

УДК 502/504:532.5:626/627

К. Д. КОЗЛОВ, А. П. ГУРЬЕВ, Н. В. ХАНОВ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева»
Институт природообустройства имени А. Н. Костякова

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКРЫТИЯ ИЗ ГЕОКОМПОЗИТНОГО МАТЕРИАЛА

Проведены комплексные гидравлические исследования на физической модели с параметрами потока, соответствующими натурным условиям работы, следующих основных характеристик: кинематических характеристик потока воды; гидравлического сопротивления материала исследования; предельных средних скоростей, при которых нарушается устойчивость крепления материала геомата; распределения гидродинамического давления, в том числе результирующих пульсационных составляющих на нижней поверхности ковра; фильтрационных характеристик противоэрозионного материала.

Геомат, гидравлический лоток, канал, уклон дна, заложение откоса, сечение канала, трубка Пито, профили и изолинии скоростей, рабочий участок канала, гидравлические сопротивления, коэффициент гидравлического трения λ , коэффициент шероховатости n , коэффициент Шези C , предельные средние скорости, стыковка ковра геомата, гидродинамическое давление, датчики пульсаций давления, фильтрационные характеристики материала.

Complex hydraulic studies have been carried out on a physical model with the flow parameters corresponding to the natural conditions of work of the following basic characteristics: kinematic characteristics of water flow; hydraulic resistance of the researched material; maximum average speeds under which the geomat material stability is broken; distribution of the hydraulic pressure including resulting pulsation components on the carpet low surface; filtration characteristics of erosion-preventive material.

Geomat, hydraulic flume, canal, bottom slope, rate of slope, water section of canal, Pitot tube, profiles and isolines of speeds, working part of canal, hydraulic resistances, hydraulic friction ratio λ , roughness factor n , Chezy friction factor, maximum average speeds, joint of geomat carpet, hydrodynamic pressure, sensors of pressure pulsations, filtration characteristics of material.

Актуальность проведенных исследований фрагмента канала с покрытием из геокомпозитного материала геомат «Энкамат А20» состояла в получении недостающих данных для гидравлического расчета водопропускных сооружений с подобной противоэрозионной защитой и диапазона их устойчивой безопасной работы.

Исследования проводились в гидравлическом лотке с переменным уклоном длиной 8643 мм. Начальный участок лотка длиной 1800 мм выполнен неподвижным с горизонтальным дном, а остальной участок длиной 6843 – с возможностью изменения уклона дна. Максимальный уклон дна лотка, который можно было установить, составлял $i_{\text{макс}} = 0,053$. Этот уклон позволял получить в лабораторных условиях среднюю

скорость потока, достигающую $v_{\text{макс}} = 2,6$ м/с.

Изучение коэффициентов гидравлического трения λ и коэффициента шероховатости n выполнено на контрольном участке, стенки и дно которого покрывались геоматом марки «Энкамат А20» (рис. 1). Длина этого участка с исследуемым материалом составила 4,3 м. Перед рабочим участком и после него на длине порядка по 2,0 м по периметру сечения уложена армирующая сетка геомата без щебня с целью обеспечить более быстрый переход кинематической структуры потока, выходящего из приемного бака, к структуре, формирующейся при движении по геомату в бытовых условиях, и препятствовать ее метаморфозе в конце лотка. Основные исследования проведены в лотке с прямоугольным поперечным сечением при разных расходах и уклонах лотка (рис. 2).



Рис. 1. Контрольный участок

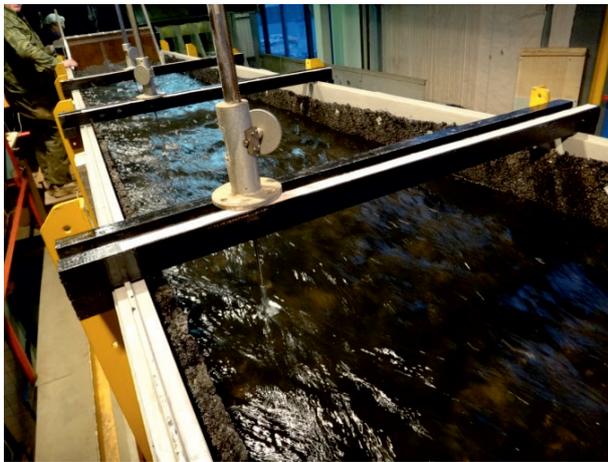


Рис. 2. Лоток с прямоугольным поперечным сечением

Измерение кинематических характеристик потока выполнено в пятимерных створах по длине контрольного участка: на его границах

и в трех промежуточных сечениях. В каждом сечении измерения скоростей выполнялись на 11 вертикалях, расположенных на расстояниях 20, 90, 160, 230, 300, 370, 440, 510, 580, 650, и 710 мм от правой стенки лотка. На каждой вертикали измерения скоростей выполнялись в 6 точках по высоте. По данным измерений были построены графики изменения местных скоростей U на вертикалях, после чего выполнена аппроксимация этих значений.

Числа Рейнольдса, посчитанные по гидравлическому радиусу, достигали величин $Re_R = 150000...220000$, максимальные расходы $Q = 206$ л/с. За счет неровностей поверхности ковры геомата на вертикальных стенках лотка на поверхности потока формировалась система косых поверхностных волн. Траектории волн в плановом и высотном направлениях имели неустойчивый характер. Колебания гребней косых волн в вертикальной плоскости достигали 15 % глубины потока, что снижало точность определения глубин потока до 7...10 %. Для снижения влияния этих колебаний было назначено 11 мерных вертикалей, что позволило снизить возможную ошибку измерения глубин до 3...5 %. Подтверждению этому является сходимость значений расходов в мерных створах, полученных расчетным путем с использованием эпюр скоростей.

Дальнейшая обработка результатов исследований выполнена с использованием аппроксимирующих зависимостей (табл. 1).

Таблица 1

Результаты обработки измерения кинематических характеристик потока

Створ	1	2	3	4	5
X , дм	210	307	407	505	623
Q_v , л/с	208,9	206,9	206,3	205,7	205,7
H , дм	1,547	1,318	1,285	1,195	1,184
v , дм/с	18,443	21,16	22,29	23,5	23,72
Глубина потока, приведенная к расходу $Q_{cp} = 206,32$ л/с, h' , дм	1,528	1,332	1,248	1,199	1,188
Коэффициент Кориолиса α	1,103	1,044	1,043	1,058	1,084
Удельная энергия сечения e , дм	3,442	3,749	3,971	4,179	4,289
Полная энергия E , дм	5,702	5,494	5,185	4,874	4,289
ΔE	–	0,208	0,309	0,311	0,585
Гидравлический радиус R , дм	1,094	0,962	0,866	0,888	0,885
Гидравлический уклон J	–	0,0214	0,0309	0,0317	0,0447

Данные таблицы 1 позволяют вычислить коэффициенты шероховатости n по формулам:

$$n_{Т-К} = \frac{23 \cdot R \cdot \sqrt{J} - v \cdot \sqrt{R}}{46 \cdot v} + \sqrt{\left(\frac{23 \cdot R \cdot \sqrt{J} - v \cdot \sqrt{R}}{46 \cdot v} \right)^2 + \frac{R \cdot \sqrt{J}}{23 \cdot v}} = 0; \quad (1)$$

$$n_M = \frac{R^{2/3} \cdot \sqrt{J}}{v}; \quad (2)$$

$$n_{II} = \frac{R^{0,37+2,5 \cdot \sqrt{n} - 0,75 \cdot \sqrt{R} \cdot (\sqrt{n} - 0,1)}}{v} \cdot \sqrt{J} \quad (3)$$

на основании зависимостей Гангиле-Куттера, Маннинга и Н. Н. Павловского с использованием зависимости $y = 2,5 \cdot \sqrt{n} - 0,13 - 0,75 \cdot \sqrt{R} \cdot (\sqrt{n} - 0,1)$ [1]. Коэффициенты шероховатости были вычислены не только для участков между соседними мерными створами, но и для сочетания створов, что позволило получить более широкую информацию о значении коэффициентов шероховатости Шези.

После обработки данных для гидравлических расчетов каналов с покрытием из «Энкамата А20», можно рекомендовать значение $n = 0,0168$, полученное при использовании формулы Маннинга, впредь до накопления более обширных экспериментальных и натурных данных.

Одной из основных практических задач, возникающих при строительстве каналов с покрытием «Энкамата А20» является вопрос устойчивости материала при гидродинамическом воздействии на него потока. Опасность заключается в том, что при проникновении под ковер скоростного напора потока через стыки возможен отрыв ковра и резкое увеличение лобового сопротивления, под действием которого ковер будет сворачиваться в рулон и уноситься потоком вниз по течению. При измерении скоростей потока этому вопросу было уделено особое внимание. Для получения значения донной скорости трубка Пито устанавливалась на дно.

При удельном весе геомата «Энкамат А20» на воздухе $\rho \cdot g = 1,16 \text{ кгС/дм}^3$, в воде, с учетом взвешивающего действия воды, удельный вес составит $1,16 \dots 1 = 0,16 \text{ кгС/дм}^3$. Давление на горизонтальную поверхность $p_{взв} = 0,22 \cdot 0,16 = 0,0352 \text{ кгС/дм}^2$. Такое гидродинамическое давле-

ние развивает поток, имеющий скорость

$$v = \sqrt{2g \cdot \frac{p_{взв}}{\gamma_B}} = 14 \cdot \sqrt{0,0352} = 2,62 \text{ дм/с} = 0,262 \text{ м/с}. \quad (4)$$

При измерении скоростей потока этому вопросу было уделено особое внимание. Для получения значения донной скорости трубку Пито устанавливали на дно. Анализ эпюр скоростей показывает, что донные скорости достигают величины 10...13 дм/с, чему соответствует усредненное гидродинамическое давление 0,51...0,87 кг/дм². При проникновении хотя бы четверти этой скорости под ковер неизбежен его подъем над дном. В этих условиях уже полный гидродинамический напор проникает под ковер с неизбежным его подъемом за счет парусности и сносом вниз по течению.

Исследования по влиянию стыков на гидравлические сопротивления и устойчивость покрытия проводились в прямоугольной лотке для различной конструкции стыков. Предварительно было изучено влияние «нахлеста» по течению торцевого участка нижележащего ковра вышележащим с перекрытием 0,21 м. Такое соединение полотен ковра предупреждало попадание гидродинамического давления через стык и являлось одновременно пригрузкой, увеличивающей более чем вдвое вес начального участка нижележащего ковра. Исследования устойчивости проводились с расходом $Q = 206 \text{ л/с}$ в течение 8 ч. Каких-либо подвижек ковра не было обнаружено.

Таким образом, можно сделать вывод, что при защемлении верхней кромки ковра вышележащим ковром обеспечивается устойчивость покрытия дна канала ковром «Энкамат А20» при средних скоростях потока $v_{ср} = 2,55 \text{ м/с}$ даже при свободной его укладке. По технологическим условиям ковер «Энкамат А20» крепится к грунту стальными скобами, что безусловно предопределяет его устойчивость против его сдвига силами влечения воды.

Для определения фильтрационных характеристик геомата была изготовлена установка из органического стекла, состоящая из стакана и поддона-резервуара с водосливом Томсона для измерения расхода профильтрованной воды. Внутренние размеры стакана – 10x10x50 см. Испытуемый образец геомата «Энкамат

А20» размером 10x10 см размещался в нижнем сечении стакана. Для удержания испытуемого образца геомата выходное нижнее сечение стакана фильтрационной установки закрывалось сеткой из стальной проволоки диаметром 2 мм с размерами ячеек 20x20 мм. По контуру, по линии контакта материала со стенкой для предотвращения повышенных протечек по периметру материала щели были герметизированы солидолом. Внутренние размеры поддона-резервуара 38x20x14 см. В одной из стенок резервуара сделан треугольный вырез, соответствующий мерному водосливу Томсона с углом 90° и высотой порога 4 см. Расход определяли по формуле $Q = 14H^{5/2}$ см³/с [2].

В процессе проведения экспериментов по определению фильтрационных свойств изучалась свободная фильтрация и фильтрация в напорном режиме.

На первом этапе стакан устанавливали на резервуар и профильтрованная вода свободно падала в бассейн и далее через водослив отводилась в сбросную галерею (рис. 3). Было выполнено 7 опытов, т. е. материал исследовали на фильтрацию при 7 уровнях (бьефах) в стакане.



Рис. 3. Исследование материала геомата при свободной фильтрации и расположении стакана на резервуаре-водосливе

На втором этапе стакан с материалом опускали в резервуар так, чтобы уровень воды в нем был выше поверхности испытуемого образца в стакане. В этом случае действующим напором являлась разность уровней воды в стакане и резервуаре. Гидравлический уклон определяли так: $J = \Delta H / \Delta t$. На этом этапе тоже

выполнено 7 опытов.

В общем случае средняя скорость v_ϕ фильтрации воды через геомат «Энкамат А20»:

$$v_\phi = \frac{Q}{\omega} \tag{5}$$

и может быть описана степенным уравнением

$$v_\phi = k \cdot J^m \tag{6}$$

Формулы (4) и (5) позволяют вычислить коэффициент фильтрации k_ϕ :

при ламинарном режиме фильтрации –

$$k = \frac{v_\phi}{J}; \tag{7}$$

при турбулентном режиме фильтрации –

$$k = \frac{v_\phi}{\sqrt{J}}; \tag{8}$$

в общем виде –

$$k_\phi = \frac{v_\phi}{J^m} \tag{9}$$

Рисунок 4 иллюстрирует зависимость коэффициента фильтрации геомата. По графикам видно, что фильтрация через ковер геомата «Энкамат А20» не соответствует ни ламинарному, ни турбулентному режиму фильтрации.

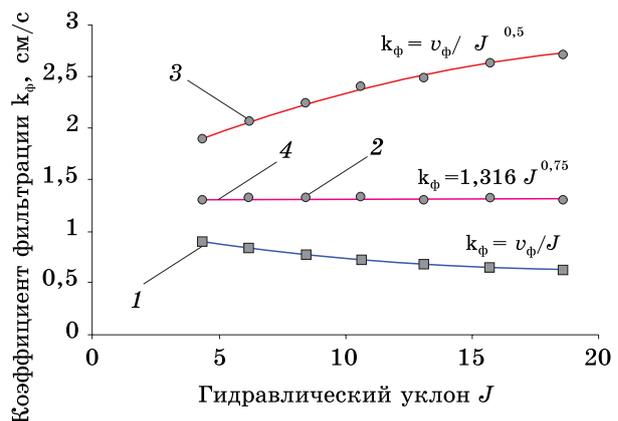


Рис. 4. Зависимость коэффициента фильтрации геомата «Энкамат 20»: 1 – линейная фильтрация; 2 – по степенному закону, эксперимент; 3 – турбулентная фильтрация; 4 – по степенному закону, аппроксимация (синим цветом показана зависимость $k = f(J)$ в предположении ламинарного режима фильтрации; красным цветом показана зависимость $k = f(J)$ в предположении турбулентного режима фильтрации).

Коэффициент фильтрации k_f , полученный по данным эксперимента для свободной фильтрации, принимает постоянное значение при показателе степени $m = 0,75$ в формуле (9). Его величина равна 1,316 см/с.

Была проведена серия экспериментов с лотком, правый борт которого был вертикальным, а левый имел заложение

$m = 1$ (рис. 5). Высота правой стенки 35,8 см; ширина по дну $b = 48,5$ см; верхняя кромка левого откоса находилась на расстоянии 27 см от дна. Такое сечение имитировало движение жидкости в трапециевидальном канале для части живого сечения, примыкающей к нижней части левого борта [4].



Рис. 5. Сечение исследованного лотка с уложенным геоматериалом

Длина рабочего участка с исследуемым материалом составила 4,9 м. Перед рабочим участком и после него на длине соответственно 1,9 и 1,2 м по периметру сечения уложена армирующая сетка геомата без щебня с целью приблизить параметры потока к бытовым условиям при вступлении потока на материал и после него.

Для измерения пульсации гидродинамического давления датчики установлены в двух местах, причем в каждом месте по два датчика. Один заподлицо поверхности материала геомата, другой – под материалом, заподлицо твердой поверхности, на которую уложен материал. «Первый

тандем» расположен на откосе, на расстоянии 9 см от дна; «второй тандем» – в дне на расстоянии 10 см от края откоса (рис. 6). Оба датчика установлены в одном сечении на расстоянии 160 см от начала рабочего участка. Расположение датчиков в одном месте над материалом и под ним позволит получить полную картину распределения гидродинамического давления по толщине материала, определить как усредненные, так и мгновенные значения давления на границах материала. Это необходимо для выяснения главных направлений гидронагрузок и оценки устойчивости покрытия из геомата на откосе и на дне канала.

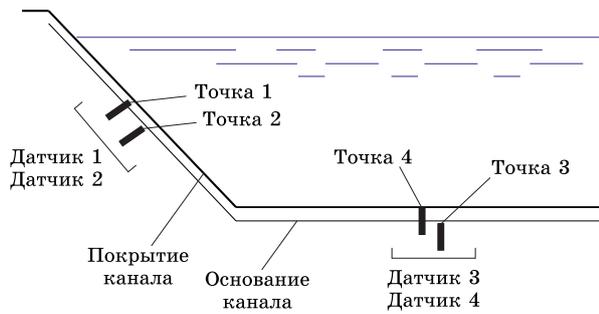


Рис. 6. Места (гнезда) установки датчиков для измерения пульсации давления на откосе и на дне канала

Анализ результатов исследований показал, что величины гидродинамических давлений увеличиваются по мере роста расхода воды в канале, причем увеличение имеет место и на поверхности покрытия, и под ним. Эта тенденция характерна для гидродинамических значений давлений на откосе и на дне канала. При изменении расхода воды в канале с $Q = 82$ л/с до $Q = 206$ л/с происходит увеличение гидродинамических нагрузок. Например, для датчика 1, установленного на поверхности защитного покрытия откоса канала, гидродинамическое давление увеличивается примерно на 30 %, а для датчика 2, установленного под защитным покрытием откоса канала, примерно на 26 %. Аналогичное увеличение гидродинамического значения наблюдается и на дне канала: для датчика 3 – на 21 %; для датчика 4 – на 24 %. Усредненные значения скорости течения воды в канале, определенные микровертушкой, в непосредственной близости к датчикам, установленным в точке 1 (откос канала) – от $v = 1,52$ до $v = 2,04$ м/с, в точке 4 (дно канала) – от $v = 1,64$ до $v = 1,92$ м/с [5].

Частотный диапазон основных энергонесущих нагрузок неоднороден. Так, например, для участка, где расположен датчик 1, происходит рост энергонесущих частот с $F = 400$ до $F = 500$ Гц (при $Q = 82$ л/с $F = 400$ Гц, при $Q = 174$ л/с $F = 500$ Гц), при максимальном расходе $Q = 206$ л/с имеется наличие двух максимальных значений 400 и 570 Гц [6].

Примерно такой же характер изменения гидродинамического давления и частотного спектра наблюдается и для значений, полученных датчиком 2 (установлен под покрытием в том же створе, что и датчик 1). Однако значения

частот здесь еще более неоднородны – изменяются от $F = 360/670$ Гц при $Q = 206$ л/с до $F = 120/800$ Гц при $Q = 82$ л/с.

Выводы

Для гидравлических расчетов каналов с покрытием из «Энкамата А20» можно рекомендовать значение коэффициента шероховатости $n = 0,0168$.

Коэффициент фильтрации, полученный по данным эксперимента: $k_{\phi} = 1,316$ см/с. Скорость свободной и напорной фильтрации можно рассчитать по зависимостям: $v_{\phi} = 1,785 \cdot J^{0,663}$ и $v_{\phi} = 1,471 \cdot J^{0,662}$.

При заземлении верхней кромки ковра вышележащим ковром обеспечивается устойчивость покрытия дна канала ковром «Энкамат А20» при средних скоростях потока $v_{cp} = 2,55$ м/с даже при свободной его укладке.

Относительная величина дополнительного «пригрузочного» гидродинамического давления над защитным покрытием канала как на откосе, так и на дне канала находится в пределах 8...14 %.

Частотный диапазон существования усредненных амплитуд гидродинамического давления неоднороден и изменяется от 120 до 800 Гц, тем самым определяя процент разброса дополнительного «пригрузочного» гидродинамического давления над защитным покрытием, уложенным на дне и откосе канала.

Определенные (результатирующие) дополнительные гидродинамические нагрузки, возникающие как разница давлений над и под защитным покрытием, являются дополнительными факторами устойчивости этого покрытия канала.

1. Павловский Н. Н. Гидравлический справочник. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1937. – 886 с.

2. Чоу В. Г. Гидравлика открытых каналов; пер. с англ. – М.: Стройиздат, 1969. – 464 с.

3. Справочник по гидравлическим расчетам; под ред. П. Г. Киселева. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.

4. Гутер Р. С., Овчинский Б. В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опытов. – М.: Физматгиз, 1962. – 380 с.

5. Чертоусов М. Д. Гидравлика. Специальный курс. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 630 с.

6. Вентцель А. Д. Курс теории случайных процессов. – М.: Наука, 1975.

Материал поступил в редакцию 13.11.14.

Козлов Константин Дмитриевич, аспирант

Тел. 8-916-467-91-75

E-mail: kostya-dv@mail.ru

Гурьев Алим Петрович, доктор техни-

ческих наук, профессор кафедры «КИВР и гидравлика»

E-mail: alim.p.guryev@gmail.com

Ханов Наргмир Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры «КИВР и гидравлика»

Тел. 8 (499) 976-00-15

E-mail: nvkhanov@yahoo.com

УДК 502/504:556.5:551.4

В. Е. ПУТЫРСКИЙ

Институт водных проблем Российской академии наук, Москва

ПРОБЛЕМА УТИЛИЗАЦИИ ОТХОДОВ: МЕТОДЫ НАТУРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассматриваются социально-экологические вопросы развития Тверской области РФ с учетом водного фактора. Анализируются процессы распространения ряда загрязнителей в природных водах. Описываются методологические подходы к индикации гидрохимических трассеров в открытых и закрытых водотоках при оценке антропогенного воздействия на примере свалки отходов в городе Конаково.

Утилизация отходов, водосбор, грунтовые воды, фильтрационные потоки.

Social-and-ecological questions of development of the Tver area of the Russian Federation are considered taking into account a water factor. Spreading processes of a number of pollutants in natural waters are analyzed. Methodological approaches to the indication of hydrochemical tracers in open and closed waterways are described when assessing an anthropogenic influence by the example of the waste dump in a town of Konakovo.

Utilization of wastes, water catchment, ground water, filtration flows.

При разработке международных программ по охране окружающей среды учитывается огромное планетарно-экологическое значение России. Российские леса и заболоченные пространства регенерируют атмосферный кислород и выступают геохимическими барьерами для загрязняющих веществ. Крупнейший на Земле массив практически не освоенных «диких» таежных земель играет большую роль во влагообороте и формировании климата.

Очевидно, что российская территория является экологическим «донором» для многих зарубежных экосистем и обеспечивает устойчивое развитие РФ. Однако сдерживающим фактором является несовершенство природно-технологиче-

ских комплексов мелиорации продуктов антропогенной деятельности. Это приводит к загрязнению поверхностных и многих подземных источников водоснабжения. Максимальный уровень загрязнения наблюдается в районах наибольшего промышленного и сельскохозяйственного развития.

Качество жизни населения в любой части мира напрямую связано с решением задачи утилизации отходов. Процесс урбанизации и расширение хозяйственной инфраструктуры приводят к ежегодному увеличению объема производственных и бытовых отходов. В России общее установленное количество отходов оценивается в 80 млн т. Под свалками занято около