменьшению водопроницаемости фильтра и заилению дренажных труб. Химическая кольматация, связанная с физико-химическими процессами, нами не рассматривалась. Механическая кольматация связана с перемещением частиц дренируемого грунта и исследовалась экспериментально.

При дренировании несвязных и малосвязных грунтов трубофильтр может контактировать непосредственно с грунтом, а при дренировании связных грунтов – с обсыпкой из несвязных грунтов, которая устраивается для увеличения водопроницающей способности дренажа.

**Горизонтальный дренаж.** Для горизонтального трубчатого дренажа учитывалось то обстоятельство, что на практике трубофильтр часто укладывается в водонасыщенные и даже разжиженные грунты. В качестве грунтов использовались песок тонкозернистый ( $d_{50} = 0.11$  мм,  $\eta = d_{60}/d_{10} = 2.5$ ,  $K_{\phi} = 2 \div 4$  м/сут) и супесь лессовидная ( $d_{50} = 0.06$  мм,  $\eta = 2.6$ ,  $K_{\phi} = 1$  м/сут).

Кольматация фильтра из ВПП разжиженным тонкозернистым песком исследовалась в фильтрационном лотке при установившемся режиме работы подрусловой дрены-трубофильтра наружным диаметром 125 мм. Исследованы 9 вариантов фильтра при  $d_{э.с} = 67 \div 125$  мкм, толщиной  $\delta = 1 \div 4.73$  мм, плотностью  $\gamma = 248 \div 332$  кг/м<sup>3</sup>, удельный приток к дрене  $q = 5.3 \div 18.2$  л/с на 1 км. В каждом опыте определялось количество

грунта, отложившегося в трубе  $G_1$ , г/м, и фильтре  $G_2$ , г/м, фильтрационное сопротивление дрены  $\Phi = (K_{zp} H)/q$ , фильтрационное сопротивление “идеальной” дрены  $\Phi_o$  и отношении  $\Phi/\Phi_o$ . По результатам опытов построены зависимости  $G_1(G_2) = f\left(\frac{d_{э.с} \gamma_n}{\delta \gamma}\right)$  (см. рис. 4). Отношение  $\Phi/\Phi_o = 0.77 \div 1.14$ , что говорит о незначительном влиянии кольматации на приток к дрене. Из рис. 4 видно, что кривые пересекаются в точке, допустимой с точки зрения защитных свойств фильтра, указанных выше. Учитывая значение параметра  $\frac{d_{э.с} \gamma_n}{\delta \gamma} = 0.24$  в этой точке, можно определить минимальную толщину фильтра. При средних значениях  $d_{э.с} = 100$  мкм,  $\gamma = 300$  кг/м<sup>3</sup> и  $\gamma_n = 950$  кг/м<sup>3</sup> минимальная толщина фильтра составляет 1.32 мм.

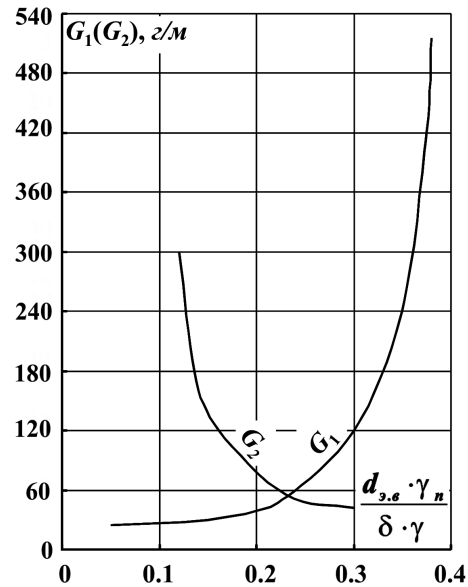


Рис. 4. Зависимости  $G_1(G_2) = f\left(\frac{d_{э.с} \gamma_n}{\delta \gamma}\right)$  для фильтра из полиэтилена при укладке трубофильтров в разжиженный тонкозернистый песок

Кольматация фильтра из ВПП разжиженной лессовидной супесью исследовалась при фильтрации суспензии концентрацией  $C_c = 0.1, 1$  и  $2$ , где  $C_c = T/J$ ;  $T$  – масса сухого грунта;  $J$  – масса чистой воды. Методика исследований и результаты опытов приведены в [2]. Установлено, что при  $C_c = 1$  и  $C_c = 2$  разжиженный грунт не проходит через фильтр, так как на поверхности фильтра практически мгновенно образуется осадок. При  $\delta = 1.3 \div 2$  мм степень кольматации фильтра находится в пределах  $9 \div 12$ . Коэффициент фильтра-

ции закольматированного фильтра составлял около 10 м/сут, что значительно больше коэффициента фильтрации лессовидной супеси. При  $C_c = 0.1$  фильтр кольматруется медленно, при этом значительная часть суспензии проходит через фильтр пока на его поверхности не образуется осадок. Степень кольматации фильтра может быть 100 и более. Поэтому считаем, что трубофильтр с фильтром из ВПП нельзя укладывать в разжиженный грунт в виде пульпы при  $C_c < 1$ .

**Вертикальный дренаж.** Для вертикального дренажа с фильтром из ВПП кольматация исследовалась экспериментально [2]. Особенностью этих исследований является то, что опыты проводились для работы скважины в сложных ( $K_{zp} = 10 \div 30$  м/сут,  $q \geq 3$  л/с на 1 п. м фильтра) и весьма сложных ( $K_{zp} \leq 10$  м/сут,  $q \geq 0.4$  л/с) условиях при установившейся и нестационарной (пуск–остановка насоса) фильтрации. Опыты проведены с мелкозернистым ( $d_{50} = 0.11$  мм,  $\eta = 2.4$ ) и среднезернистым ( $d_{50} = 0.25$  мм,  $\eta = 2$ ) песками. Количество циклов пуск–остановка было не менее 25. Критерием для оценки эффективности работы фильтров из ВПП были приняты защитные свойства сеток квадратного плетения, рекомендованные С.К. Абрамовым [10]. Так, в опытах с мелкозернистым песком исследовались сетки с ячейками  $0.2 \times 0.2$  мм, а в опытах со среднезернистым песком – сетки с ячейками  $0.5 \times 0.5$  мм. В качестве фильтров исследовались образцы из ВПП  $d_{э.б} = 100$  мкм и  $200$  мкм различной толщины  $\delta$  и плотности  $\gamma$ . На рис. 5 приведена зависимость  $G = f\left(\frac{d_{э.б} \gamma n}{\delta \gamma}\right)$ , на которой штриховой линией

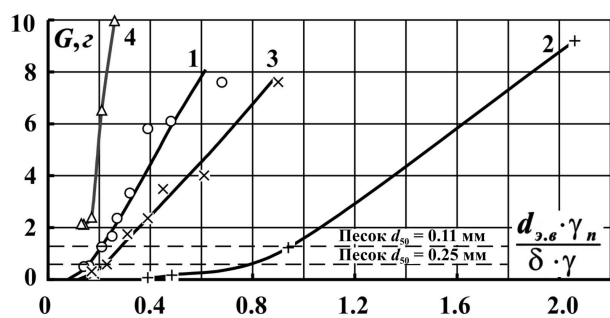


Рис. 5. Результаты исследований защитных свойств фильтров из ВПП:

- 1 –  $d_{э.б} = 100$  мкм (фильтр),  $d_{50} = 0.11$  мм (песок);
- 2 –  $d_{э.б} = 100$  мкм (фильтр),  $d_{50} = 0.25$  мм (песок);
- 3 –  $d_{э.б} = 200$  мкм (фильтр),  $d_{50} = 0.25$  мм (песок);
- 4 –  $d_{э.б} = 200$  мкм (фильтр),  $d_{50} = 0.11$  мм (песок)

показана величина  $G$  для фильтров из сеток  $0.2 \times 0.2$  мм и  $0.5 \times 0.5$  мм. В результате анализа этих зависимостей получены следующие рекомен-

дации:  $d_{э.б} \leq d_{50}$ ; толщина фильтра должна быть  $\delta = (10 \div 30)d_{э.б}$  при плотности  $\gamma = 0.34 \div 0.17$ ;  $d_{cp}^o = (1 \div 1.4)d_{50}$  для крупного и среднезернистого песка и мелкозернистого песка соответственно. При этих условиях фильтр практически не кольматруется, а пескование незначительное и быстро прекращается. На фильтр, структура которого отвечает указанным выше рекомендациям, получено авторское свидетельство [11].

**Лучевой дренаж.** Используя метод пневмоэкструзии, были разработаны новые конструкции дрен на основе перфорированных пластмассовых труб. В табл. 1 приведено описание исследованных конструкций лучевого дренажа. Для сравнения в этой же таблице помещены характеристики трубофильтра ТДПГ–100 ТУ 33 УССР 28-85, который прошел всестороннюю лабораторную и опытно-промышленную проверку при строительстве горизонтального трубчатого дренажа. Исследование кольматации фильтра выполнялось при напорной фильтрации для условий строительства дренажа в г. Харькове. В качестве грунта использовался пылеватый песок ( $d_{50} = 0.12$  мм,  $\eta = 1.8$ ,  $K_{zp} = 5$  м/сут), минимальная скорость фильтрации соответствовала максимальному расчетному притоку к двухъярусной схеме лучевого дренажа для защиты от подтопления одного из жилых домов в Харькове. В результате исследований получено, что степень кольматации фильтра не превышает 1.8 при коэффициенте фильтрации закольматированного фильтра не менее 100 м/сут, что значительно больше коэффициента фильтрации дренируемого грунта.

## 5. ВОДОПРИЕМНАЯ СПОСОБНОСТЬ ДРЕНАЖА С ФИЛЬТРАМИ ИЗ ВПП

**Горизонтальный дренаж.** Приведем результаты исследования дренажа из трубофильтра ТДПГ-100 и конструкций лучевого дренажа. Опыты проводились в фильтрационных лотках при работе дренажа по схеме подрусовой дрены.

При испытании трубофильтра ТДПГ-100 в качестве грунта модели использовали мелкозернистый и среднезернистый пески. Расход на модели устанавливали, исходя из работы глубокого дренажа на мелиоративных системах орошения. Оценка водоприемной способности дрены производилась методом сравнения действительного фильтрационного сопротивления дрены  $\Phi$  с фильтрационным сопротивлением “идеальной” дрены  $\Phi_o$ . Известно, что  $\Phi = \Phi_o + \Sigma \Phi_{дон}$ , где  $\Phi_o$  не зависит от притока к дрене и определяется степенью вскрытия

Табл 1. Характеристики исследованных образцов трубофильтров с бесповным фильтром из напыленного полиэтилена

N обр.	Тип и описание конструкции трубофильтра	$d_{н.тр}$ , мм	$\delta$ , мм	$\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	$n$ , %	$d_{э.б}$ , мм	$d_{ср}^o$ , мм	$K_{ф}$ , м/сут	$\Phi/\Phi_o$
<b>Каркасно-дисковый фильтр (КДФ)</b>									
Соединение секций труб с помощью резьбовых муфт									
1	1 - Перфорированная	125.6	2.80	0.406	57	0.1÷0.2	0.18	259	1.07
2	ПЭ труба $d_n = 90$ мм,	124.6	2.30	0.392	58	0.1÷0.2	0.19	426	
3	наборные диски из пластмассы $\delta = 6$ мм (зазор 0.8 мм), фильтр	125.3	2.66	0.413	57	0.1÷0.2	0.16	289	
<b>Трубофильтр</b>									
Соединение секций труб с помощью резьбовых муфт									
4	2 - Перфорированная ПЭ труба $d_n = 90$ мм, слой из ПЭ сетки $\delta = 1$ мм, фильтр	99.0	3.50	0.260	73	0.1÷0.15	0.30	415	1.22
5	3 - Перфорированная ПЭ труба $d_n = 90$ мм, слой из пластмассовых жгутов $\delta = 4$ мм, фильтр	105.2	3.60	0.180	81	0.11	0.15	1100	1.09
6	4 - Перфорированная ПЭ труба $d_n = 90$ мм, фильтр двухслойный из напыленного ПЭ 1-й слой фильтра 2-й слой фильтра	117.0							
			9.00	0.230	76	0.5÷0.6	0.85	6000	1.03
			4.50	0.280	71	0.125	0.15	570	
7	5 - Перфорированная ПЭ труба $d_n = 110$ мм, слой сетки $\delta = 2.9$ мм из ПВХ нитей $d = 0.7$ мм, фильтр	122.6	3.40	0.180	81	0.110	0.15	1100	1.07
8	6 - Перфорированная ПЭ труба $d_n = 110$ мм, слой сетки $\delta = 3$ мм из ПЭ нитей $d = 0.6$ мм, фильтр	123.0	3.50	0.180	81	0.11	0.15	1100	1.08
<b>ТДПГ-100 ТУ 33 УССР 28-85</b>									
9	7 - Витая гофрированная ПВХ труба $d_n = 116$ мм, фильтр	121.8	2.91	0.189	80	0.08÷0.12	0.13	900	1.00
<i>Примечание: ПЭ – полиэтилен, ПВХ – поливинилхлорид.</i>									

пласта и может быть найдено по известным зависимостям [12] или методом математического моделирования на ЭГДА. Сопротивление  $\Sigma\Phi_{дон}$  зависит от притока к дрене и определяется гидравлическими потерями за счет недостаточной площади перфорации, сопротивления фильтра из ВПП, сопротивления при истечении воды в полость трубы через отверстия, за счет нарушения режима фильтрации в фильтре. Трубофильтр имеет свое-

образную конструкцию: поверхность трубы имеет глухие, нерабочие участки и впадины, перекрытые фильтром. Вода поступает в трубу через зазоры между бесконечной профилирующей лентой, имеющей зубцы. В [2] отмечено, что основные гидравлические потери обусловлены перетеканием воды через зазоры. Результаты экспериментов показали, что  $\Phi/\Phi_o$  при работе дрены в мелкозернистом и среднезернистом песках не превышает 1.05.

При укладке дренажа в связных и малосвязных грунтах необходимо использовать обсыпку из несвязных грунтов. Проведенные нами специальные исследования [2, 14] показали, что при  $K_{об}/K_{зр} > 10$ , где  $K_{об}$  – коэффициент фильтрации материала обсыпки, расчет междренних расстояний можно проводить, определяя  $\Phi_0$  по контуру обсыпки.

**Лучевой дренаж.** Исследование водопринимной способности различных конструкций лучевого дренажа осуществлялось по методике, описанной выше. В качестве грунта модели использовался мелкозернистый песок. В табл. 1 приведены значения  $\Phi/\Phi_0$ , из которых видно, что только трубофильтр тип 2 имеет сравнительно большое фильтрационное сопротивление за счет конструкции дрены ( $\Phi/\Phi_0 = 1.22$ ). Для остальных конструкций дрен-трубофильтров отношение  $\Phi/\Phi_0 = 1.03 \div 1.09$ , что незначительно. Считаем, что наиболее перспективной конструкцией дрены является тип 4 с диаметром полиэтиленовой трубы 110 мм.

**Вертикальный дренаж.** Исследование водопринимной способности вертикального дренажа различных конструкций проводилось экспериментально на установке по схеме фильтрации из напорного пласта [2]. В качестве грунта модели использовались среднезернистый ( $d_{50} = 0.25$  мм,  $\eta = 2$ ) и мелкозернистый ( $d_{50} = 0.11$  мм,  $\eta = 2.4$ ) пески и гравийная обсыпка ( $d_{50} = 3.2$  мм,  $\eta = 2$ ). Несовершенство конструкции дрены определялось отношением  $\Phi/\Phi_0$ .

Были исследованы следующие конструкции дрены.

1. *Опорный каркас из витой поливинилхлоридной трубы (ПВХ)*, наружный диаметр 350 мм, скважность 30 %, защитный фильтр из ВПП ( $d_{э,с} = 300$  мкм,  $\delta = 4.5$  мм,  $\gamma = 290$  кг/м<sup>3</sup>). Обсыпка – гравий, диаметр по контуру обсыпки 430 мм. Грунт модели – песок среднезернистый, удельный приток до 5.4 л/с на 1 п. м. Параметр  $\Phi/\Phi_0 = 1.05 \div 1.13$ , среднее значение  $\Phi/\Phi_0 = 1.08$ .

2. *Опорный каркас из напорной ПВХ трубы*, наружный диаметр 280 мм, скважность 20 %, спиральная навивка из полимерного жгута диаметром 4 мм шагом 8 ÷ 10 мм и защитный фильтр из ВПП. Обсыпка – гравий, диаметр по контуру обсыпки 430 мм. Грунт модели – песок среднезернистый, удельный приток до 5 л/с на 1 п. м. Параметр  $\Phi/\Phi_0 = 1.04 \div 1.05$ , среднее значение  $\Phi/\Phi_0 = 1.04$ .

3. *Опорный каркас из стеклопластиковой фильтровальной трубы*, наружный диаметр 200 мм, защитный фильтр из ВПП. Обсыпка – гравий, диаметр по контуру обсыпки 430 мм. Грунт моде-

ли – песок среднезернистый, удельный приток до 4.8 л/с на 1 п. м. Параметр  $\Phi/\Phi_0 = 1.03 \div 1.05$ , среднее значение  $\Phi/\Phi_0 = 1.04$ .

4. *Фильтр металлический из просечного листа со штампованными щелевыми отверстиями с нависающими козырьками* скважностью 15 % на металлической перфорированной трубе наружным диаметром 280 мм. Обсыпка – гравий, диаметр по контуру обсыпки 430 мм. Грунт модели – песок среднезернистый, удельный приток до 4.2 л/с на 1 п. м. Параметр  $\Phi/\Phi_0 = 1.07 \div 1.14$ , среднее значение  $\Phi/\Phi_0 = 1.11$ .

5. *Фильтр каркасно-стержневой с проволочной обмоткой* скважностью 55 %, наружный диаметр 260 мм. Обсыпка – гравий, диаметр по контуру обсыпки 430 мм. Грунт модели – песок среднезернистый, удельный приток до 5.5 л/с на 1 п. м. Среднее значение  $\Phi/\Phi_0 = 1.04$ .

6. *Фильтр из стеклопластиковой фильтровальной трубы*, наружный диаметр 200 мм. Обсыпка – гравий, диаметр по контуру обсыпки 430 мм. Грунт модели – песок среднезернистый, удельный приток до 4.6 л/с на 1 п. м. Параметр  $\Phi/\Phi_0 = 1.03 \div 1.06$ , среднее значение  $\Phi/\Phi_0 = 1.05$ .

7. *Опорный каркас из витой ПВХ трубы*, наружный диаметр 350 мм, скважность 30 %, защитный фильтр из ВПП. Обсыпки нет. Грунт модели – песок среднезернистый, удельный приток до 4.1 л/с на 1 п. м. Параметр  $\Phi/\Phi_0 = 1.03 \div 1.07$ , среднее значение  $\Phi/\Phi_0 = 1.04$ .

8. *Опорный каркас из напорной ПВХ трубы*, наружный диаметр 280 мм, скважность 20 %, спиральная навивка из полимерного жгута диаметром 4 мм шагом 8 ÷ 10 мм и защитный фильтр из ВПП. Обсыпки нет. Грунт модели – песок среднезернистый, удельный приток до 7.1 л/с на 1 п. м. Параметр  $\Phi/\Phi_0 = 1.03$ .

9. *Опорный каркас из витой ПВХ трубы*, наружный диаметр 350 мм, скважность 30 %, защитный фильтр из ВПП ( $d_{э,с} = 150$  мкм,  $\delta = 3.5$  мм,  $\gamma = 270$  кг/м<sup>3</sup>). Обсыпки нет. Грунт модели – песок мелкозернистый, удельный приток до 0.48 л/с на 1 п. м. Параметр  $\Phi/\Phi_0 = 1 \div 1.03$ , среднее значение  $\Phi/\Phi_0 = 1.01$ .

Как видно из приведенных значений параметра  $\Phi/\Phi_0$  наибольшее несовершенство по характеру вскрытия пласта имеет конструкция фильтра N 4 из просечного металлического листа,  $\Phi/\Phi_0 = 1.14$ . Для остальных конструкций  $\Phi/\Phi_0 \leq 1.08$ , что говорит о совершенстве конструкций и хороших защитных свойствах фильтра.



## 6. ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ДРЕНАЖА С ФИЛЬТРАМИ ИЗ ВПП

Разработанная в Институте гидромеханики НАН Украины конструкция трубофилтра ТУ–33 УССР 5–83, созданная на основе гибкой дренажной витой ПВХ трубы НИИСП Госстроя Украины, отличается малым весом, низкой материалоемкостью и простотой стыковки. Указанные трубофилтры изготавливались на одном из комбинатов стеновых материалов и строительных пластмасс.

**Горизонтальный дренаж.** При строительстве трубы соединялись в плети длиной 100÷200 м и на барабане транспортировались к месту укладки. Барабан с дренажной трубой устанавливался на дреноукладчике. Использовались траншейные, узкотраншейные и бестраншейные дреноукладчики. Отрывка траншеи, укладка трубофилтра, устройство фильтрующей обсыпки и обратная засыпка траншеи проводились одновременно. При этом обратная засыпка траншеи выполнялась бульдозером или, для некоторых типов дреноукладчиков, с помощью транспортеров обратной засыпки. На рис. 6 показана укладка дренажа траншейным, а на рис. 7 – бестраншейным дреноукладчиками.



Рис. 6. Укладка дренажа траншейным дреноукладчиком

Применение трубофилтров позволило механизировать процесс строительства дренажа, повысить культуру и качество строительства, получить значительный экономический эффект [16–18].

За период 1966–1977 г. в Украине строительными организациями Министерства мелиорации и водного хозяйства Украины с новыми филтрами было уложено около 7000 км на площади 140 тыс. га глубокого горизонтального трубчатого дренажа в зоне орошаемого земледелия, около

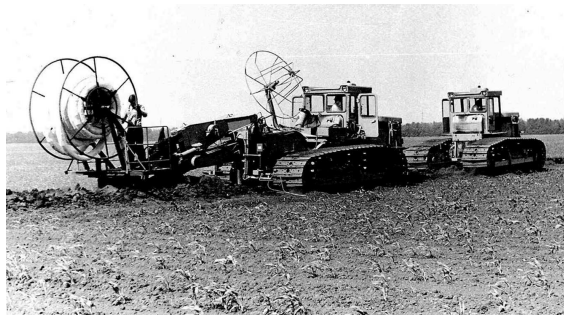


Рис. 7. Укладка дренажа бестраншейным дреноукладчиком

200 тыс. км на площади 300 тыс. га мелкого трубчатого дренажа в зоне избыточного увлажнения, дренировано более 100 населенных пунктов и уложено 50 км приканального дренажа вдоль Краснознаменского и Северо–Крымского магистральных каналов.

**Лучевой дренаж** устраивается из шахтного ствола с помощью установки горизонтального бурения под защитой обсадных труб. Лучевой дренаж состоит из секций трубофилтра длиной 1,4 м, соединенных с помощью резьбовых муфт. В Харькове строительство лучевого дренажа осуществлялось управлением “Спецшахтотоннельремстрой” в 1991 г. Положительный опыт внедрения новой конструкции лучевого дренажа нашел свое продолжение. Сейчас в Харькове имеется организация, которая, используя результаты наших работ, усовершенствовала конструкцию и способ строительства лучевого дренажа.

**Вертикальный дренаж** с использованием защитного филтра из ВПП устраивается в соответствии с ТУ 88 УССР 541735.1.1–91, разработанными в Институте гидромеханики НАН Украины [2, 13]. Филтры из ВПП можно применять в скважинах, пробуренных роторным способом с обратной промывкой чистой водой. При этом технология устройства и опробования скважины не отличается от традиционной.

Проверка эффективности работы филтров новой конструкции проводилась в нескольких регионах Украины. Данные о работе некоторых из построенных скважин с водоприимным слоем из защитно-филтрующего полиэтиленового материала (ЗФПМ), приведены в табл. 2. Скважины в с. Железный Порт, совхоз “Приморский” и “Вільна Українка” Голопристанского р-на Херсонской обл. каптировали воду с минерализацией до 30 г/л при рН = 7,6÷7,8. Наблюдения в течение 3–4 лет показали, что скважины работают стабильно, умень-

Табл 2. Данные о скважинах с водопримным слоем из ЗФПМ

N скв.	Место и год строительства	Глубина, м	Конструкция водопримной части	Длина фильтра, м	Дебит при строит. откачках	
					Удельный (на 1 м понижения), л/с	Общий, л/с
62	Противофильтрационная завеса, г. Никополь, 1986 г.	19.7	Фильтровые каркасы из витой ПВХ трубы, $d = 280$ мм, ЗФПМ II типа	6.0	1.4	6.9
153	Противофильтрационная завеса, п. Каменка-Днепровская Запорожской обл., 1987 г.	31.5	Каркасно-проволочный, $d = 219$ мм, ЗФПМ II типа	9.0	3.5	14.0
4	Защита от подтопления, с. Железный Порт Голопристанского р-на Херсонской обл., 1988 г.	63.0	Каркасно-проволочный, $d = 375$ мм, ЗФПМ III типа	15.6	2.0	36.0
1	Защита от подтопления, с-з "Приморский", Голопристанского р-на Херсонской обл., 1989 г.	51.0	Перфорированные ПВХ трубы $d = 280$ мм, ЗФПМ III типа	16.5	4.8	58.0
1	Защита от подтопления, с. Вільна Українка Голопристанского р-на Херсонской обл., 1989 г.	50.0	То же	16.5	2.8	57.0

шение дебита незначительное.

## 7. БЕЗРЕАГЕНТНАЯ И КОНТАКТНАЯ РЕАГЕНТНАЯ ОЧИСТКА ВОДЫ ФИЛЬТРАМИ ИЗ ВПП

В 2001–2006 гг. были проведены экспериментальные исследования осветления воды, замутненной механическими частицами диаметром не более 10 мкм при концентрации не более 600 мг/л, фильтром из ВПП при безреагентной и контактной реагентной очистке. Показано, что очистка воды до  $2 \div 3$  мг/л фильтрами из ВПП возможна не хуже, чем фильтрами из песка или пенополистирола (ППС). При этом, при равных условиях, продолжительность фильтроцикла и грязеемкость при использовании фильтров из ВПП больше. Разработан также метод регенерации фильтра без нарушения структуры фильтра. Приводим основные результаты исследований, опубликованные в [3, 21].

### 7.1. Экспериментальная установка и методика исследований

На рис. 8 показана схема экспериментальной установки. В режиме осветления установка работала следующим образом. Суспензия определенной мутности из бака 1 по трубопроводу 6 подавалась в напорный бачок 7. Из напорного бачка она попадала в воздухоотделитель (регулятор скорости) 8, который позволяет поддерживать постоянную в течение всего опыта скорость фильтрации. Расход суспензии из напорного бачка регулировался вентилем и устанавливался постоянным для каждого опыта. Из регулятора скорости суспензия подавалась на фильтрующую загрузку 14 и осветлялась.

При контактной реагентной очистке в исходную воду с помощью дозирующего устройства 3 вводился раствор коагулянта, как показано на схеме (см. рис. 8). В качестве коагулянта использовался сернокислый алюминий  $Al_2(SO_4)_3$ .

Фильтрационный прибор 10 выполнен из оргстекла в виде цилиндра диаметром 140 мм и высотой

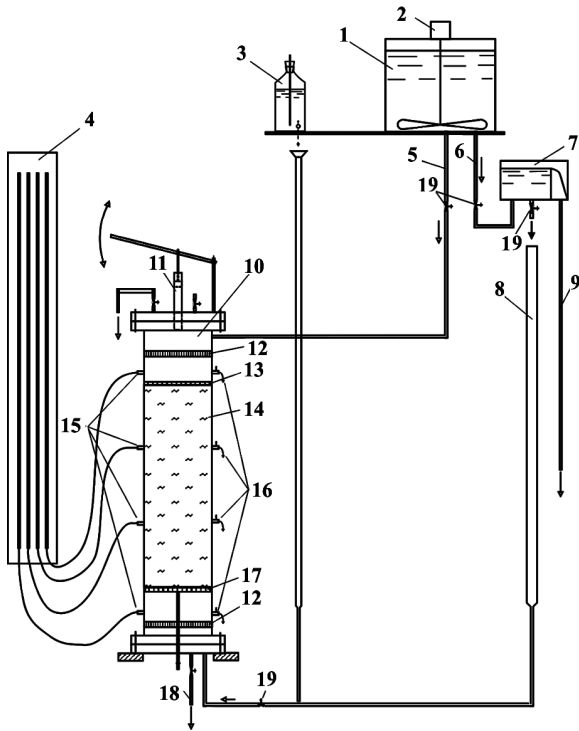


Рис. 8. Схема экспериментальной установки

рабочей части 600 мм, оборудован пьезометрами 15 и местами для отбора проб суспензии 16, опорной сеткой 13 и 17 с прижимным устройством, решеткой 12 для выравнивания потока при обратной промывке и устройством для интенсификации промывки 11.

При безреагентной очистке использовались фильтры толщиной 30 см из ВПП ( $d_{э.с} = 50 \div 125$  мкм,  $n = 0.75 \div 0.82$ ), из песка ( $d_{э.с} = 0.45$  мм,  $n = 0.36$ ) и из ППС ( $d = 0.4 \div 2$  мм,  $n = 0.36 \div 0.42$ ). Фильтр из ВПП состоял из элементарных слоев толщиной 2–3 мм. Скорость фильтрования –  $V = 0.75; 1.5$  и  $3.0$  м/ч, направление фильтрации – сверху вниз и снизу вверх. Начальная концентрация суспензии –  $C = 47 \div 640$  мг/л.

При контактной реагентной очистке использовались фильтры толщиной 30 см из ВПП ( $d_{э.с} = 100 \div 140$  мкм,  $n = 0.77$ ) и из ППС ( $d = 0.4 \div 2$  мм,  $n = 0.36$ ). Скорость фильтрования –  $V = 3; 5$  и  $8$  м/ч, направление фильтрации – снизу вверх. Начальная концентрация суспензии –  $C_o = 55 \div 196$  мг/л,  $C_p = 20 \div 40$  мг/л и  $C_{o,p} = C_o + C_p = 75 \div 236$  мг/л.

При проведении опыта фиксировали концентрацию суспензии после фильтра  $C_\phi$  и напор  $H$  в определенные моменты времени  $t$  и строили зависимость  $C_\phi = f(t)$  и  $H = f(t)$ . При последующей

обработке результатов опытов определяли коэффициент массового заиления фильтра  $\sigma_w$ , отнесенный к единице объема пор фильтра за единицу времени, и приведенный коэффициент заиления  $\sigma''_w$ , коэффициент фильтрации заиленного фильтра  $K_{\phi.з}$  и безразмерное время  $T$ :

$$\sigma_w = \frac{V \Delta C}{\delta n},$$

$$\sigma''_w = \frac{\sigma_w \delta}{C_o V} = \frac{\Delta C}{C_o} \quad \text{или} \quad \sigma''_w = \frac{\Delta C}{C_{o,p}},$$

$$K_{\phi.з} = \frac{V \delta}{H}, \quad (6)$$

$$T = \frac{t}{t_o},$$

где  $\Delta C = C_\phi - C_o$  или  $\Delta C = C_\phi - C_{o,p}$ ;  $V$  – скорость фильтрования;  $\delta$  – толщина фильтра;  $n$  – пористость чистого фильтра;  $t_o = \delta/V$  – время, за которое условный фронт суспензии проходит фильтр толщиной  $\delta$ . Параметр  $\sigma''_w$  определяет степень очистки суспензии.

В отношении безразмерного времени  $T$  следует отметить, что  $T$  можно представить как отношение объема профильтровавшей суспензии за время  $t$  к объему фильтра. Физически это верно, так как заиление фильтра определяет не время, а объем осветленной суспензии.

Анализ графиков  $\sigma''_w - t$  и  $G - t$  позволяет выделить в одних опытах довольно точно, а в других – с некоторым допущением три, обычных в таких случаях, периода работы фильтра: период “зарядки” фильтра  $t_1$ , когда  $\Delta C$  возрастает от 0 до некоторого значения; период  $t_1 \div t_2$ , когда  $\Delta C \approx \text{const}$ ,  $\sigma''_w \approx \text{const}$ ; период  $t > t_2$ , когда  $\sigma''_w$  уменьшается, а  $C_\phi$  возрастает.

Во всех опытах период “зарядки” фильтра очень короткий, а накопление осадка в фильтре  $G_{кр.1}$  незначительное. Период  $t_1 \div t_2$  является основным рабочим периодом работы фильтра, а накопление осадка к концу периода  $G_{кр.2}$  определяет грязеемкость фильтра.

При  $G_{кр.1} \ll G_{кр.2}$  и  $t_1 \ll t_2$  значение  $t_2$  можно определить по зависимости

$$t_2 = \frac{G_{кр.2} \delta n}{\sigma''_w C_o V} \quad \text{или} \quad t_2 = \frac{G_{кр.2} \delta n}{\sigma''_w C_{o,p} V}. \quad (7)$$

В зависимости (7) при  $\delta = \text{const}$ ,  $n = \text{const}$  и  $V = \text{const}$  неизвестными величинами являются  $\sigma''_w$  и  $G_{кр.2}$ . На рис. 9 приведены экспериментальные

зависимости  $\sigma''_w = f(T^*)$ , где параметр  $T^*$  определен при  $t = 1$ , для безреагентной и реагентной очистки. Видно, что использование реагента существенно влияет на эффективность работы фильтра.

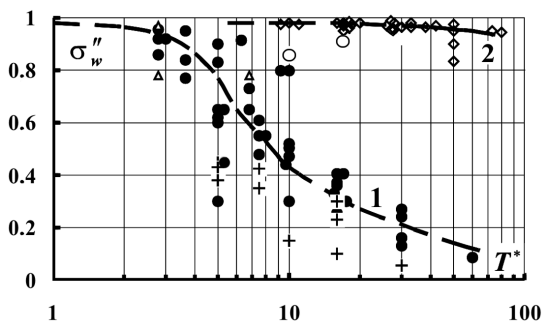


Рис. 9. Экспериментальные зависимости  $\sigma''_w - T^*$  при фильтровании суспензии через фильтр из ВПП, песка и ППС:  
 1 – безреагентная очистка  
 • – ВПП  $d_{э.с} = 100 \div 125$  мкм,  $\Delta$  – песок  $d_{э.с} = 0.45$  мм,  
 + – ППС  $d = 0.4 \div 2$  мм;  
 2 – контактная реагентная очистка  
 $\diamond$  – ВПП  $d_{э.с} = 100 \div 140$  мкм,  $\circ$  – ППС  $d = 0.4 \div 2$  мм

Отметим также, что при обезжелезивании подземных вод по способу упрощенной аэрации фильтрами из ВПП и ППС зависимость  $\sigma''_w = f(T^*)$  практически совпадает с зависимостью при реагентной очистке. Однако при этом период “зарядки” фильтра  $t_1$  значительный и по величине близок к времени полезной работы фильтра ( $t_1 \approx t_2 - t_1$ ), что значительно усложняет работу очистной установки.

Степень очистки  $\sigma''_w$  должна быть не менее допустимой  $[\sigma''_w]$ :

$$[\sigma''_w] = \frac{C_o - \text{ПДК}}{C_o} \quad \text{или} \quad [\sigma''_w] = \frac{C_{o,p} - \text{ПДК}}{C_{o,p}},$$

где ПДК = 3 мг/л при очистке воды, замутненной минеральными частицами, и ПДК = 0.3 мг/л при обезжелезивании воды (ПДК – предельная допустимая концентрация).

Значение  $G_{кр.2}$  при прогнозных расчетах фильтра из ВПП приведены в табл. 3.

Напор на фильтр при  $G_{кр.2}$  определяем по зависимости (6), где  $K_{ф.з}$  приведены в табл. 3.

**Регенерация фильтра.** Экспериментально установлено, что фильтр из ВПП можно регенерировать, не нарушая его структуру, способом обратной промывки при фильтрации сверху вниз. Промывочная скорость фильтрации должна быть  $(20 \div 30)V$ . Для интенсификации промывки установившийся фильтрационный поток с помощью специального устройства на крышке прибора (см.

Табл 3. Фильтр из ВПП  $d_{э.с} = 100 \div 150$  мкм,  $n = 0.75 \div 0.82$ ,  $\delta = 20 \div 40$  см

$T^*$	$\sigma''_w$	$G_{кр.2}$ , мг/см <sup>3</sup>	$K_{ф.з}$ , см/с
<b>Безреагентная очистка</b>			
$V = 0.75 \div 3$ м/ч, $C_o = 100 \div 200$ мг/л			
2.5	0.95	80	0.025
5.0	0.77	55	0.030
10.0	0.43	40	0.040
<b>Контактная реагентная очистка</b>			
$V = 3 \div 8$ м/ч, $C_{o,p} = 130 \div 240$ мг/л			
5	0.985	25	0.07
10	0.981	15	0.12
20	0.978	8	0.22
30	0.975	6	0.26
40	0.970	4	0.35
50	0.968	2.7	0.45

рис. 8) преобразуется в знакопеременный пульсирующий фильтрационный поток. При этом, степень регенерации фильтра при постоянном промывочном расходе может достигать 80 %, а при пульсирующей фильтрации – до 97 % [3].

### 8. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПОРИСТОСТИ И ПЛОТНОСТИ ОСАДКА В ПОРАХ ЗАИЛЕННОГО ФИЛЬТРА

Действительная пористость заиленного фильтра  $n_з$  и плотность осадка в порах зернистых фильтров изучены мало, а в объемных фильтрах из ВПП такие исследования не проводились.

Зная  $n_з$ , можно определить объем заиленного порового пространства фильтра  $W_{ф.з}$ , среднюю скорость в порах  $u$ , концентрацию твердых частиц в осадке  $C_{ос}$ , плотность осадка  $\gamma_{ос}$ , степень заиления пор осадком  $\rho$  по следующим зависимостям:

$$W_{ф.з} = \frac{\pi D^2}{4} \delta (n - n_з),$$

$$u = \frac{V}{n_{a.з}}, \quad C_{ос} = G \frac{n}{n - n_з},$$

$$\gamma_{ос} = \gamma_в + \frac{C_{ос}}{\gamma_m} (\gamma_m - \gamma_в), \quad \rho = \frac{n - n_з}{n},$$

где  $D$  – диаметр фильтра;  $n_{a.з}$  – активная пористость;  $\gamma_в$  и  $\gamma_m$  – плотность воды и твердых частиц суспензии соответственно.

Для определения действительной пористости заиленного фильтра  $n_з$  использовали индикаторный метод [3, 19, 20]. При движении потока

жидкости-индикатора через фильтр со скоростью фильтрации  $V_c < V$  средняя скорость в порах будет  $V_c/n_z$ . Тогда расчетное время прохождения условного фронта суспензии через фильтр толщиной  $\delta$  будет  $t_{расч} = (\delta n_z)/V_c$ , которое может не совпадать с фактическим временем  $t_{факт}$  из-за образования застойных зон за волокнами и в местах дискретного скопления волокон. В этом случае  $t_{факт}/t_{расч} = \beta$ . Тогда получим:

$$n_z = \frac{t_{факт} V_c}{\delta \beta}, \quad (8)$$

где  $t_{факт}$  и  $\beta$  определены экспериментально.

Исследования проводились на установке, схема которой показана на рис. 10.

Фильтрационный прибор представлял собой ци-

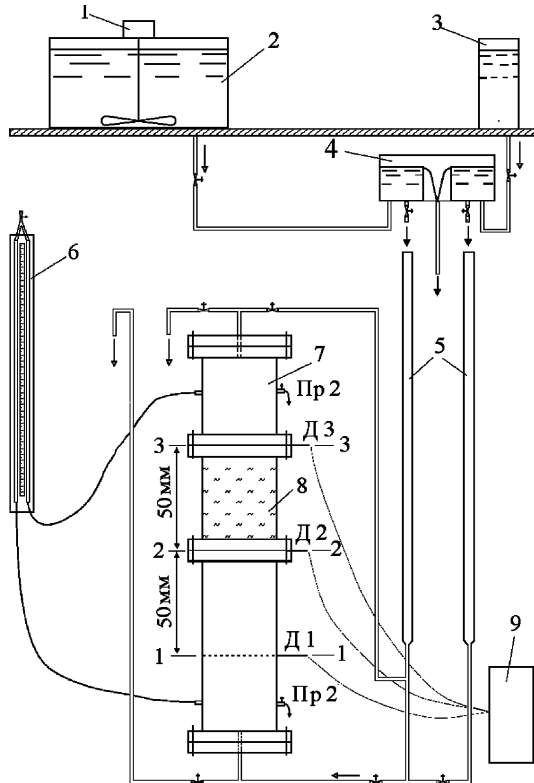


Рис. 10. Схема установки для исследования кинетики и пористости индикаторным методом:

- 1 – мешалка, 2 – емкость для суспензии, 3 – емкость для солевого раствора, 4 – напорный бачок постоянного уровня, 5 – регуляторы скорости, 6 – наклонный дифференциальный микроманометр, 7 – фильтрационный прибор, 8 – фильтрующая загрузка, 9 – быстродействующий самописец Н3031, Д1...Д3 – датчики, П1, П2 – пьезометры, Пр1, Пр2 – пробоборники

линдр из ПВХ трубы с внутренним диаметром 40 мм, оборудованной датчиками Д1, Д2 и Д3, которые представляли собой две параллельные

струны-электрода из нержавеющей стали, пересекающие трубу по диаметру. Расстояние между электродами было 3 мм. Датчики использовали для фиксации концентрации солевого раствора, который применялся в качестве индикатора движения потока жидкости через фильтр. Концентрация солевого раствора (NaCl) составляла 1300 мг/л. Изменение электропроводности суспензии фиксировалось быстродействующим самописцем Н 3031. На рис. 11 показана типичная осциллограмма для опыта 1 с.

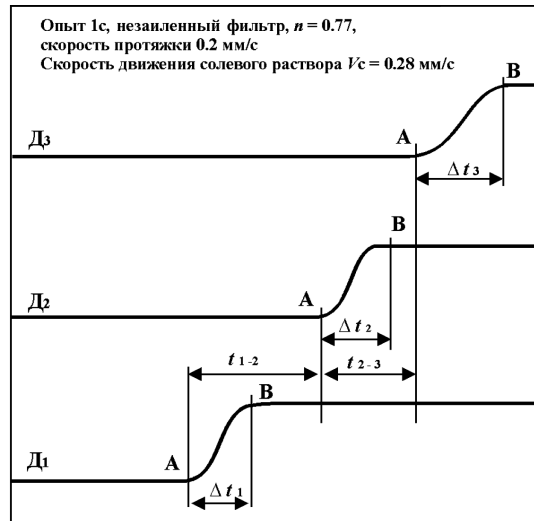


Рис. 11. Образец осциллограммы для опыта 1с

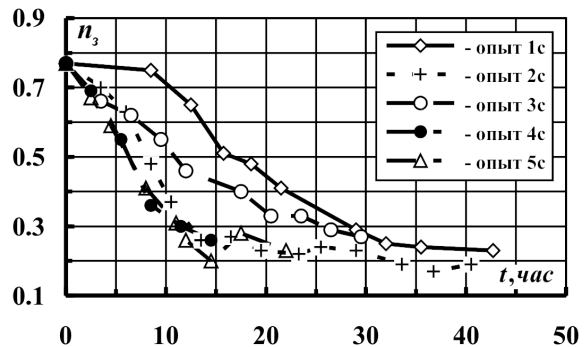


Рис. 12. Экспериментальные зависимости  $n_z - t$  для фильтра из ВПП при безреагентной очистке малоконцентрированной суспензии

Определение  $n_z$  проводилось в процессе опыта по исследованию кинетики фильтрации при безреагентной очистке суспензии при постоянной скорости по формуле (8), где  $t_{факт} = t_{2-3}$  (см. рис. 11),  $\beta = 0.785$ .

Всего было проведено пять опытов с фильтром

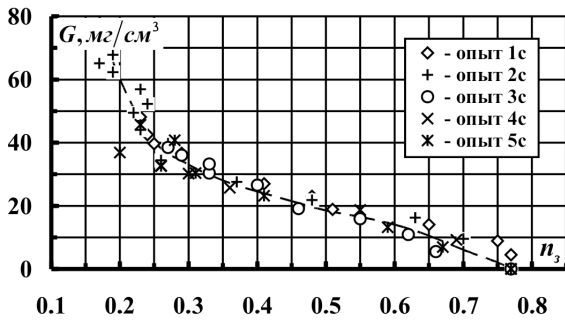


Рис. 13. Экспериментальная зависимость  $G - n_3$  для фильтра из ВПП при безреагентной очистке малоконцентрированной суспензии

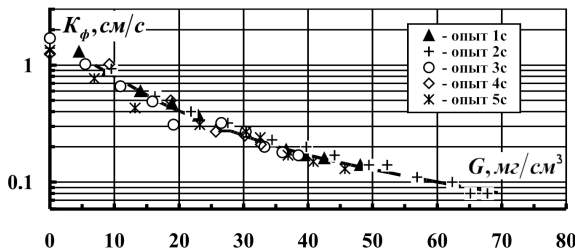


Рис. 14. Экспериментальная зависимость  $K_\phi - n_3$  для фильтра из ВПП при безреагентной очистке малоконцентрированной суспензии

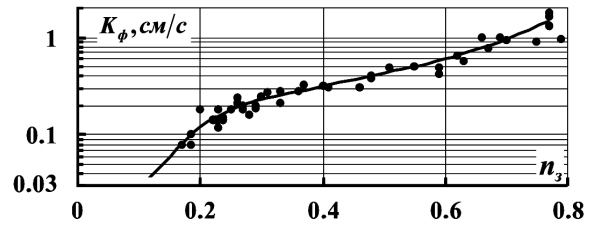


Рис. 15. Экспериментальная зависимость  $K_\phi - n_3$  для фильтра из ВПП при безреагентной очистке малоконцентрированной суспензии

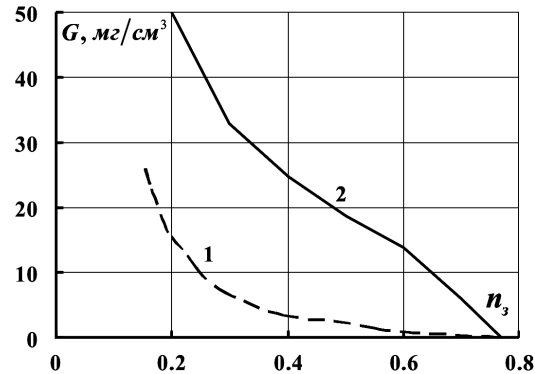


Рис. 16. Экспериментальные зависимости  $G = f(n_3)$  для фильтра из ВПП ( $d_{a,б} = 125$  мкм,  $n = 0.77$ ,  $\delta = 10 \div 30$  мм):  
1 – при контактной реагентной очистке  $C_{o,p} = 135$  мг/л,  $V = 5$  м/час;  
2 – при безреагентной очистке  $C_o = 135$  мг/л,  $V = 5$  м/час

из ВПП ( $d_{a,б} = 125$  мкм,  $n = 0.77$ ,  $\delta = 20$  мм) при  $V = 1.5 \div 3.2$  м/час,  $C_o = 64 \div 210$  мг/л и выполнено 50 измерений  $n_3$ . В результате обработки данных получены экспериментальные зависимости  $n_3 = f(t)$  (см. рис. 12),  $G = f(n_3)$  (см. рис. 13),  $K_\phi = f(G)$  (см. рис. 14) и  $K_\phi = f(n_3)$  (см. рис. 15) при безреагентной очистке.

При контактной реагентной очистке вычисление  $n_3$  индикаторным методом не проводилось. Но если принять, что коэффициент фильтрации заиленного фильтра определяется  $n_3$  и не зависит от способа заиления, то зависимость на рис. 15 можно использовать при анализе опытов при контактной реагентной очистке. На рис. 16 и 17 приведены соответственно экспериментальные зависимости  $G = f(n_3)$  и  $C_{oc} = f(\rho)$  при безреагентной и контактной реагентной очистке. Видно, что при одном и том же значении  $n_3$  или  $\rho$  значения  $G$  и  $C_{oc}$  при контактной реагентной очистке меньше.

Значения  $C_{oc}/C_o$  и  $\gamma_{oc}$  были следующие: при безреагентной очистке  $C_{oc}/C_o = 500 \div 1000$ ,  $\gamma_{oc} = 1.03 \div 1.06$  г/см<sup>3</sup>, при контактной реагентной очистке  $C_{oc}/C_{o,p} = 33 \div 244$ ,  $\gamma_{oc} = 1.003 \div 1.019$  г/см<sup>3</sup>.

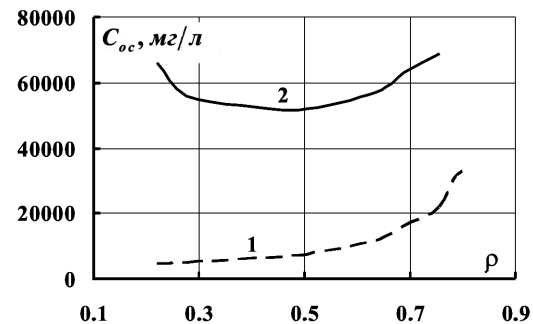


Рис. 17. Экспериментальная зависимость  $C_{oc} = f(\rho)$  для фильтра из ВПП ( $d_{a,б} = 125$  мкм,  $n = 0.77$ ,  $\delta = 10 \div 30$  мм):  
1 – при контактной реагентной очистке  $C_{o,p} = 135$  мг/л,  $V = 5$  м/час;  
2 – при безреагентной очистке  $C_o = 135$  мг/л,  $V = 5$  м/час

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение метода пневмоэкструзии позволяет получить волокнисто-пористые фильтры из полиэтилена (ВПП) или других полимеров, кото-

рые можно использовать для устройства дренажей различного назначения в гидротехническом строительстве. Фильтры из ВПП могут быть изготовлены в виде холстов различной толщины или в виде бесшовного фильтра на дренажной трубе, образуя трубофильтр. Как показали исследования, проведенные в Институте гидромеханики НАН Украины, применение трубофильтров позволяет организовать заводское изготовление трубофильтров, механизировать процесс строительства дренажей, повысить качество и культуру производства, получить значительный экономический эффект.

2. Фильтры из ВПП можно использовать при очистке воды. Эффективность работы таких фильтров несколько лучше, чем зернистых фильтров, применяемых сейчас. При этом регенерация фильтров может быть произведена без нарушения структуры фильтра. Это позволяет создать установки для очистки воды при водоснабжении небольших населенных пунктов или отдельных потребителей.

3. В настоящее время текстильной промышленностью Украины выпускаются геотекстильные материалы из полимерных волокон с высокой прочностью на разрыв. Это позволяет использовать такие материалы в качестве защитных фильтров при строительстве креплений земляных откосов различных гидротехнических сооружений. При этом геотекстиль может работать на растяжение, а само крепление приобретает свойства гибкого крепления. В настоящее время в Институте гидромеханики разработан метод расчета гибкого крепления с использованием геотекстиля [5]. Построено несколько опытно-промышленных участков гибкого крепления с использованием геотекстиля и бетонных блоков, соединенных гибкими связями.

1. Пивовар Н. Г., Бугай Н. Г., Рычко В. А. Дренаж с волокнистыми фильтрами.– К.: Наук. думка, 1980.– 214 с.
2. 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.: Ин-т гидромеханики НАН Украины, 2000.– 332 с.
3. Бугай Н. Г., Кривоног А. И., Кривоног В. В. Безреагентная очистка воды фильтрами из волокнисто-пористого полиэтилена // Прикладна гідромеханіка.– 2004.– 6(78), N 2.– С. 27-43.
4. Бугай Н. Г., Кривоног А. И., Кривоног В. В., Пивовар Н. Г., Фридрихсон В. Л. Гидродинамические, физико-механические характеристики и структурные параметры волокнистых дренажных фильтров // Прикладна гідромеханіка.– 2001.– 3(75), N 3.– С. 5-19.
5. Бугай Н. Г., Кривоног А. И., Кривоног В. В., Фридрихсон В. Л. Гибкие крепления откосов земляных плотин гидротехнических сооружений с использованием геотекстиля // Прикладна гідромеханіка.– 2006.– 8(80), N 1.– С. 3-22.
6. Бугай Н. Г., Канарский В. Ф., Пивовар Н. Г., Осадчук В. А. Устройство обратных фильтров гидротехнических сооружений из минеральных волокнистых материалов // Гидротехническое строительство.– 1971.– N 12.– С. 17-20.
7. Ставрова Т. В., Шустов В. П., Шалобалов О. М., Сапожников Е. Г. Получение полимерных защитно-фильтрующих материалов и покрытия.– В кн: Полимерные материалы и научный прогресс в мелиорации: М., 1980.– 121-124 с.
8. Пивовар Н. Г., Шустов В. П., Бугай Н. Г., Ставрова Т. В., Фридрихсон В. Л. и др. Способ изготовления дренажной трубы // Авт. свид. N 1066120 (СССР).– 1983.– Опубл. 8.09.1983.– С. 5.
9. Пивовар Н. Г., Бугай Н. Г., Фридрихсон В. Л. Трубчатый дренаж из полимерных материалов // Гидротехника и мелиорация.– 1982.– N 4.– С. 48-50.
10. Абрамов С. К., Алексеев В. С. Забор воды из подземного источника.– М.: Колос, 1980.– 239 с.
11. Бугай Н. Г., Кривоног А. И., Пивовар Н. Г., Фридрихсон В. Л. Скважинный фильтр // Авт. свид. N 1530702 (СССР).– 1989.– Опубл. 22.08.1989.– С. 7.
12. Ведерников В. В. Теория фильтрации и ее применение в области ирригации и дренажа.– М.-Л.: Госстройиздат, 1939.– 248 с.
13. Кривоног А. И. Экспериментальные исследования защитных свойств фильтров из волокнисто-пористого полиэтилена // Мелиорация и водное хозяйство.– 1992.– Вып. 77.– С. 54-57.
14. Кривоног (Ткач) В. В. Влияние экранирующего эффекта грунта обратной засыпки дренажных траншей на работу подрусловой дрены // Гидромеханика.– 1983.– Вып. 48.– С. 91-94.
15. Бугай Н. Г., Кривоног (Ткач) В. В. Распределение пор в фильтре, образованном произвольным наложением сеток в два и три слоя // Гидравлика и гидротехника.– 1984.– Вып. 38.– С. 55-59.
16. Мацелюх П. М., Фридрихсон В. Л., Череповский Ю. Т. Осушение земель в условиях западного рельефа // Мелиорация и водное хозяйство.– 1990.– Вып. 73.– С. 22-24.
17. Бугай Н. Г., Пивовар Н. Г., Дадиани М. К. и др. Опыт строительства безтраншейного дренажа в Киевской области // Мелиорация и водное хозяйство.– 1990.– Вып. 73.– С. 66-70.
18. Кубишкін В. П., Мацелюх П. М., Фридрихсон В. Л. Застосування безтраншейного способу будівництва дренажу в гумідній зоні України // Меліорація і водне господарство.– 1997.– Вып. 84.– С. 60-67.
19. Мельцер В. З. Изменение геометрических и гидравлических характеристик зернистой пористой среды при ее заилении // Научн. труды АКХ. - М.: ОНТИ АКХ. - 1970.– Вып. 76, N 7.– С. 23-25.
20. Мельцер В. З. Исследование пористости зернистых фильтрующих материалов // Научн. труды АКХ. - М.: Водоснабжение.– 1973.– Вып. 98.– С. 97-99.
21. Бугай Н. Г., Кривоног А. И., Кривоног В. В. Контактная реагентная очистка воды фильтрами из волокнисто-пористого полиэтилена // Прикладна гідромеханіка.– 2007.– 9(81), N 1.– С. 3-17.