ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОДНОГО ПОТОКА НА ЗАЩИТНОЕ ПОКРЫТИЕ ИЗ ГЕОСИНТЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

К.Д. Козлов¹, Н.В. Ханов, В.А. Фартуков, Д.В. Козлов²

Российский государственный аграрный университет, 127550, г. Москва, ул. Тимирязевская, д. 49;

¹ «Интердорпроект», 129343, г. Москва, ул. Искры, д. 17А, стр. 3;

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

Предмет исследования: в современной отечественной практике гидротехнического, транспортного и природоохранного строительства в последние годы стал широко применяться полусинтетический материал — геомат типа Энкамат А20 (Enkamat). Ковер из геомата, заполненный щебнем с битумным вяжущим материалом, используется в конструкциях водоотводных и водопропускных сооружений для защиты различных типов грунтов (песчаных, суглинистых и глинистых), а также предотвращения разрушительного эрозийного воздействия текущей воды на защищаемые поверхности. Предметом выполненных исследований стало изучение влияния гидродинамического воздействия водного потока и оценка наличия или отсутствия отрывных усилий, обусловленных сдвигом фаз давления потока на верхнюю и нижнюю поверхность покрытия из геомата.

Цели: программа исследований была ориентирована на количественную и качественную оценку гидродинамического воздействия потока, проходящего по экспериментальному участку водопроводящего канала, на состояние и устойчивость защитного покрытия из геосинтетического материала типа Энкамат А20.

Материалы и методы: была проведена серия физических экспериментов, позволившая оценить воздействие водного потока на геосинтетический материал. Результаты экспериментальных измерений обрабатывались и анализировались с помощью современного программного обеспечения

Результаты: в процессе выполненных исследований были определены величины пульсаций давлений потока на откосе и дне водопроводящего канала при нескольких значениях транзитного расхода воды, а также определены величины пульсаций давления водного потока под защитным геосинтетическим покрытием.

Выводы: на основании результатов физического эксперимента получены разности давлений потока на поверхность покрытия геомата — верхнюю поверхность, контактирующую с водным потоком, и на нижнюю поверхность, контактирующую с грунтом. Выявлено отсутствие отрывных усилий на нижнюю поверхность покрытия, контактирующую с грунтом. Показаны возможные проявления отрывных усилий, связанные со сдвигом фаз давления водного потока на верхнюю и нижнюю поверхности геопокрытия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геомат Энкамат А20; гидравлический лоток; канал; уклон дна; заложение откоса; сечение канала; рабочий участок канала; скорости потока; гидродинамическое давление; датчики пульсаций давления

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Козлов К.Д., Ханов Н.В., Фартуков В.А., Козлов Д.В. Исследования гидродинамического воздействия водного потока на защитное покрытие из геосинтетического материала // Строительство: наука и образование. 2018. Т. 8. Вып. 1 (27). Ст. 9. Режим доступа: <http://nso-journal.ru>.

RESEARCH OF HYDRODYNAMIC EFFECT OF THE WATER FLOW ON THE GEOSYNTHETIC PROTECTIVE BLANKET

K.D. Kozlov¹, N.V. Khanov, V.A. Fartukov, D.V. Kozlov²

Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy (RSAU — MTAA), 49 Timiryazevskaya str, Moscow, 127550, Russian Federation;

¹ “Interdorproekt”, 17A, p. 3, Iskry str., Moscow, 129343, Russian Federation;

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU), 26 Yaroslavlshoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation

Subject of research: In recent domestic practice of hydrotechnical, transport and environment-oriented construction, a semi-synthetic material — Enkamat A20 geomat (Enkamat) — has been widely used in recent years. The carpet from the geomat, filled with crushed stone with bituminous binding material, is used in the constructions of drainage structures and culverts to protect various types of soils (sandy, loamy and clay), as well as to prevent the destructive erosivity of the flowing water on the protected surfaces. The studying of the influence of the hydrodynamic effect of the water flow and the estimation of presence and absence of tearaway loads caused by a shift of flow pressure phases on the upper and lower geomat surfaces became the subject of the researches that were carried out.

Objectives: the research program was focused on the quantitative and qualitative assessment of the hydrodynamic effect of the flow passing through the experimental stretch of the conveying channel for the condition and stability of the protective blanket of Enkamat A20 geosynthetic material.

Materials and techniques: a series of physical experiments was performed, which made it possible to estimate the effect of the water flow on geosynthetic material. The results of the experimental measurements were processed and analyzed with the use of modern software.

Results: in the process of the performed researches, the values of the flow pressure pulsations on the slope and the bottom of the conveying channel were determined at several values of the passing water flow rate, as well as the values water flow pressure pulsations under the protective geosynthetic blanket were determined.

Findings: on the basis of the physical experiment, the differences in flow pressures on the surface of the geomat blanket — the upper surface that is in contact with the water flow, and on the lower surface that is in contact with the soil were obtained. The absence of tearaway loads on the lower surface of the blanket, which is in contact with the soil, was identified. Possible demonstrations of tearaway loads associated with the shift of water flow pressure phases on the upper and lower geomat surfaces are shown.

KEY WORDS: Enkamat A20 geomat, hydraulic flume, channel, underwater gradient, rate of slope, section of channel, working section of channel, flow rates, hydrodynamic pressure, pressure pulsation detectors

FOR CITATION: Kozlov K.D., Khanov N.V., Fartukov V.A., Kozlov D.V. Issledovaniya gidrodinamicheskogo vozdeystviya vodnogo potoka na zashchitnoye pokrytie iz geosinteticheskogo materiala [Research of hydrodynamic effect of the water flow on the geosynthetic protective blanket]. Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie [Construction: Science and Education]. 2018, vol. 8, issue 1 (27), paper 9. Available at: <http://ns-o-journal.ru>. (In Russian)

ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие в строительной отрасли вместо традиционных решений по защите откосов грунтовых и водопроводящих сооружений и берегов стали использоваться различные типы геосинтетических материалов, которые применяются для улучшения физических, механических и гидравлических характеристик грунтов [1]. Сегодня геоматериалы активно используют в строительстве транспортных, гидротехнических и природоохранных (в основном берегоукрепительных и противоэрозионных) сооружений, а также в проектах рекультивации нарушенных земель (например, при реконструкции и новом строительстве полигонов твердых бытовых отходов и других объектов). Опыт внедрения подобных материалов во всех строительных сферах до настоящего времени остается недостаточным. Во многом это объясняется нехваткой информации о гидравлических и гидродинамических характеристиках покрытия из геосинтетического материала. Очевидно, что для последующего широкого внедрения защитных конструкций различных сооружений с использованием подобных материалов и обоснования применимости геоматов типа Энкамат А20 требуется проведение крупных и длительных гидравлических исследований данного геосинтетического покрытия [2].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Гидравлические исследования проводились в специализированной лаборатории кафедры гидротехнических сооружений Института природообустройства имени А.Н. Костякова РГАУ—МСХА имени К.А. Тимирязева на экспериментальной установке с физической моделью рабочего участка канала, имевшей параметры потока, соответствующие

щие натурным условиям работы водопроводящего сооружения [3]. Была проведена серия физических экспериментов, позволившая оценить воздействие водного потока на геосинтетический материал (Энкамат А20) и включавшая в себя, в том числе исследование устойчивости свободно лежащего на дне канала защитного ковра из геомата [4]. Гидравлические опыты проводились при максимально возможном уклоне гидравлического лотка $i = 0,053$ и различных дискретных расходах воды, равных 82,00 л/с, 174,00 л/с, 206,00 л/с.

Для получения соизмеримых результатов исследования гидродинамического давления водного потока выполнялись в единственном створе на откосе и дне водопроводящего канала. Перед анализом гидродинамического воздействия потока потребовалась предварительная оценка величин его амплитудно-частотных характеристик [5].

На первом этапе исследований оценивались возможные значения самых низких частот пульсаций и определялась их зависимость от экстремальных (минимальной, максимальной) скоростей водного потока, а также от длины участка, на котором проявлялось действие возникших пульсаций [6]. Исходя из реальных условий на физической модели, был определен возможный диапазон частот пульсаций давления, находившийся в пределах от 1,0 до 200,0 Гц. Предварительная оценка величины статических нагрузок на физическую модель [7] находилась в пределах от 0,01 до 2,00 м, при этом размах возможных значений пульсаций давления в долях от среднего статического давления достигал разброса значений от 0,03 до 0,60. Следует отметить, что линейные геометрические размеры физической модели (длина и ширина) в силу своей масштабности по отношению к натурным величинам водопроводящего сооружения накладывают определенные требования к оценке параметров транзитного

потока [8], т.е. линейные размеры применяемых датчиков должны соответствовать критерию сбора полученной информации: точно или на площади. Поскольку размеры лабораторной модели и параметры водного потока соответствовали натурным значениям [9], в выполненных физических исследованиях учет масштабности явления не производился.

При проведении гидродинамических исследований требовалась множественная оценка параметров преобразователей, а именно точность, стабильность выходных характеристик, надежность и долговечность [10]. Необходимость при невысоких температурах достаточно высокой стабильности выходных характеристик потребовала для рассматриваемых экспериментов использования интегральных индукционных преобразователей давления [11]. Поэтому при проведении физического эксперимента применялись соответственно индукционный способ преобразования давления и индукционные датчики.

Измерения пульсации гидродинамического давления выполнялись в единственном сечении на расстоянии 1,60 м от начала рабочего (экспериментального) участка канала. Для этого в двух местах были установлены парные датчики: один заподлицо с поверхностью материала геомата, а другой — под геопокрытием, заподлицо с твердой поверхностью, на которую укладывался геомат (рис. 1).

Полная картина распределения гидродинамического давления по толщине ковра геомата, а также определение осредненных и мгновенных значений давления на границах защитного покрытия оказались возможными благодаря правильному расположению индукционных датчиков в одном и том же месте над и под геосинтетическим материалом, что позволило выявить главные направления гидронагрузок и оценить устойчивость геосинтетического покрытия, лежащего на откосе и дне водопроводящего канала.

Четырехканальный осциллограф АСК-3107 использовался как регистратор измеряемых величин. Результаты экспериментальных измерений обрабатывались и анализировались с помощью современного программного обеспечения LabVIEW, Pc-Lab2000LT и Mathcad 14 [12].

Предварительный анализ результатов, полученных на исследуемом участке водопроводящего сооружения, показал, что измеренные параметры водного потока имели незначительные отклонения характеризующих величин (например, изменения выходного напряжения определялись микровольтами и милливольтами), а возможные частоты изменений давления находились в достаточно широком диапазоне. Поэтому возникла не только необходимость в усилении сигнала, поступающего с измерительного датчика, но и в фильтровании присутствующих различных частотных наводок [13].

В качестве фильтра применялся активный фильтр третьего порядка Баттерворта при созданном усилении порядка 20 дБ. Используя схемотехническое моделирование, выполненное с помощью русифицированной версии программы Micro CAP-8 RUS, разработали макромодель исследуемого участка водопроводящего сооружения, с помощью которой был выполнен анализ сложных процессов изменения гидронагрузок на дно и откос экспериментального участка канала [14].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ результатов экспериментальных измерений (табл.) показал, что гидродинамические давления увеличиваются по мере роста расхода воды в канале. Причем это увеличение наблюдалось как на поверхности геосинтетического покрытия, так и под ним. Такая тенденция была характерна как для гидродинамических значений давлений на откосе, так и на дне канала [15]. При изменении рас-

Рис. 1. Схема установки датчиков на дне и откосе экспериментального участка канала с защитным покрытием из геомата Энкамат А20

Результаты замеров и анализа пульсаций давлений, см

Расход воды, л/с	Скорость потока, м/с	Максимум	Минимум	Среднее значение	Разница давлений Д1–Д2	Увеличение гидродинамического давления, %
Датчик 1						
206,0	2,00	58,40	52,00	56,30	6,60	11,80
174,0	2,00	55,80	50,60	54,10		
82,0	1,50	44,60	39,60	41,00		
Датчик 2					6,70	12,50
206,00	2,00	51,20	46,00	49,70	3,50	8,70
174,00	1,90	50,10	45,10	47,40		
82,00	1,60	41,60	35,20	37,50		
Датчик 3						
206,00	1,90	58,00	53,10	56,90	9,40	14,10
174,00	1,80	56,50	52,30	55,60		
82,00	1,60	48,90	41,90	45,90		
Датчик 4					8,50	13,20
206,00	1,90	68,30	62,10	66,30	5,10	10,00
174,00	1,80	65,80	60,80	64,10		
82,00	1,70	54,70	49,50	51,00		

хода воды в канале от 82,00 до 206,00 л/с происходило существенное увеличение гидродинамических нагрузок. Так, для датчика № 1, установленного на поверхности защитного геопокрывтия в откосной зоне канала, значение гидродинамического давления выросло примерно на 30 %, а для датчика № 2, установленного под защитным покрытием на том же откосе, — примерно на 26 %. Аналогичное увеличение гидродинамического давления наблюдалось и на дне канала: для датчика № 3 — примерно на 21 % и для датчика № 4 — на 24 %. Осредненные значения скорости течения воды в канале, измеренные микровертушкой [16] в непосредственной близости от датчиков, установленных в точке № 1 (на откосе канала), составили от 1,50 до 2,00 м/с, а в точке № 4 (на дне канала) — от 1,60 до 1,90 м/с.

Выполненные исследования показали, что частотный диапазон основных энергонесущих нагрузок был существенно неоднородным [17]. Так для участка в месте расположения датчика № 1 при изменении расхода потока с 82,00 до 174,00 л/с происходил рост энергонесущих частот с 400 до 500 Гц, а при максимальном расходе в 206,00 л/с наблюдалось два максимальных значения энергонесущих частот: 400 и 570 Гц. Похожий процесс изменения гидродинамического давления, а также частотного спектра наблюдался для значений, полученных на датчике № 2, установленном под защитным покрытием (в одном створе), что и датчик № 1. Значения частот в этой зоне оказались еще более неоднородными, изменяясь от 360...670 Гц при расходе 206,00 л/с до 120...800 Гц при расходе 82,00 л/с.

Рис. 2. Гистограммы с частотным диапазоном главных энергонесущих нагрузок: а — датчик 3, точка 4 при расходе 174,00 л/с; б — датчик 1, точка 14 при расходе 206,00 л/с

Аналогичная картина наблюдалась и на датчиках № 3 и 4, установленных на дне экспериментального участка канала [18].

ВЫВОДЫ

Результаты гидродинамических исследований транзитной части экспериментального участка водопроводящего канала с защитным геосинтетическим покрытием из материала Энкамат А20 показали, что при увеличении расхода воды в потоке с 82,00 до 206,00 л/с наблюдался необратимый срыв (с отрывом от защищаемой поверхности) геомата вниз по течению. Исходя из этого, можно предположить, что скорость потока, равная примерно 1,00 м/с, становится критической на отрыв геопокрытия (или его сдвиг) для случая свободнолежащего геосинтетического ковра Энкамат А20. Кроме того, физические

исследования показали, что результирующие дополнительные гидродинамические нагрузки, возникающие как разница давлений над и под защитным геопокрытием, являются сопутствующими факторами устойчивости геосинтетического покрытия канала. Относительная величина дополнительного «пригрузочного» гидродинамического давления над защитным геосинтетическим покрытием в зоне откоса и на дне канала изменялась от 8,70 до 14,10 %. Экспериментальные исследования показали, что частотный диапазон существования осредненных амплитуд гидродинамического давления крайне неоднороден и изменялся от 120 до 800 Гц, тем самым определяя процент разброса дополнительного «пригрузочного» гидродинамического давления над защитным геосинтетическим покрытием, уложенным на дне и откосах исследуемого рабочего участка канала.

ЛИТЕРАТУРА

1. Байнатов Ж.Б., Досхожаев А.С. Эффективные конструкции защитных покрытий от размыва // Экспресс-информ. 1991. № 2.
2. Козлов К.Д. Гидравлические исследования противоэрозионного покрытия — геомата марки Энкамат А20 // Строительство — формирование среды жизнедеятельности : сб. тр. Восемнадцатой Междунар. межвузов. науч.-практ. конф. студ., маг., асп. и мол. уч. (22–24 апреля 2015 г., г. Москва). М. : МГСУ, 2015. С. 353–356.
3. Козлов К.Д., Гурьев А.П., Ханов Н.В. Гидравлические исследования покрытия из геокомпозитного материала // Природообустройство. 2014. № 5. С. 80–86.
4. Чоу В.Г. Гидравлика открытых каналов: пер. с англ. М. : Стройиздат, 1969. 464 с.
5. Васильев С.А. Энергетический подход для построения гидродинамической характеристики водного потока на склоновом агроландшафте // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: Наука и высшее профессиональное образование. 2015. № 4. С. 194–200.
6. Фартуков В.А., Земляникова М.В. Инновационная система гидродинамических исследований водного потока // Природообустройство. 2016. № 3. С. 75–79.
7. Цугленок Н.В., Туркин А.А. Экспериментальные исследования гидродинамического взаимодействия КОР-1,0 с потоком // Вестник КрасГАУ. 2008. № 5. С. 281–286.
8. Оппенгейм А., Шафер Р. Цифровая обработка сигналов: пер. с англ. М.: Техносфера, 2009. 856 с.
9. Козлов К.Д., Гурьев А.П., Козлов Д.В., Ханов Н.В. Гидравлические исследования условий работы покрытия из геокомпозитного материала — геомата марки Энкамат А20 // Сб. ст. Междунар. науч. конф. молодых ученых и специалистов, посвящ. 150-летию РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева. М. : Изд-во РГАУ-МСХА. 2015. С. 305–307.
10. Гутер Р.С., Овчинский Б.В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опытов. М. : Наука. 1962. 380 с.
11. Клишин И.В. Лабораторные исследования кинематического и гидродинамического взаимодействия подводных трубопроводов с речным потоком // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 10. С. 61–73.
12. Дьяков В.П. Mathcad 11/12/13 в математике: справ. М. : Горячая линия – Телеком, 2007. 958 с.
13. Отнес Р., Энноксон Л. Прикладной анализ временных рядов : пер. с англ. М. : Мир. 1982. 428 с.
14. Баранов Е.В., Ханов Н.В. Предпосылки к гидравлическим исследованиям георешеток // Сб. тез. VIII Московской науч.-практ. конф. «Студенческая наука». 2014. С. 70–72.
15. Вязова Е.В., Гилемханов А.И. Укрепление откосов противоэрозийными геоматами при реконструкции автомобильных дорог // Дорожно-транспортный комплекс: состояние, проблемы и перспективы развития : сб. науч. тр. 2016. С. 22–29.
16. Павловский Н.Н. Гидравлический справочник. Главная редакция энергетической литературы, 1937. 886 с.
17. Скребков Г.П., Федоров Н.А. Послойное кинематическое подобие в плоских турбулентных потоках // Гидротехническое строительство. 2012. № 12. С. 34–37.
18. Венцель А.Д. Курс теории случайных процессов. М. : Наука, 1975. 318 с.

Поступила в редакцию

Принята в доработанном виде

Одобрена для публикации

О Б АВТОРАХ: **Козлов Константин Дмитриевич** — кандидат технических наук, инженер, ООО “Интердор-проект”, 129343, г. Москва, ул. Искры, д. 17А, стр. 3; kozlov.konstantin.dv@gmail.com;

Ханов Нартмир Владимирович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидротехнических сооружений, **Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева (РГАУ—МСХА имени К.А. Тимирязева)**, 127550, г. Москва, Тимирязевская ул., д. 49, nvkhanov@yahoo.com;

Фартуков Василий Александрович — кандидат технических наук, доцент кафедры Комплексного использования водных ресурсов и гидравлики, **Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева (РГАУ—МСХА имени К.А. Тимирязева)**, 127550, г. Москва, Тимирязевская ул., д. 49, vasfar@mail.ru;

Козлов Дмитрий Вячеславович — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидравлики и гидротехнического строительства, **Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ)**, 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26; kozlovdv@mgsu.ru.

INTRODUCTION

In the last decade, in the construction industry, instead of traditional solutions to protect the slopes of soil and water-conveyance structures and coasts, various types of geosynthetic materials have been used to improve the physical, mechanical and hydraulic characteristics of soils [1]. Nowadays, geomaterials are actively used in the construction of transport, hydrotechnical and environment-oriented (mainly — coast-protection and erosion protection ones) structures, as well as in projects for the recultivation of disturbed soils (for example, in the process of reconstruction and new construction of solid domestic waste landfills and other objects). The experience of introducing such materials in all construction areas is still insufficient. This is largely due to the lack of information about the hydraulic and hydrodynamic characteristics of the blanket from the geosynthetic material. It is obvious that large-scale and long-term hydraulic studies of the given geosynthetic blanket are required for the subsequent widespread introduction of protective structures of various structures using similar materials and justifying the applicability of Enkamat A20 geomatites [2].

MATERIALS AND TECHNIQUES

Hydraulic researches were carried out in a specialized laboratory of the Department of Hydraulic Engineering Structures of the Institute of Environmental Engineering named after A.N. Kostyakov RGAU — MSHA named after K.A. Timiryazev in the experimental installation with a physical model of the working section of the channel, which had the flow parameters corresponding to the full-scale operation conditions of the aqueducts [3]. A series of physical experiments was performed, which made it possible to estimate the effect

of the water flow on the geosynthetic material (Enkamat A20) and including, among other things, the study of the stability of the protective cover from geomat loosely lying on the bottom of the channel [4]. Hydraulic experiments were carried out with the maximum possible slope of the hydraulic flume $i = 0.053$ and various discrete water flow rates of 82.00 l/s, 174.00 l/s, 206.00 l/s.

To obtain commensurate results, studies of the hydrodynamic pressure of the water flow were carried out in a single section on the slope and bottom of the conveying channel. Before the analysis of the hydrodynamic effect of the water flow, a preliminary assessment of the values of its amplitude-frequency characteristics was required [5].

At the first stage of the researches, possible values of the lowest pulsation frequencies were estimated and their dependence on the extreme (minimum, maximum) water flow rates, as well as on the length of the section on which the effects of the pulsations appeared [6] was determined. Based on the actual conditions on the physical model, a possible range of pressure pulsation frequencies, which was in the range from 1.0 Hz to 200.0 Hz was determined. A preliminary assessment of the values of static loads on the physical model [7] was in the range from 0.01 to 2.00 m, while the range of possible values of pressure pulsations in fractions of the average static pressure reached a range of values from 0.03 to 0.60. It should be noted that the linear geometric dimensions of the physical model (length and width), due to their scale in relation to the full-scale values of the aqueducts, impose certain requirements on the assessment of the parameters of the transit flow [8], i.e. the linear dimensions of the applicable detectors must meet the criteria for collecting the information obtained: pointwise or over an area. Since the dimensions of the laboratory model and the parameters of the water flow corresponded to the full-scale values [9], the scale of

the phenomenon was not taken into account in the physical researches carried out.

When carrying out hydrodynamic studies, multiple evaluation of the parameters of the transducers — namely accuracy, stability of output characteristics, reliability and durability — was required [10]. The need of a sufficiently high stability of the output characteristics at low temperatures required the use of integral inductive pressure transducers for the experiments under consideration [11]. Therefore, when conducting the physical experiment, the induction method of pressure conversion and the flux-gate detectors were used, respectively.

Measurements of hydrodynamic pressure pulsations were performed in a single section at a distance of 1.60 m from the beginning of the working (experimental) section of the channel. For these purposes, two pairs of detectors were installed in two places: the one — flush with the surface of the geomat material, and the second — under the geomat coating, flush with the solid surface on which the geomat was laid (Figure 1).

A complete picture of the distribution of the hydrodynamic pressure along the thickness of the geomatic carpet, as well as the determination of the averaged and instantaneous pressure values at the borders of the protective blanket, were possible due to the correct arrangement of the flux-gate detectors at the same place above and under the geosynthetic material, which made it possible to identify the main directions of the hydraulic loads and assess the stability of the geosynthetic blanket lying on the slope and the bottom of the conveying channel.

The four-channel oscillograph ASK-3107 was used as a registrar of measured values. The results of the experimental measurements were processed and analyzed using the modern software LabVIEW, Pc-Lab2000LT and Mathcad 14 [12].

A preliminary analysis of the results obtained in the investigated section of the aqueduct showed that the measured parameters of the water flow had minor deviations in the characteristic values (for example, the changes in the output voltage were determined in microvolts and millivolts), and the possible frequencies of pressure changes were in a quite wide range. Therefore, not only did the need for amplifying the signal coming from the measuring detector but also the need for filtering the various frequency alignments arise [13].

As a filter, a Butterworth active third-order filter was used with a generated order reinforcement of 20 dB. Using the circuit simulation with the Russian version of the program “Micro CAP-8 RUS”, the micromodel of the investigated section of the aqueduct which allowed to conduct the analysis of complex processes of changing the hydraulic loads on the bottom and the slope of the experimental section of the channel was developed [14].

RESULTS

Analysis of the results of experimental measurements (Table) showed that the hydrodynamic pressures increase as the water flow rate in the channel increases. Moreover, this increase was observed both on the surface of the geosynthetic blanket and under it. This tendency was typical both for hydrodynamic pressure values on the slope and at the bottom of the channel [15]. When the water flow rate in the channel varied from 82.00 to 206.00 l/s, the hydrodynamic loads increased significantly. So, for the Detector No. 1 installed on the surface of the protective geosynthetic blanket in the sloping area of the channel, the value of the hydrodynamic pressure increased approximately by 30 %, and for the Detector No. 2 installed under the protective blanket on the same slope — approximately by 26 %. A similar increase in hydrodynamic pressure

Figure 1. Scheme of installation of detectors on the bottom and slope of the experimental section of the channel with a protective blanket from Enkamat A20 geomat

Results of measurements and analysis of pressure pulsations, cm

Water flow rate, l/s	Flow rate, m/s	Maximum	Minimum	Average value	Pressure difference D1-D2	Increase of hydrodynamic pressure, %
Detector 1						
206.0	2.00	58.40	52.00	56.30	6.60	11.80
174.0	2.00	55.80	50.60	54.10		
82.0	1.50	44.60	39.60	41.00		
Detector 2					6.70	12.50
206.00	2.00	51.20	46.00	49.70	3.50	8.70
174.00	1.90	50.10	45.10	47.40		
82.00	1.60	41.60	35.20	37.50		
Detector 3						
206.00	1.90	58.00	53.10	56.90	9.40	14.10
174.00	1.80	56.50	52.30	55.60		
82.00	1.60	48.90	41.90	45.90		
Detector 4					8.50	13.20
206.00	1.90	68.30	62.10	66.30	5.10	10.00
174.00	1.80	65.80	60.80	64.10		
82.00	1.70	54.70	49.50	51.00		

was observed at the bottom of the channel: for the Detector No. 3 — approximately by 21 %, and for the Detector No. 4 — by 24 %. The averaged values of the water flow rate in the channel, measured by a miniflowmeter [16] in close proximity to the detectors installed at the Point No. 1 (on the slope of the channel), were from 1.50 to 2.00 m/s, and at the Point No. 4 (at the bottom of the channel) — from 1.60 m/s to 1.90 m/s.

The performed researches showed that the frequency range of the main energy-carrying loads was essentially nonhomogeneous [17]. So, for the section at the location of the Detector No. 1, when the flow rate changed from 82.00 to 174.00 l/s, the energy-carrying frequencies increased from 400 to 500 Hz, and at a maximum flow rate of 206.00 l/s, two maximum values of energy-carrying frequencies were identified: 400 and 570 Hz. A similar process of changing the hydrodynamic pressure as well as the frequency

spectrum was identified for the values obtained at the Detector No. 2 installed under the protective blanket (in one section), as well as the Detector No. 1. The frequency values in this area turned out to be even more nonhomogeneous, varying from 360...670 Hz at a rate of 206.00 l/s to 120...800 Hz at a rate of 82.00 l/s. A similar picture was observed for the Detectors No. 3 and 4 installed at the bottom of the experimental section of the channel [18].

FINDINGS

The results of hydrodynamic researches of the transit part of the experimental section of the conveying channel with a protective geosynthetic blanket made of Enkamat A20 material showed that with an increase in water flow rate in the flow from 82.00 to 206.00 l/s irreversible flushing downstream (with a detachment

Figure 2. Histograms of the frequency range of the main energy-carrying loads: *a* — Detector 3, Point 4 at a flow rate of 174.00 l/s; *b* — Detector 1, Point 14 at a flow rate of 206.00 l/s

from the protected surface) of the geomat was observed. Based on this, it can be assumed that the flow rate, which is about 1.00 m/s, becomes critical for the detachment of the geosynthetic blanket (or its shift) for the case of the loose-lying geosynthetic carpet Enkamat A20. Moreover, physical researches showed that the resulting additional hydrodynamic loads that arise as a difference in pressures over and under the protective geosynthetic blanket are concomitant factors of the stability of the geosynthetic blanket of the channel. The relative value of the additional “ballasting”

hydrodynamic pressure over the protective geosynthetic blanket in the slope area and at the bottom of the channel varied from 8.70 to 14.10 %. Experimental researches showed that the frequency range of existence of the averaged hydrodynamic pressure amplitudes is extremely nonhomogeneous and varied from 120 to 800 Hz, thereby determining the percentage of spread of additional “ballasting” hydrodynamic pressure over the protective geosynthetic blanket laid on the bottom and slopes of the investigated working section of the channel.

REFERENCES

1. Baynatov Zh.B., Doskhozhaev A.S. Effektivnye konstruksii zashchitnykh pokrytiy ot razmyva [Effective designs of protective coatings from erosion]. *Ekspress-inform* [Express-inform]. 1991, no. 2. (In Russian)
2. Kozlov K.D. Gidravlicheskie issledovaniya protivooerozionnogo pokrytiya — geomata marki Enkamat A20 [Hydraulic studies of anti-erosion coating — Enkamat A20 geomat]. *Stroitel'stvo — formirovanie sredy zhiznedeyatel'nosti: sb. tr. Vosemnadsatoy Mezhdunarodnoy mezhvuzovskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii studentov, magistrantov, aspirantov i molodykh uchenykh* (22–24 aprelya 2015 g., Moskva) [Construction as the formation of living environment: coll. tr. Eighteenth International Interuniversity Scientific and Practical Conference of Students, undergraduates, graduate students and young scientists (April 22–24, 2015, Moscow)]. Moscow, MGSU, 2015, pp. 353–356. (In Russian)
3. Kozlov K.D., Gur'ev A.P., Khanov N.V. Gidravlicheskie issledovaniya pokrytiya iz geokompozitnogo materiala [Hydraulic studies of the coating from the geocomposite material]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering]. 2014, no. 5, pp. 80–86. (In Russian)
4. Chow V.T. *Open-Channel Hydraulics*. 30057th edition. Blackburn Press; January 1, 2009.
5. Vasil'ev S.A. Energeticheskiy podkhod dlya postroeniya gidrodinamicheskoy kharakteristiki vodnogo potoka na sklonovom agrolandshte [Energy approach for constructing the hydrodynamic characteristics of the water flow on the slope agrolandscape]. *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: Nauka i vysshee professional'noe obrazovanie* [News of the Lower Volga agro-university complex]. 2015, no.4, pp. 194–200. (In Russian)
6. Fartukov V.A., Zemlyannikova M.V. Innovatsionnaya sistema gidrodinamicheskikh issledovaniy vodnogo potoka [Innovative system of hydrodynamic studies of water flow]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering] 2016, no. 3, pp. 75–79. (In Russian)
7. Tsuglenok N.V., Turkin A.A. Eksperimental'nye issledovaniya gidrodinamicheskogo vzaimodeystviya KOR-1,0 s potokom [Experimental studies of the KOR-1,0 hydrodynamic interaction with the flow]. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of KrasGAU]. 2008, no. 5, pp. 281–286. (In Russian)
8. Oppenheim A.V., Schafer R.W. *Digital Signal Processing*. Pearson; 1975.
9. Kozlov K.D., Gur'ev A.P., Kozlov D.V., Khanov N.V. Gidravlicheskie issledovaniya usloviy raboty pokrytiya iz geokompozitnogo materiala — geomata marki Enkamat A20 [Hydraulic studies of the working conditions of the coating from the geocomposite material - Enkamat A20 geoma]. *Sb. st. Mezhdunar. nauch. konf. molodykh uchenykh i spetsialistov, posvyashch. 150-letiyu RGAU-MSKhA imeni K.A. Timiryazeva* [Collected papers of the International scientific conference of young scientists and specialists, dedicated to the 150th anniversary of the RASU-MTAA named after K.A. Timiryazev]. Moscow, RSAU-MTAA, 2015, pp. 305–307. (In Russian)
10. Guter R.S., Ovchinskiy B.V. *Elementy chislennogo analiza i matematicheskoy obrabotki rezul'tatov opytov* [Elements of numerical analysis and mathematical processing of experimental results]. Moscow, Nauka Publ., 1962. 380 p. (In Russian)
11. Klishin I.V. Laboratornye issledovaniya kinematicheskogo i gidrodinamicheskogo vzaimodeystviya podvodnykh truboprovodov s rechnym potokom [Laboratory investigations of kinematic and hydrodynamic interaction of underwater pipelines with river flow]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* [Mining Informational and Analytical Bulletin]. 2009, no. 10, pp. 61–73. (In Russian)
12. D'yakov V.P. *Mathcad 11/12/13 v matematike: sprav.* [Mathcad 11/12/13 in mathematics: handbook]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2007. 958 p. (In Russian)
13. Otnes R.K., Enochson L. *Applied Time Series Analysis*. vol. 1, Basic Techniques. New York, Wiley, 1978.
14. Baranov E.V., Khanov N.V. Predposylki k gidravlicheskim issledovaniyam georeshetok [Prerequisites for hydraulic exploration of geogrids]. *Sb. tez. VIII Moskovskoy nauch.-prakt. Konf. «Studencheskaya*

nauka» [Collected abstracts of the VIII Moscow scientific and practical Conference “Student Science”]. 2014, pp. 70–72. (In Russian)

15. Vyazova E.V., Gilemkhanov A.I. Ukreplenie otkosov protivooeroziynymi geomatami pri rekonstruktsii avtomobil'nykh dorog [Strengthening of slopes with anti-erosion geomata during the reconstruction of highways]. *Dorozhno-transportnyy kompleks: sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya: sb. nauch. tr.* [Road-transport complex: state, problems and development prospects: collected scientific papers]. 2016, pp. 22–29. (In Russian)

16. Pavlovskiy N.N. *Gidravlicheskiy spravochnik* [Hydraulic reference book]. Glavnaya redaktsiya energeticheskoy literatury Publ., 1937. 886 p. (In Russian)

17. Skrebkov G.P., Fedorov N.A. Posloynnoe kinematicheskoe podobie v ploskikh turbulentnykh potokakh [Layered kinematic similarity in plane turbulent flows]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydro-engineering Construction]. 2012, no. 12, pp. 34–37. (In Russian)

18. Venttsel' A.D. *Kurs teorii sluchaynykh protsessov* [Course of the theory of random processes]. Moscow, Nauka Publ., 1975. 318 p. (In Russian)

Поступила в редакцию

Принята в доработанном виде

Одобрена для публикации

ABOUT THE AUTHORS: **Kozlov Konstantin Dmitrievich** — Candidate of Technical Sciences, Engineer, **ООО “Interdorproekt”**, 17A, p. 3, Iskry str., Moscow, 129343, Russian Federation; kozlov.konstantin.dv@gmail.com;

Khanov Nartmir Vladimirovich — Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Department of Hydraulic Structures, **Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy (RSAU — MTAA)**, 49 Timiryazevskaya str, Moscow, 127550, Russian Federation; nvkhanov@yahoo.com;

Fartukov Vasily Aleksandrovich — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Integrated Use of Water Resources and Hydraulics, **Russian State Agrarian University — Moscow Timiryazev Agricultural Academy (RSAU — MTAA)**, 49 Timiryazevskaya str, Moscow, 127550, Russian Federation; vasfar@mail.ru;

Kozlov Dmitriy Vyacheslavovich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering; **Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; kozlovdv@mgsu.ru.