

Исследование устойчивости и эффективности работы берегозащитных сооружений водохранилищ Беларуси с использованием материалов натурных наблюдений, физического и математического моделирования

Левкевич В.Е., Бузук А.В.

Институт экономики НАН Беларуси

Командно-инженерный институт МЧС Республики Беларусь,
Минск, Беларусь

В Республике Беларусь находится в эксплуатации около 150 водохранилищ различного типа с суммарной площадью водного зеркала более 800 км², объемом 10 км³ [1]. В настоящее время в стране ведется строительство каскада гидроэлектростанции на реке Неман в который входят: Гродненская и Немновская ГЭС и каскадов водохранилищ гидроэнергетического назначения на реках Западная Двина, Днепр, Сож. Наряду с этим возникает проблема защиты населения и территорий, окружающей среды от гидродинамических опасных факторов, приводящих к возникновению чрезвычайных ситуаций гидрологического характера. Одним из основных вопросов при этом является оценка состояния естественных защищенных и незащищенных береговых склонов и различных типов креплений.

В течение 2007–2013 г.г. были проведены исследования береговой зоны более 70 водохранилищ. Анализируя результаты натурных исследований следует отметить наличие деформаций берегоукрепительных сооружений выражающиеся в развитии просадок, трещин, разломов. В настоящее время полномасштабные исследования устойчивости сооружений и элементов берегоукрепительных сооружений водохранилищ проводят: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, Институт географии РАН, ЗАО «ДАР/ВОДГЕО» (Россия, г. Москва) и др.

Наиболее известными исследованиями являются работы авторов: Б.А. Пышкина, Ю.А. Соболевского, Н.Е. Кондратьева, Э.И. Михневича и др. [2, 3]. Характерными повреждениями берегоукрепительных сооружений является разрушение швов, что сопряжено с последующим выносом подстилающего грунта, просадкой плит, появлением трещин и разломов и, как следствие,

разрушением этих сооружений. Изучение деформаций сооружений позволяет с учетом оценки устойчивости различных конструкций выбрать наиболее эффективную с точки зрения прочностных и экономических соображений.

Для изучения устойчивости сооружений авторами были проведены комплексные исследования, которые включали: натурные исследования берегообразующих гидрологических факторов не волнового происхождения с фиксацией на водных объектах участков разрушения береговых склонов; физического (в лабораторных условиях) и математического моделирования взаимодействия системы откос (крепление) – водная среда.

В последующем, сравнивая полученные результаты натурных наблюдений, материалов о деформациях склонов модели и распределения скоростной структуры вдольбереговых и стоковых течений и цифровой модели плана распределения скоростей в водохранилищах определялись адекватность полученных результатов и производилась корректировка модели устойчивости откосов.

Объектами, на которых отрабатывалась методика комплексных исследований по прогнозированию негативных процессов в береговой зоне были водохранилища каскада Вилейско-Минской водной системы, где проводились измерения скоростей стоковых и вдольбереговых течений.

Затем в лаборатории был смоделирован аналогичный каскад водохранилищ, на котором проводились измерения скоростей течения в различных створах, совпадающих со створами на реальных объектах.

В результате, имея данные по скоростям и расходам, была проведена работа по подготовке программного продукта для расчета скоростного напора и распределения скоростей по акватории водных объектов.

При решении задач моделирования в водных объектах важную роль играет определение соответствующих расчетных схем (алгоритмов), по которым в последующем будет выполняться расчет режима распределения скоростей и оценка устойчивости сооружений.

В русловых водохранилищах распределение максимальных скоростей осуществляется в рамках полей течения, приуроченных к старому руслу реки. В водохранилищах имеющих расширенные плановые очертания, распределение скоростей осуществляется более равномерно по всему сечению. Это связано с тем, что в построении полей скоростей участвуют как стоковые течения, так и течения, возникающие в результате развития ветро-волновых и конвективных процессов.

Для возможности моделирования течений с целью оценки устойчивости берегоукрепительных сооружений необходимо иметь математическую модель движения воды в водоёмах и водотоках с учетом распределения скоростей в прибрежной зоне.

Существенные особенности движения воды в сложных системах водотоков с широкими поймами, что характерно для относительно спокойного рельефа Республики Беларусь, как и многих других территорий, невозможно учесть, используя непосредственно для моделирования процесса движения воды в качестве исходной систему уравнений движения Сен-Венана (стационарная и нестационарная двумерная по пространству модель – «теория мелкой воды») [3,4].

Уравнения имитационной модели. Постановка и формализация задачи оценки режима стоковых течений в водоемах сводится к следующему. Для описания скоростной структуры жидкости в русловом водохранилище используется плановая (двухмерная) математическая модель, которая получается из классической формализации уравнения Навье-Стокса [4-7] путем интегрирования уравнений трехмерной задачи по Z -вертикальной координате, т.е. по глубине водоема:

$$U(x, y) = \int_0^h u(x, y, z) dz / h$$

$$V(x, y) = \int_0^h v(x, y, z) dz / h$$

$$P(x, y) = \int_0^h p(x, y, z) dz / h.$$

Уравнения сохранения импульсов

$$\begin{aligned} h\rho UU_x + h\rho VU_y + P_x + \alpha F(h)U - \gamma(hU)_{xx} - \gamma(hU)_{yy} &= 0 \quad (1) \\ h\rho UV_x + h\rho VV_y + P_y + \alpha F(h)V - \gamma(hV)_{xx} - \gamma(hV)_{yy} &= 0, \end{aligned}$$

где $F(h)$ может иметь вид

$1 = const$ для простейшего случая моделирования,
 $n(n+1)/h$ – для степенного закона распределения скоростей:

$$U = U_{cp} (z/h)^n$$

по глубине потока (водохранилища).

Уравнение неразрывности (сплошности) потока

$$(hU)_x + (hV)_y = 0 \quad (2)$$

Остановимся ниже на структуре алгоритмов и программы расчета полей скоростей стоковых течений для водохранилищ.

Используемые обозначения, ограничения и допущения.

Скорости движения воды в русловом водохранилище U и V направлены по осям X и Y .

Частные производные по пространственным координатам X , Y и t времени записываются в виде нижнего индекса у дифференцируемой функции:

$$U_x, U_y, V_x, V_y, C_x, C_y, C_t \text{ и т.п.}$$

Для разностной аппроксимации уравнений в частных производных используется прямоугольная, неравномерная сетка (X_i, Y_j) $i=1, 2, \dots, N_x$, $j=1, 2, \dots, N_y$, где шаги сетки задаются условиями:

$$dX_i = X_i - X_{i-1}; dX_{i+1} = X_{i+1} - X_i \text{ и т.п.}$$

Значения функций в узлах обозначаются сокращенной индексной записью (верхний индекс используется для временной переменной, а нижние индексы для пространственных координат):

$$U(X = x_i, y = y_j) = U_{ij}, \text{ аналогично } V_{ij}, P_{ij},$$

$$C(X = x_i, y = y_j, t = t^n) = C_{ij}^n.$$

Формирование скоростной структуры гидродинамического потока в русловом водохранилище на базе плановой модели (1)-(2) определяется взаимодействием трех силовых факторов:

- инерционные (кинематические) характеристики движущейся жидкости задаются первыми двумя членами в каждом из уравнений (1) и (2),
- диссипативное (трение) взаимодействие жидкости и дна водоема описывается четвертыми членами уравнений (1) и (2),
- диссипативное (трение) взаимодействие жидкости и береговой кромки водоема, которое описывается последними членами уравнений (1) и (2).

Граничными условиями для уравнений динамики жидкости являются уравнения, задающие скоростную структуру на всех внешних и внутренних границах области определения:

- вдоль береговых линий полагаем нулевые скорости, т.е. $U|_r = 0$ и $V|_r = 0$, в противном случае (если ограничиться только условием непротекания т.е. потребовать отсутствие нормальной составляющей скорости к контуру берега), диссипативные члены уравнений претерпевают существенное вырождение и влияния на структуру потока не окажут;

- на верхнем и нижнем бьефах (как и на возможных боковых притоках к водохранилищу) задаются известные расходы или скорости $U|_r = U_0$ и $V|_r = V_0$;

– давление F задается всего в одной (реперной) точке внутри или на границе области определения.

Алгоритм гидродинамической имитационной модели руслового водохранилища. Численное решение гидродинамической имитационной модели руслового водохранилища базируется на разделении общей задачи для уравнений (1)-(2) на две взаимосвязанные подзадачи, которые решаются последовательно (в итерационном цикле).

Выделение подзадач проводится по физическому принципу:

– □ для первой задачи в качестве основного выделяемого физического фактора выбираются диссипативные силы на контакте жидкость-дно водоема, а инерционные и вязкостные характеристики полагаются априори известными, т.е. берутся из решения второй подзадачи, которое получено на предыдущей итерации;

– □ вторая подзадача выделяет прежде всего инерционные характеристики динамического потока жидкости, а эффект взаимодействия с ложем водоема полагается известным, т.е. берется из решения первой задачи.

Формальная запись выделяемых подзадач имеет вид:
первая – считаются известными зависимости:

$$h\rho UU_x + h\rho VU_y - \gamma(hU)_{xx} - \gamma(hU)_{yy} = A(x, y) \quad (3)$$

и

$$h\rho UV_x + h\rho VV_y - \gamma(hV)_{xx} - \gamma(hV)_{yy} = B(x, y), \quad (4)$$

(для первой итерации просто полагается $A=0$ и $B=0$), тогда из (3)-(4) следует:

$$P_x = -\alpha F(h)U - A(x, y) \quad (5)$$

$$P_y = -\alpha F(h)V - B(x, y), \quad (6)$$

что с учетом уравнения неразрывности (2) сводится к задаче Пуассона для давления F :

$$(hP_x)_x + (hP_y)_y = -Ax - By \quad (7)$$

Для второй подзадачи полагаем известными F , вернее их берем из решения первой подзадачи, и получаем переопределенную систему из трех уравнений для определения (уточнения) всего двух функций U и V :

$$h\rho UU_x + h\rho VU_y + \alpha F(h)U - \gamma(hU)_{xx} - \gamma(hU)_{yy} = -P_x \quad (8)$$

$$h\rho UV_x + h\rho VV_y + \alpha F(h)V - \gamma(hV)_{xx} - \gamma(hV)_{yy} = -P_y \quad (9)$$

$$(hU)_x + (hV)_y = 0. \quad (10)$$

Первая задача аппроксимируется конечноразностным аналогом на базе схемы центральный крест:

$$\begin{aligned} & ((h_{i+1j} + h_{ij}) \cdot (P_{i+1j} - P_{ij}) - (h_{ij} + h_{i-1j}) \cdot (P_{ij} - P_{i-1j})) / (2d_x^2) + \\ & ((h_{ij+1} + h_{ij}) \cdot (P_{ij+1} - P_{ij}) - (h_{ij} + h_{ij-1}) \cdot (P_{ij} - P_{ij-1})) / (2d_y^2) = -(A_x + B_y)_{ij} \end{aligned} \quad (11)$$

и устойчиво разрешается численно различными методами, т.к. полученная система линейных алгебраических уравнений имеет явное диагональное преобладание.

В разрабатываемом программном обеспечении решение (11) реализуется методом сопряженных градиентов, т.е. исходная задача (11) заменяется эквивалентной задачей квадратичного программирования:

$$\min F(\{P_{ij}\}), \text{ где } \{P_{ij}\}$$

$$F = \sum \left[\left(\frac{(h_{i+1j} + h_{ij}) \cdot (P_{i+1j} - P_{ij}) - (h_{ij} + h_{i-1j}) \cdot (P_{ij} - P_{i-1j})}{2d_x^2} + \frac{(h_{ij+1} + h_{ij}) \cdot (P_{ij+1} - P_{ij}) - (h_{ij} + h_{ij-1}) \cdot (P_{ij} - P_{ij-1})}{2d_y^2} + (A_x + B_y)_{ij} \right)^2 \right] \quad (12)$$

Как следует из литературных источников, а так же из серии численных экспериментов, проведенных разработчиком настоящего программного обеспечения, метод сопряженных градиентов применительно для решения задачи Пуассона в десятки раз более эффективен (быстрее и точнее) методов полной или частичной релаксаций.

Поскольку вторая подзадача описывается уравнениями гиперболического типа (влияние вязкостных членов типа U_{xx} незначительно), то для ее численного решения на регулярной сетке сквозными методами (без выделения характеристических направлений) возможно использование только односторонних знакозависимых разностных аппроксимаций первых производных:

$$U_x = \begin{cases} (U_{ij} - U_{i-1j}) / dx & \text{если } U_{ij} > 0 \\ (U_{i+1j} - U_{ij}) / dx & \text{если } U_{ij} < 0 \end{cases} \quad (13)$$

$$U_y = \begin{cases} (U_{ij} - U_{ij-1}) / dx & \text{если } V_{ij} > 0 \\ (U_{ij+1} - U_{ij}) / dx & \text{если } V_{ij} < 0 \end{cases} \quad (14)$$

$$V_x = \begin{cases} (V_{ij} - V_{i-1j}) / dx & \text{если } U_{ij} > 0 \\ (V_{i+1j} - V_{ij}) / dx & \text{если } U_{ij} < 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$V_y = \begin{cases} (V_{ij} - V_{ij-1}) / dx & \text{если } V_{ij} > 0 \\ (V_{ij+1} - V_{ij}) / dy & \text{если } V_{ij} < 0 \end{cases} \quad (16)$$

Для разностной аппроксимации вязкостных членов используются центральные разности:

$$U_{xx} = (U_{i+1j} - 2 \cdot (U_{ij} - U_{i-1j})) / d_x^2 \quad (17)$$

$$U_{yy} = (U_{ij+1} - 2 \cdot (U_{ij} - U_{ij-1})) / d_y^2 \quad (18)$$

$$V_{xx} = (V_{i+1j} - 2 \cdot (V_{ij} - V_{i-1j})) / d_x^2 \quad (19)$$

$$V_{yy} = (V_{ij+1} - 2 \cdot (V_{ij} - V_{ij-1})) / d_y^2 \quad (20)$$

Разностная аппроксимация уравнения неразрывности проводится не в центральных узлах, а для ячеек сетки, т.е. на базе четырехточечных симметричных шаблонов, что порождает не $N_x N_y$ а только $(N_x - 1) \cdot (N_y - 1)$ уравнений:

$$(h_{ij} + h_{i+1j}) \cdot (U_{ij} - U_{i+1j}) / d_x + (h_{ij+1} + h_{i+1j+1}) \cdot (U_{ij+1} - U_{i+1j+1}) / d_x + \\ + (h_{ij} + h_{ij+1}) \cdot (V_{ij} - V_{ij+1}) / d_y + (h_{i+1j} + h_{i+1j+1}) \cdot (V_{i+1j} - V_{i+1j+1}) / d_y \quad (21)$$

Для регуляризации этой подзадачи формулируется ее оптимизационный аналог (минимизируются невязки уравнений для импульсов):

$$\min F(\{U_{ij}, V_{ij}\}) \quad (22) \\ \{U_{ij}, V_{ij}\},$$

где

$$F = \sum \left[(h_{ij} + h_{i+1j}) \cdot (U_{ij} - U_{i+1j}) / d_x + (h_{ij+1} + h_{i+1j+1}) \cdot (U_{ij+1} - U_{i+1j+1}) / d_x + \right. \\ \left. + (h_{ij} + h_{ij+1}) \cdot (V_{ij} - V_{ij+1}) / d_y + (h_{i+1j} + h_{i+1j+1}) \cdot (V_{i+1j} - V_{i+1j+1}) / d_y \right]^2 \quad (23)$$

а аппроксимационные зависимости (21) используются как строгие ограничивающие условия для искомого решения $\{U_{ij}, V_{ij}\}$.

Полученная таким образом задача квадратичного программирования успешно решается методом сопряженных градиентов.

Апробация численного алгоритма задачи гидродинамики проводилась на упрощенной модели водохранилища: область определения прямоугольник, глубина постоянна и равна 1. На верхнем и нижнем бьефах, которые приурочивали к противоположным концам диагонали расчетной области, задавались равные интенсивности притока и оттока.

В экспериментах проверялось влияние на формируемую структуру потоков граничных условий, задаваемых на береговых линиях (непротекания и прилипания).

Исходные данные для рабочих реальных вариантов водохранилищ готовятся в текстовых файлах.

Конфигурация области определения, т.е. границы руслового водохранилища, задаются в файле Kontur.txt на прямоугольной равномерной сетке ($dX=const$ и $dY=const$) путем пометки узлов расположенных на суше цифрой 0. Все непомеченные позиции прямоугольной области считаются внутренними расчетными узлами и должны быть взаимосвязаны, т.е. расчетная область должна быть односвязна. Размеры прямоугольной сетки для типичного варианта выбирались:

$$N_x=250 \text{ узлов, } N_y=1000 \text{ узлов}$$

Контрольные, т.е. замеренные при обследовании, значения скоростей в водохранилище задаются в файле UV.txt по формату X_i, Y_i , - координаты точки и U_i, V_i - скорости в этой точке.

Все используемые в программе координаты задаются в единой системе, которая базируется на координатной сетке исходной прямоугольной области.

Пример расчета распределения скоростей стоковых скоростей

В задачу проверки методики расчета входила оценка характера распределения скоростей течений как по акватории водохранилища, так и вдоль берега.

Опираясь на данные натуральных и лабораторных исследований, был разработан программный продукт на языке Паскаль, позволяющий производить расчеты значения скоростей и напоров потока жидкости. Поскольку при игнорировании роторной

составляющей скоростного потока $\bar{v}(\bar{o}, \bar{o})$, которая важна только при оценке процесса конвективной диффузии различных примесей, исходная модель (1)-(2) будет описывать потенциальную составляющую скоростей $\bar{v}^*(\bar{o}, \bar{o}) = gradP(x, y)$.

Введенный потенциал $P(x, y)$ позволяет свести систему из трех уравнений (1)-(2) к одному уравнению типа Лапласа:

$$\nabla(F(x, y)\nabla P) = 0 \quad (24)$$

Граничными условиями для формулы 24 являются требования непротекания на береговых линиях и задаваемый перепад отметок уровня на входном и выходном створах.

Реальные условия «прилипания» воды к береговой кромке реализуется за счет искусственного повышения шероховатости при малых глубинах, что вполне соответствует реальности.

Численное решение задач на базе уравнения 24 эффективно реализуется расщеплением по пространственным факторам, то есть путем сведения к малокритичному решению взаимозависимых одномерных задач.

В качестве «тестового» водоема было выбрано водохранилище Криницы, входящее в состав Вилейско - Минской водной системы. В качестве исходной информации по сетке координатной сетке задавались координаты контура береговой линии и глубины водоема, расчетные створы и острова. Ниже на рисунке 1 приведен результат расчета распределения скоростей в водохранилище Криницы, полученный на основе численного моделирования и построения цифровой модели водоема.

Параллельно проводились лабораторные измерения скоростей течений на не размываемых моделях водохранилищ путем использования маркера (красителя) для изучения характеристик распределения скоростей движения пятна (расстояние в единицу времени) с измерениями осредненной скорости потока жидкости микрокомпьютерным расходомером-скоростемером (МКРС).

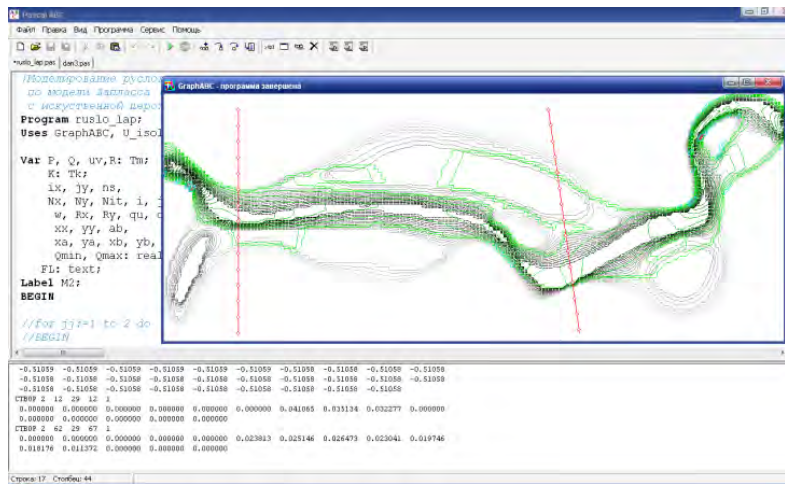


Рис. 1 Распределение скоростей течений по акватории водохранилища Криницы. Результат численного моделирования

Схема движения маркера, отображающего распределение поля скоростей на физической модели водохранилища во времени, показана на рисунке 2.



Рис. 2 Схема и динамика движения маркера во времени по жесткой модели водохранилища Криницы. Одно деление = 0,1 км

Моделирование выполнялось в гидротехнической лаборатории Белорусского национального технического университета. Модель жесткая не размываемая. Масштаб горизонтальный 1:1000, вертикальный 1:100.

Из рисунка 1 (данные компьютерного моделирования распределения скоростей) и данных лабораторных экспериментов (рисунок 2) видна их идентичность, что подтверждают данные натурных исследований деформаций береговых склонов. На участках расположения наибольших концентраций маркера, характеризующих поле максимальных скоростей на модели, в натуральных условиях происходит разрушение плит крепления и естественных берегов (абразия).



Рис. 3 Перемещение маркера по поверхности модели водохранилища Криницы

Размыв склонов происходит при постоянной отметке уровня верхнего бьефа и вызывается как ветроволновыми течениями

(поперечное распределение скоростей), так и вдольбереговыми. Подтверждением этому являются перемещения маркера по поверхности водохранилища Криницы в лабораторных условиях (рисунок 3,4).

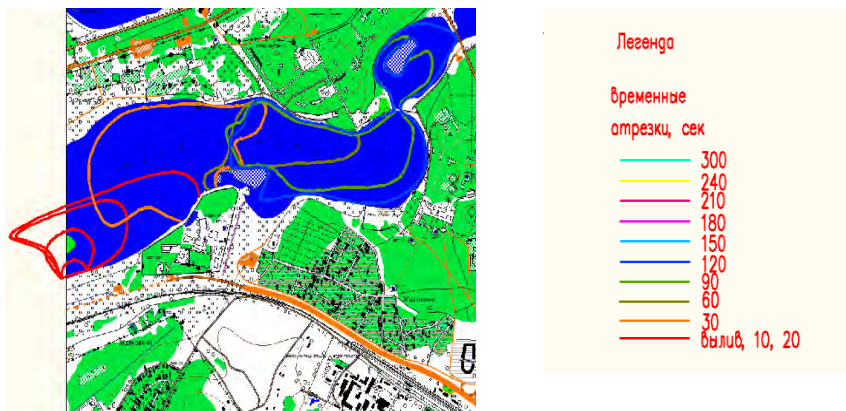


Рис. 4 Карта распределения скоростей построенная по данным физического моделирования (водохранилище Криницы)

Анализ и проверка сходимости лабораторных и натуральных данных с результатами расчетов полученных по настоящей методике с применением экспериментального программного обеспечения по уравнениям Сен-Венана (Буссинеска-Лапласа) показал, что они могут применяться на малых водохранилищах.

Апробация программного продукта показала возможным осуществление расчета распределения скоростей с погрешностью до 15 % на примере водохранилищ Вилейско-Минской водной системы, что является достаточным для инженерных расчетов, при оценке устойчивости берегозащитных сооружений креплений, отмопок и т.д. Комплексное изучение условий устойчивости откосов и берегов водохранилищ показал необходимость детального учета всех составляющих факторов и условий при проектировании берегозащитных сооружений, что повысит долговечность и эффективность конструкций и принятых конструктивных решений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Водохранилища Беларуси: справочник / М.Ю.Калинин [и др.]; под общ. ред. М.Ю.Калинина. – Минск: ОАО «Полиграфкомбинат им. Я.Коласа», 2005. – 182 с.
2. Пышкин, Б.А. Динамика берегов водохранилищ / Б.А.Пышкин. – Киев: «Наукова думка», 1973. – 416 с.
3. Кондратьев, Н.Е. Расчет ветрового волнения и переформирование берегов водохранилищ. / Н.Е.Кондратьев. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1951. – 107 с.
4. Темам, Р. Уравнения Навье – Стокса. Теория и численный анализ – 2-е изд. – Москва: Мир, 1981. – 408 с.
5. Кутепов А.М., Полянин А.Д., Запьянов З.Д., Вязьмин А.В., Казенин Д.А. Химическая гидродинамика – Москва: Квантум, 1996. – 336 с.
6. Касперов Г.И., Левкевич В.Е., Пастухов С.М., Бузук А.В., Новиков А.А. Моделирование режима стоковых течений водохранилищ на основе программных средств для оценки устойчивости берегоукрепительных сооружений // Труды БГТУ, Минск, №2 (149), 2012. с.239-240.
7. Бузук А.В., Левкевич В.Е., Новиков А.А. Математическое и гидравлическое моделирование конвективной диффузии загрязнений в русловых водохранилищах//Наука-образованию, производству, экономике. Материалы девятой международной научно-технической конференции. Минск, БНТУ, т.3. 2012. с.319-320.