

# РЕГУЛИРОВАНИЕ МЕЛИОРАТИВНЫХ РЕЖИМОВ ПОЧВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОТТОКА ДРЕНАЖНЫХ ВОД

П.В. РЯБЦЕВ, К.В. КОЛЕСНИЧЕНКО

**Ключевые слова:** мелиоративный режим, грунтовые воды, фильтрация, поровое давление.

**Keywords:** ameliorative regime, groundwater, filtration, pore pressure.

**Аннотация.** Регулирование мелиоративных режимов можно осуществлять путем создания благоприятного режима грунтовых вод: элемент общего комплекса мелиоративных мероприятий, направленных на достижение рациональной структуры водного и солевого баланса и оптимального мелиоративного режима почв. В статье рассмотрены варианты отвода избыточных дренажных вод с подтопляемой территории, применение численного моделирования для выполнения расчета скорости отвода дренажных вод и определен наиболее эффективный способ.

**Abstract.** Ameliorative regimes can be regulated by creating favourable groundwater regime: an element of the general complex of ameliorative measures aimed at achieving rational structure of water and salt balance and optimal ameliorative regime of soils. The article considers variants of excess drainage water diversion from waterlogged area, application of numerical modelling for calculation of excess drainage water diversion rate and determines the most effective method.

**Введение.** Необходимость повышения эффективности использования орошаемых и осушенных земель, получение на этих землях проектной урожайности, бережное использование водных ресурсов и земельных угодий — это одна из основных задач, стоящих в программе развития мелиорации земель. По сравнению с другими группами сельскохозяйственных мелиораций, гидротехнические в наибольшей мере определяются гидрогеологическими условиями и одновременно сами преобразуют эти условия, в связи с чем требуют детального гидрогеолого-мелиоративного прогнозирования и обоснования. В настоящее время комплексный подход к решению проблем восстановления сельскохозяйственных земель позволяет использовать различные методы исследования и восстановления агроландшафтов.

Восстановление переувлажненных сельскохозяйственных земель — это комплекс мероприятий, направленных на улучшение их агрономических свойств и восстановление продуктивности. Основной задачей является понижение уровня грунтовых вод и улучшение структуры почвы, что в свою очередь способствует созданию благоприятных условий для роста сельскохозяйственных культур.

На первом этапе необходимо провести анализ состояния земель, выявить причины переувлажнения и определить наиболее эффективные методы дренажа.

Также следует обратить внимание на агротехнические меры: внесение органических удобрений, использование специальных сортов растений и севообороты, способствующие улучшению структуры почвы. Важно внедрять методы биологической рекультивации, которые помогут восстановить естественное самообновление экосистем.

Восстановленные земли способны вновь давать высокий урожай, а также способствовать улучшению экологии в регионе. Таким образом, грамотное восстановление переувлажненных сельхозземель имеет ключевое значение для обеспечения продовольственной безопасности и устойчивого развития сельского хозяйства.

**Методы исследования.** Переувлажнение земель наносит значительный ущерб: снижается плодородие почв, урожайность сельскохозяйственных культур, а без принятия мер ситуация может усугубиться и восстановление земель будет невозможно. Данная проблема достаточно распространена на территории Краснодарского края. Наши исследования проводились в Динском районе в ООО «Олимп Кубани» на участке площадью 300 га.

Высокое залегание уровня грунтовых вод здесь является одной из причин образования так называемых «блюдца» на полях.

Регулирование режима грунтовых вод должно базироваться на детальной характеристике гидрогеологических условий, данных по существующему и прогнозируемому режимам грунтовых вод, водному и солевому балансу. Установленные баланс и типы режимов грунтовых вод определяют направленность мелиоративных мероприятий. Учитывая необходимость экономии и рационального использования оросительной воды, соответствующие мероприятия должны осуществляться в комплексе с мерами по созданию благоприятного режима грунтовых вод. Поэтому сокращение их ирригационного питания необходимо при всех гидрогеологических условиях и всех типах режима грунтовых вод. Оно достигается путем устранения фильтрации из всех звеньев оросительных систем, совер-

шенствованием поверхностных поливов (сокращение оросительных норм, поверхностного и глубинного сбросов, использование различных поливных машин, лотков, гибких и жестких поливных трубопроводов, берущих воду из закрытых водоводов). Искусственный дренаж, необходимый во всех гидрогеологических зонах, кроме естественно интенсивно дренированной. Выбор типа дренажа во многом определяется гидрогеологическими и, в частности, геофильтрационными условиями.

Гидрологический режим обусловлен главным образом влиянием рек, которые определяют сезонные и многолетние колебания уровня грунтовых вод. При этом формирование гидрологического режима зависит от того является ли река источником питания грунтовых вод, или же в период паводка создает подпор грунтовых вод, вызывая повышение их уровня.

На орошаемых и осушенных землях естественный режим грунтовых вод изменяется. При этом степень влияния техногенных факторов и формирующиеся при этом режимы грунтовых вод зависят не только от их естественного режима, а также от вида мелиораций, их технического уровня и качества эксплуатации гидромелиоративных систем. Орошение земель весьма существенно, а часто коренным образом изменяет гидрогеологические условия: интенсивность питания грунтовых вод, их взаимосвязь с нижележащими межпластовыми водоносными горизонтами, глубину их залегания и химический состав, режим, направление движения и характер разгрузки, структуру водного и солевого баланса и т. д. Нередко под влиянием орошения изменяются водно-физические, фильтрационные и другие свойства пород зоны аэрации и водонасыщенных отложений. Кроме того, происходит изменение инженерно-геологических условий под влиянием увлажнения пород оросительными водами и подъема УГВ, вызванного в результате орошения.

Существуют различные методы исследования колебания грунтовых и движения воды в почвогрунте. Авторами проведено численный анализ грунтового массива исследуемого участка с использованием математического аппарата.

Разработано три способа отведения излишней грунтовой воды:

- при проведении агротехнических мероприятий (профилирование поверхности);
- устройство дренажных каналов по периметру полей;
- устройство колодцев-поглотителей.

С учетом скорости фильтрации в грунтовом массиве при использовании программного ком-

плекса midas GTS NX выполнено численное исследование, определены основные параметры и скорость оттока грунтовой воды с полей.

Выполненный анализ математического аппарата позволил оценить процесс движения жидкости и перенос твердых частиц в грунтовом массиве.

В жидкостях, состоящих из нескольких компонентов — жидкость/частицы, где компоненты имеют разную плотность установлено, что компоненты могут принимать различные скорости потока. Различия в скорости возникают из-за того, что различия в плотности приводят к неоднородности тела. Часто различия в скоростях могут быть очень выраженными. При этом относительные скорости достаточно малы, чтобы их можно было описать как «дрейф» одного компонента через другой.

Теория «дрейфа» позволяет оценить является ли инерция, причиной дисперсного перемещения компонентов. Если инерцией относительно движения можно пренебречь, а относительную скорость свести к равновесию между движущей силой (например, гравитацией или градиентом давления) и противоположной силой сопротивления между компонентами, то можно говорить о «дрейф-потоке». Скорости дрейфа в первую очередь ответственны за перенос масса и энергии.

Идея, лежащая в основе модели «Дрейфа», заключается в том, что относительное движение между компонентами могут быть аппроксимированы как континуум, а не дискретными элементами (например, частицы). Это повышает вычислительную точность, так как необходимость отслеживания движение и взаимодействия дискретных элементов вычислять не нужно.

Формулировка относительной скорости в приближении дрейфа определяется:

$$u = f_1 u_1 + f_2 u_2. \quad (1)$$

Объемные доли двух компонентов, входящих в состав смеси, обозначаются как  $f_1$  и  $f_2$ , где:

$$f_1 + f_2 = 1. \quad (2)$$

Если предположить, что две фазы несжимаемы, то импульсное равновесие для непрерывной фазы равно:

$$\frac{\partial u_1}{\partial t} + u_1 \nabla u_1 = -\frac{1}{p_1} \nabla P + F + \frac{K}{f p_1} u_r, \quad (3)$$

в то время как для дисперсной фазы равно:

$$\frac{\partial u_2}{\partial t} + u_2 \nabla u_2 = -\frac{1}{p_2} \nabla P + F + \frac{K}{(1-f)p_2} u_r, \quad (4)$$

где  $u_1$  и  $u_2$  — представляют собой маленькие скорости непрерывной и дисперсной фаз соответственно;  $f$  — объемная доля сплошной фазы;  $\nabla u_2$  — маленькая скорость относится к скорости каждой фазы относительно небольшого, но конечного объема жидкости;  $F$  — сила тела;  $K$  — коэффициент лобового сопротивления, свя-

зывающий взаимодействие двух фаз;  $u_r$  – относительная разность скоростей между дисперсной и непрерывной фазами:  $u_r = u_2 - u_1$ . (5)

Целью модели дрейфа-потока является расчет движения двух фаз относительно усредненной по объему скорости,  $\bar{u}$ . При этом средневзвешенная по объему скорость равна:

$$\bar{u} = fu_1 + (1-f)u_2. \quad (6)$$

Выбирается средневзвешенная по объему скорость, а не по массе средняя, потому что вычитание уравнения (3) из уравнения (4) дает уравнение для относительной скорости, где  $K$  – коэффициент лобового сопротивления на единицу объема:

$$\frac{\partial u_r}{\partial t} + u_2 \nabla u_2 - u_1 \nabla u_1 = \left( \frac{1}{p_1} - \frac{1}{p_2} \right) \nabla P - \left( \frac{1}{(1-f)p_2} + \frac{1}{fp_1} \right) Ku_r. \quad (7)$$

Цель состоит в том, чтобы определить относительную скорость  $u_r$ . Если мы в дальнейшем будем использовать уравнение (7) в целом, то это будет представлять собой модель двухскоростного поля для двухкомпонентного потока.

На основании изложенного, далее для анализа движения жидкости (воды) в грунтовом массиве будем использовать закон Дарси:

$$q = k \nabla h = -kn_g + \frac{1}{\gamma_g} k \nabla p_w, \quad (8)$$

где  $q$  – скорость фильтрации;  $h$  – полный напор;  $n_g$  – единичный вектор направления действия силы тяжести;  $k$  – матрица коэффициентов фильтрации.

Закон Дарси описывает пропорциональную зависимость между скоростью фильтрации в грунтовой среде и градиентом полного напора. Изначально закон Дарси получен для водонасыщенных грунтов, но различными исследователями показано, что закон применим также и для фильтрационного потока в неводонасыщенной среде.

Для грунтового массива, обладающего фильтрацией, будем использовать матрицу коэффициентов фильтрации.

В данной матрице учитывается только диагональная компонента по каждому направлению. Под направлением здесь принято направление в системы глобальных координат грунтового массива.

$$k = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Скорость фильтрации  $q$  имеет размерность скорости, а действительная скорость фильтрационного потока в грунте представляет собой вели-

чину скорости фильтрации  $q$  деленную на пористость грунта.

Кроме этого, проведен анализ климатической характеристики участка. На основании проведенного анализа климатических характеристик необходимо констатировать, что среднегодовое количество осадков равно 641 мм. Суммы осадков год от года могут значительно отклоняться от среднего значения.

Распределение осадков в течение года довольно равномерное с некоторым преобладанием в летнее время (июнь-июль), в зимнее время – в ноябре-декабре.

Что касается сезонного распределения осадков, то оно имеет декабрьский максимум, минимум количества осадков отмечается в октябре.

Режим выпадения летних осадков, как правило, носит ливневый характер. Зимой осадки выпадают в виде дождя и мокрого снега.

Максимум числа дней с осадками наблюдается зимой, минимум в конце лета – начале осени. Зимний максимум объясняется длительными обложными осадками, а летний минимум – кратковременными ливнями. Преобладающими в течение всего года являются жидкие осадки, сильные дожди наблюдаются преимущественно в теплое время года. Суточный максимум осадков составляет 78,9 мм (август 1996 г.).

**Результаты.** По результатам лабораторных исследований фильтрационных свойств грунтового основания установлены коэффициенты фильтрации элювиальных отложений, которые варьируются в диапазоне от 0,1 до 0,6 м/сут, при этом инженерно-геологический элемент (глина легкая), который распространен повсеместно имеет коэффициент фильтрации равный 0,01 м/сут. Данные зафиксированные параметры примем к дальнейшему исследованию.

В программном комплексе строится по исходным данным, полученным на исследуемом участке расчетная модель исследуемого участка для случая отвода дренажных вод с устройством каналов по периметру полей.

Данная модель выполняется с нанесением линии существующего рельефа местности, отметок дна канала, а также уровней нормального и максимального горизонта воды. По трассе указываются расстояния между характерными точками, подписи высотных отметок, а также расположение гидротехнических сооружений. Данный профиль позволяет оценить условия самотечного движения воды, соответствие проектных отметок дна рельефу, а также правильность размещения регулирующих сооружений.

Далее осуществляются исследования параметров при соответствующих коэффициентах фильтрации элювиальных отложений равном 0,1; 0,2 и 0,6 м/сут.

Выполнено исследование на предмет определения проницаемости инженерно-геологических элементов рассматриваемого среза.

Диалоговое окно задания параметров решающей программы представлено на рис. 1.

На рис. 2 изображены результаты фильтрационного анализа в программе midas GTS NX, а именно распределение интенсивности фильтрационного потока по сечению грунтового массива.

На рисунке изображено поле фильтрационного потока в установившемся режиме. Цветовая карта показывает, как вода движется через различные инженерно-геологические элементы (ИГЭ) с разной проницаемостью.

Высокие значения потока (красные зоны) наблюдаются в более проницаемых слоях, тогда как в менее проницаемых поток ниже (зеленые/желтые зоны).

Распределение цветов по горизонтали показывает, что потенциал фильтра не однороден: наибольшее значение потока – в центральной части, сужается к краям.

Результаты расчета по распространению линий тока представлены на рис. 3.

Анализ распространения линий тока показывает, что значимый отток воды прослеживается по периметру рассматриваемого орошаемого участка, при этом по мере приближения к центру отток существенно уменьшается с дальнейшим стремлением к полному его отсутствию.

Результаты расчета оттока свидетельствуют о суммарном оттоке численно равном 0,323 м<sup>3</sup>/сут с метра погонного геологического среза мощностью 4,7 и 3,9 м соответственно, что представлено на рис. 4.

Учитывая площадь рассматриваемого орошаемого участка при выполнении численного участка равную 3 000 000 м<sup>2</sup> и количество осадков,

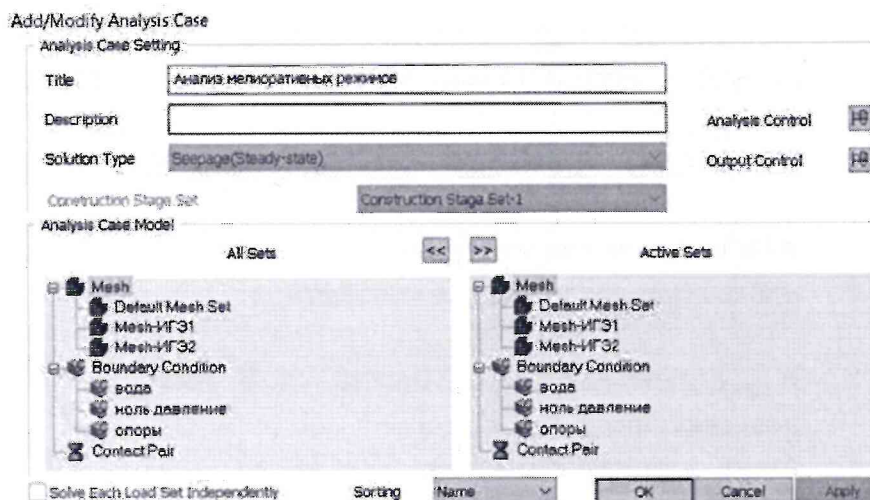


Рис. 1. Задание параметров решающей программы

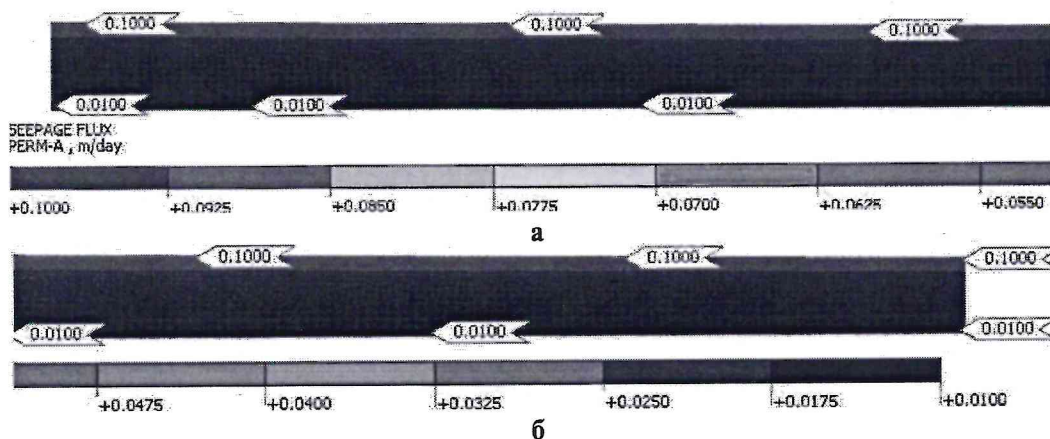


Рис. 2. Проницаемость инженерно-геологических элементов: а – левая часть поля; б – правая часть поля

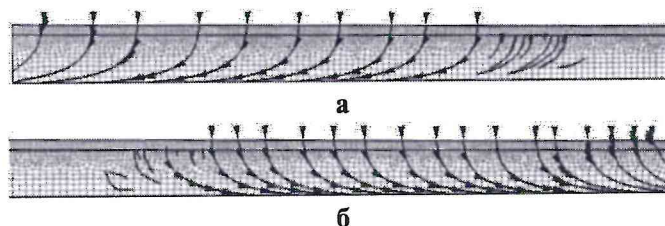


Рис. 3. Распространение линий тока: а – левая часть поля; б – правая часть поля

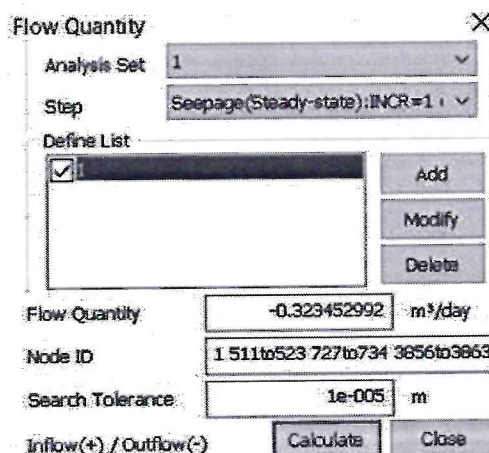


Рис. 4. Суммарный отток воды

принятое к рассмотрению – 78,9 мм. На основании представленного объема осадков, выпавших на горизонтальную площадь, будет составлять 215 397 м<sup>3</sup>. Следует, что необходимое время для фильтрационного оттока воды при коэффициенте фильтрации 0,1 м/сут будет составлять 67,3 сут.

Аналогично проведено исследование при коэффициентах фильтрации 0,2 и 0,6 м/сут и время оттока составило 37,8 и 13,8 суток соответственно. Время фильтрационного оттока рассчитано для случая при использовании агротехнических мероприятий. При тех же коэффициентах фильтрации 0,1; 0,2 и 0,6 время оттока составило 119,7; 59 и 19,9 суток соответственно. Самым эффективным оказался способ с устройством колодцев-поглотителей, здесь время оттока равно 23,7; 13,1 и 4,7 суток.

**Вывод.** Для проведения комплексного исследования изменения уровня грунтовых и скорости их отвода с участка переувлажнения выполнен расчет с использованием математического аппарата и численного алгоритма проведения вычислительных экспериментов на ЭВМ. Предложенный математический аппарат может быть использован для мониторинга и прогнозирования оттока дренажных вод с целью принятия управленческих решений и рекомендаций по проектированию мелиоративных систем двойного регулирования в рассматриваемом регионе в зависимости от гидрологических и гидродинамических параметров.

Данные получены для условий без разработки комплексных мелиораций. На данном участке рекомендована разработка осушительно-оросительной системы для поддержания в постоянном режиме оптимально водно-воздушного режима почвы с требуемой влажностью.

Применяемый математический и численный аппарат позволяет значительно сократить объем натурных исследований и свести к минимуму экспериментальные работы. Модели и алгоритмы могут быть использованы для прогнозирования процесса фильтрации воды и изменения уровня воды в толще почвогрунта, а также поможет быстро подобрать наиболее оптимальный способ эффективного удаления избыточных дренажных вод с участка подтопления.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Groundwater level management in a reclamation system / K. Kolesnichenko, A. Khadzidhi, A. Novikov, L. Kravchenko // BIO Web of Conferences. 2024. Vol. 113. P. 04016. DOI 10.1051/bioconf/202411304016.
2. Дмитриев С.И., Нечаев В.К. К вопросу о применимости уравнения диффузии для изучения явления влагопроводности в почвогрунтах // Тр. ЛГМИ, 1962. Вып.13. С. 247–265.

3. Каложный И.Л., Павлова К.К. Экспериментальные исследования процесса водоотдачи почвы при различных скоростях изменения уровня грунтовых вод // Вопросы гидрофизики почв : труды ГГИ. Вып. 268 Л., 1980. С. 39–50.

4. Мокеев В.В. Многофакторный интеллектуальный динамический анализ систем // Управление инвестициями и инновациями. 2015. № 2. С. 18–27. EDN VPWNAX.

5. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / Пер. с англ. (1980). М.: Энергоатомиздат, 1984. 152 с.

6. Патент № 2492292 С1 Российская Федерация, МПК E02B 3/02, E02B 3/04. Способ охраны земель прибрежных ландшафтов рек: № 2012101379/13: заявл. 16.01.2012: опубл. 10.09.2013 / Е.В. Кузнецов, Х.И. Килиди, А.Е. Хаджиди; заявитель ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный аграрный университет».

7. Ященко К.В., Алхаттер С. Регулирование уровня грунтовых вод для охраны земель от подтопления и иссушения // Научное обеспечение агропромышленного комплекса: сборник статей по материалам IX Всероссийской конференции молодых ученых, г. Краснодар, 24–26 ноября 2015 г. / Отв. за выпуск: А.Г. Кошцаев. Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет, 2016. С. 908–909.

#### REFERENCES

1. Groundwater level management in a reclamation system / K. Kolesnichenko, A. Khadzidhi, A. Novikov, L. Kravchenko // BIO Web of Conferences. 2024. Vol. 113. P. 04016. DOI 10.1051/bioconf/202411304016.
2. Dmitriev S.I., Nechaev V.K. On the applicability of the diffusion equation for studying the phenomenon of moisture conduction in soils // Proc. of LSMI, 1962. LHMI, 1962. Issue 13. P. 247–265.
3. Kalyuzhny I.L., Pavlova K.K. Experimental studies of the soil water drainage process at different rates of groundwater level change // Problems of soil hydrophysics: proceedings of the State Geological Institute. Вып. 268. Л., 1980. С. 39–50.
4. Mokeev V.V. Multifactor intelligent dynamic analysis of systems // Investment and Innovation Management. 2015. № 2. С. 18–27. EDN VPWNAX.
5. Patankar S. Numerical methods for solving problems of heat transfer and fluid dynamics. Per. s engl. (1980). М.: Energoatomizdat, 1984. 152 с.
6. Patent No. 2492292 C1 Russian Federation, МПК E02B 3/02, E02B 3/04. Method of land protection of coastal landscapes of rivers: No. 2012101379/13: avv. 16.01.2012: published 10.09.2013 / E.V. Kuznetsov, H.I. Kilidi, A.E. Khadzidhi ; applicant FSBEI of Higher Professional Education 'Kuban State Agrarian University'.
7. Yashchenko K.V., Alkhatter S. Regulation of groundwater level to protect land from waterlogging and desiccation // Scientific support of agroindustrial complex: collection of articles on the materials of IX All-Russian conference of young scientists, Krasnodar, 24–26 November 2015 / Resp. for the issue: A.G. Koschaev. Krasnodar: Kuban State Agrarian University, 2016. С. 908–909.

**Рябцев Павел Васильевич**, врио директора, *astramelio@yandex.ru* (ФГБУ «Управление «Астраханмелиоводхоз», г. Астрахань, Россия); **Колесниченко Кристина Вадимовна**, ст. преподаватель кафедры гидравлики и сельскохозяйственного водоснабжения, *kris\_kolesnichenko@inbox.ru* (ФГБОУ ВО «Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина», г. Краснодар, Россия).