

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРИНЦИПОВ ГИДРОМЕХАНИКИ В РЕШЕНИИ ПРОБЛЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ

Борис Михайлович Кумицкий¹
Наталья Александровна Саврасова²
Дмитрий Николаевич Афоничев³

¹Воронежский государственный технический университет

²Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)
Министерства обороны Российской Федерации

³Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I

Программы социального развития, принятые во всех субъектах РФ, а также продолжение взятого курса на рост сельскохозяйственного производства ставят задачи научного подхода к развитию централизованного водоснабжения села. Одними из главных составляющих централизованной системы водоснажения являются различного рода резервуары, регулирующие запасы питьевой и технической воды, а также емкости очистных сооружений. Эффективность работы указанных объектов характеризуется такими гидромеханическими параметрами, как скорость и время опорожнения, а также объемный расход, которые в свою очередь зависят от геометрии емкости. Целью проведенных исследований являлось установление связей между физическим содержанием процесса опорожнения резервуара и его геометрической формой. В качестве объекта исследования выбраны сосуды, поверхность которых образована вращением кривой второго порядка, в частности имеющей форму параболоида вращения. Решение данной задачи проводится в рамках разработанной гидродинамической модели, в основе которой лежит представление о движении частицы идеальной жидкости по искривленной трубке тока, являющейся составной частью потока. Показано, что свободная поверхность при истечении жидкости из сосудов такой геометрии деформируется («прогибается»), подобно воронке выпуска из-за неравномерного распределения по поверхности осевой составляющей скорости течения. Получено уравнение свободной поверхности. Установлено, что пристеночная граница свободной поверхности снижается с постоянной скоростью в процессе истечения, что и наблюдается в практических случаях. Предлагаемая гидродинамическая модель применима к решению прикладных и фундаментальных задач гидравлики и динамики жидкостей, а полученные на ее основе материалы исследования могут быть использованы в сельском хозяйстве для повышения энергоэффективности систем водоснабжения и водоотведения.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: гидродинамическая модель, трубка тока, водоснабжение, параболоид вращения, напор, расход.

ADOPTION OF HYDROMECHANICS PRINCIPLES IN SOLVING THE PROBLEMS OF WATER SUPPLY OF AGRICULTURAL PRODUCERS

Boris M. Kumitsky¹
Natalia A. Savrasova²
Dmitriy N. Afonichev³

¹Voronezh State Technical University

²Military Educational and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky
and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation

³Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great

Comprehensive Economic and Social Development Programs adopted in all regions of the Russian Federation, as well as the continuation of the undertaken course on the growth of agricultural production, set the task of a scientific approach to the development of rural centralized water supply. In order to implement centralized water supply specialists use various storage tanks for drinking, industrial and waste water. The performance of these objects is characterized by hydromechanical parameters such as speed and time of emptying, and KV value, which, in their turn, depend on the geometry of the container. The aim of the conducted studies was revealing correlations between the physics of the process of tank emptying and its geometric configuration. The objects of research were vessels the surface of which was formed by revolution of a second-order curve, in particular, a

paraboloid of revolution. In order to address the challenge adequately the authors developed a hydrodynamic model using the idea of the motion of a particle of an ideal fluid along a curved current tube, which is an integral part of the flow. It is defined that the free surface becomes deformed with the outflow of the fluid from the vessels of the form under investigation. Such deflection occurs similar to emptying funnel because of the uneven distribution of the flow velocity along the axial component. The authors derive free water surface equation and defined that free surface boundary decreases at a constant rate during the process of outflow (the described phenomenon usually is registered in practice). The authors' hydrodynamic model can be useful at solving applied and fundamental problems of hydraulics and dynamics of fluids, and the results of research obtained on this basis can be used in agriculture as a tool for energy efficiency improvement of water and sanitation systems.

KEYWORDS: hydrodynamic model, tube of current, water supply, paraboloid of revolution, water pressure, water flow.

В настоящее время в Российской Федерации централизованным водоснабжением охвачено 73 тыс. населенных пунктов, в которых проживает 75% сельского населения страны [4]. В то же время проводимые на селе экономические реформы оставили централизованную систему водоснабжения без должного обслуживания, поэтому более 50% указанных систем нуждаются в техническом улучшении, реконструкции и восстановлении [19]. Сегодня, благодаря государственным целевым программам, таким как «Чистая вода» (постановление Правительства РФ от 22.12.2010 № 1092); «Устойчивое развитие сельских территорий на 2015–2017 годы и на период до 2020 года» (постановление Правительства РФ от 16 января 2015 № 17), эти процессы набирают ход [15, 16]. Научный подход к модернизации, как показала практика, способен не только обеспечить село качественной водой, но и может дать реальную экономию за счет снижения энергопотребления [20, 22, 24, 25, 26].

Как известно, основными объектами сельскохозяйственного водоснабжения и водоотведения являются: жилищно-коммунальный сектор, животноводческие фермы, агропромышленные предприятия, а неотъемлемыми элементами всех перечисленных комплексов являются аккумуляторы чистой и технической воды (резервуары) и емкости очистных сооружений. Истечение жидкости из резервуара при переменном напоре представляет собой случай неустановившегося движения, когда изменяются параметры потока (расход, скорость, давление), а уравнение Бернули, в общем случае, неприменимо. При этом наиболее существенной технологической операцией является опорожнение, которая рассматривается как самостоятельная гидравлическая задача [5, 27, 28].

Интенсивное развитие традиционных и новых отраслей современного производства, таких как безопасность энерго- и гидротехнического оборудования, оптимизация процессов искусственного орошения, надежность водоочистительных сооружений, вызывает повышенный интерес к теоретическому исследованию задач истечения жидкости из резервуаров через донные отверстия и насадки [3, 7, 8, 9, 11, 12, 13]. Сложность экспериментального измерения гидродинамических характеристик большинства перечисленных технологических процессов приводит к необходимости построения аналитических решений и оценок различных стадий процесса истечения жидкостей. Так как резервуары являются наиболее распространенными хранилищами жидкости, в том числе воды, то актуальной является проблема комплексного анализа гидродинамического состояния резервуаров с отверстиями.

В современной литературе описаны различные физико-механические модели неустановившегося истечения и методы решения [3, 9, 12, 13, 14, 21]. При опорожнении резервуаров через донные отверстия, особенно при малых напорах, над отверстиями могут возникать воронки, создаваемые вращением жидкости вокруг оси, проходящей через центр сливного отверстия (интенсивная воронка) [3, 6, 7, 8, 10, 23]. Предполагается, что причиной воронкообразования может служить неконсервативность массовых сил, которая может быть разрушена силами Кориолиса, а также из-за наличия вязкости и асимметричного подвода жидкости к отверстию. Модель самопроизвольного воронкообразования подтверждается экспериментально, причем получена эмпирическая формула для определения критического напора, при котором происходит прорыв воздушного ядра воронки в донное отверстие [6, 18, 27, 28].

В работе [17] предложена гидродинамическая модель движения жидкости и газа по спирали на поворотном участке тракта. В этом случае векторы линейной и угловой скоростей совпадают. Причем частицы жидкости перемещаются по винтовым линиям тока, которые являются вихревыми, т.е. частицы вращаются вокруг линий тока.

Однако все предложенные математические модели в перечисленных работах носят описательный характер, направленный в основном на решение основной задачи истечения – определение времени опорожнения, и не затрагивают связи физического содержания процесса и геометрической формы резервуара. Отсутствуют данные о процессах истечения из емкостей параболической формы, хотя экспериментальные результаты указывают на существенную особенность опорожнения такого рода сосудов [2]: процесс истечения при переменном напоре сопровождается постоянной скоростью снижения уровня свободной поверхности.

Целью проведенных исследований являлась разработка гидродинамической модели, которая бы смогла объяснить именно этот гидродинамический «парадокс», заключающийся в равномерном снижении свободной поверхности жидкости при истечении ее из донного отверстия резервуара параболической формы, и на ее основе объяснить взаимосвязь процесса опорожнения с геометрической формой сосуда.

Для этого рассмотрим резервуар, образованный произвольной поверхностью вращения вокруг вертикальной оси, предварительно заполненный идеальной жидкостью. Также рассмотрим объем идеальной жидкости, образованный произвольной поверхностью вращения вокруг вертикальной оси. При этом свободная поверхность является функцией от дна сосуда с отверстием диаметра d (рис. 1). Если в начальный момент времени высота уровня жидкости H_0 , площадь горизонтального сечения на высоте h равна $S(h)$, а площадь донного отверстия s_0 , то скорость истечения определяется известной формулой Торричелли

$$v = \varphi \sqrt{2gh}, \quad (1)$$

где φ – коэффициент скорости, который будем считать равным единице;
 g – ускорение свободного падения, м/с^2 .

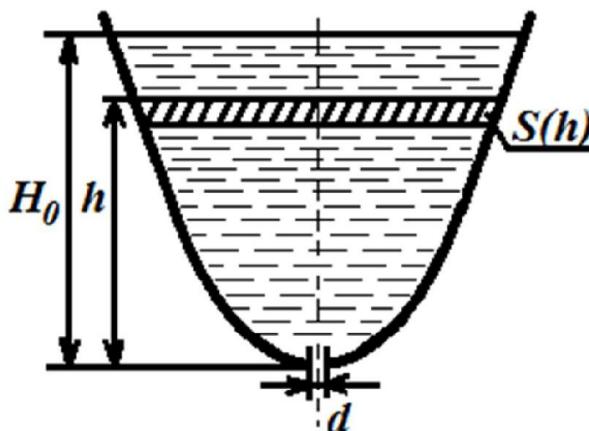


Рис. 1. Сосуд с идеальной жидкостью, образованный произвольной поверхностью вращения с начальной высотой заполнения H_0 и диаметром донного отверстия d

Предполагая, что за время dt уровень жидкости понижается равномерно, процесс истечения описывается дифференциальным уравнением [28]

$$\frac{dh}{dt} = -\frac{s_0}{S(h)} \sqrt{2gh}, \quad (2)$$

где $\frac{dh}{dt} = v_z$ – скорость снижения уровня жидкости при опорожнении, м/с .

Если предположить, что $v_z = \text{const}$, то из (2) следует пропорциональность.

$\sqrt{h} \sim S(h)$. Такому условию удовлетворяет сосуд формы параболоида вращения четвертого порядка [24], что находит свое подтверждение в практике пользования древнегреческими водяными часами [2].

$$h = \frac{\pi^2 v^2}{2 g s_0^2} r^4 ,$$

где r – радиус донного отверстия, м.

Теоретическое обоснование особенности опорожнения резервуара параболической формы, получение основных аналитических зависимостей истечения и проведение их численного сравнительного анализа с емкостями другой геометрии и является основной задачей исследования.

Решение поставленной проблемы проведем на основе предложенной гидродинамической модели, в основе которой лежит представление о течении искривленных элементарных струек. Для этого поток жидкости в параболоиде представим как совокупность трубок тока (элементарных струек), кривизна которых уменьшается от стенок к оси симметрии сосуда, и рассмотрим процесс в одной из них (рис. 2).

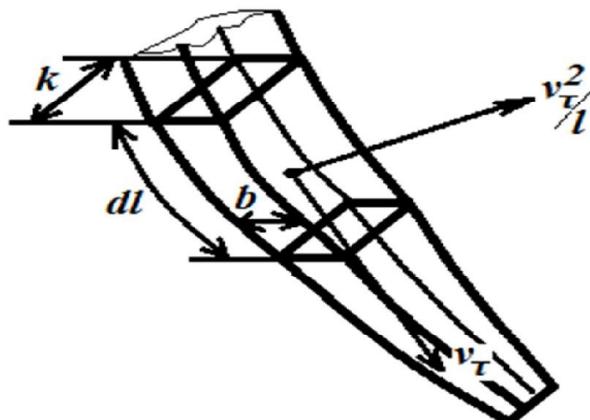


Рис. 2. Схема движения частицы жидкости объемом $b \times k \times dl$ в криволинейной трубке тока прямоугольного поперечного сечения:

$\frac{v_t^2}{l}$ – центростремительное ускорение, $\text{м}/\text{с}^2$; v_t и l – связанные с частицей соответственно тангенциальная составляющая скорости и радиус кривизны

Если осевая линия трубы тока представляет собой прямую, то частица жидкости может иметь ускорение только в направлении оси трубы [25], поэтому давление должно быть одинаковым в любом сечении у противоположных стенок трубы. В тех местах, где осевая линия искривляется, частица обладает центростремительным ускорением, поэтому на нее должна действовать сила, расположенная в плоскости закругления и направленная перпендикулярно к линии тока

$$dF = \rho b k \frac{v_t^2}{l} dL , \quad (3)$$

где ρ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$;

L – длина частицы жидкости, м.

Такую силу может создать только разность давлений p_2 и p_1 на противоположных сторонах трубы в плоскости закругления, которая равна

$$(p_2 - p_1) k dL = \rho b k \frac{v_t^2}{l} dL . \quad (4)$$

Проведя сокращения и предполагая, что трубка тока достаточно тонка, получим

$$\frac{dp}{dl} = \rho \frac{v_t^2}{l}, \quad (5)$$

где l – радиус кривизны линии тока, м.

Равенство (5) означает, что при искривлении трубы тока давление изменяется поперек нее, причем падение давления $\frac{dp}{dl}$ происходит к центру кривизны.

Если заменить в (5) тангенциальную составляющую скорости частицы на окружную ω , получим выражение

$$\frac{dp}{dl} = \rho \omega^2 l.$$

Его можно проинтегрировать

$$p_2 - p_1 = \frac{\rho \omega^2}{2} l^2. \quad (6)$$

Выражение (6) показывает рост давления пропорционально квадрату радиуса кривизны, а это означает, что осевая составляющая скорости течения жидкости распределяется по свободной поверхности неравномерно, уменьшаясь от оси симметрии к стенке сосуда. Это приводит к деформации свободной поверхности, которая принимает форму, подобную первой стадии вихревой воронки выпуска [1].

Представим поток жидкости параболоидом вращения, плоское осевое сечение которого изображено на рисунке 3, как совокупность осесимметрично распределенных элементарных струек с уменьшающейся кривизной от стенки сосуда к оси симметрии.

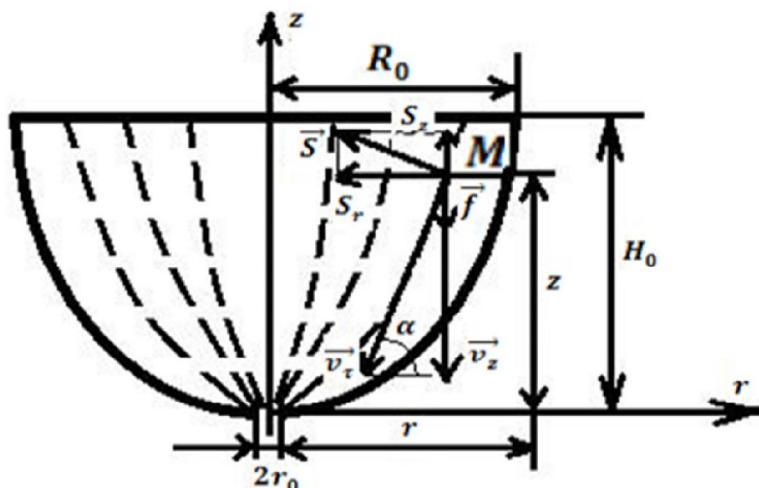


Рис. 3. Принципиальная схема движения частицы жидкости M под действием приложенных сил: тяжести f и давления $S = \text{grad } p$ в произвольно выбранной трубке тока, составляющей несимметричный поток: H_0 – максимальная высота жидкости относительно плоскости донного отверстия радиуса r_0 ; R_0 – максимальный радиус параболоида вращения, м; z, r – текущие координаты, м; v_t и v_z – соответственно тангенциальная и осевая скорости, м/с

Рассмотрим частицу жидкости M с координатами r, z , нагруженную объемными плотностями массовой силой ρg , поверхностной – $\text{grad } p$ (рис. 3) и воспользуемся основным уравнением гидродинамики Эйлера для идеальной жидкости, которое в проекции на ось z имеет вид

$$g - a_z = \frac{v_t^2}{l} \cos \alpha = \frac{v_t^2}{r} \cos \alpha \sin \alpha = \frac{v_z^2 \cos \alpha}{r \sin \alpha}, \quad (7)$$

где a_z – зависящая от текущего радиуса осевая составляющая ускорения частицы, $\text{м}/\text{с}^2$;

α – угол между касательной в точке и горизонтальной поверхностью, рад.

Проведя сокращения и учитывая, что $\operatorname{tg}\alpha = \frac{dz}{dr}$, получим дифференциальное уравнение плоского сечения деформированной свободной поверхности

$$g - a_z = \frac{v_z^2}{r} \cdot \frac{dr}{dz}. \quad (8)$$

$$a_z = g \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right), \quad (9)$$

где R – зависящий от координаты z радиус параболоида, м.

Выражение (9) удовлетворяет экспериментальному факту – снижению уровня жидкости с постоянной скоростью $a_z(R) = 0$.

Подставляя (9) в (8), получим уравнение с разделяющимися переменными

$$\frac{dz}{z} = \frac{2(R^2 - r^2)}{r^2} dr. \quad (10)$$

Его можно проинтегрировать

$$\ln(zr^2) = -\frac{R^2}{r^2} + C. \quad (11)$$

Постоянная интегрирования C находится из условия $z = H$ при $r = R$, тогда окончательно уравнение плоского сечения свободной поверхности будет иметь вид

$$z = H \frac{R^2}{r^2} \exp\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right), \quad (12)$$

где H – высота невозмущенной свободной поверхности, м.

Для всех $r_0 \leq r \leq R$, где r_0 – радиус донного отверстия, м.

При определении расхода жидкости по формуле $Q = s_0 \sqrt{2gz}$ величина z приобретает смысл средней величины, поэтому найдем среднее значение (12) по формуле

$$\langle z \rangle = \frac{1}{R - r_0} \int_{r_0}^R H \frac{R^2}{r^2} \exp\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) dr. \quad (13)$$

После интегрирования и соответствующих сокращений получим выражение

$$\langle z \rangle = H \left(\frac{r_0}{R} \right)^2. \quad (14)$$

Формула расхода приобретает вид

$$Q = \frac{s_0 r_0}{R} \sqrt{2gH}. \quad (15)$$

Кроме объемного расхода можно получить основную гидротехническую характеристику истечения – время опорожнения T по формуле

$$T = \frac{H_0}{v_z}. \quad (16)$$

Составляющая скорости v_z определяется выражением (2).

$$v_z = \frac{s_0}{\pi r^2} \sqrt{2gz} = const.$$

Так как по условию задачи $v_z = const$, то она справедлива для любых значений r и z , в том числе и для R_0 и H_0 :

$$v_z = \frac{s_0}{S(R_0)} \sqrt{2gH_0}. \quad (17)$$

Используя формулу (17), получаем окончательное выражение для времени опорожнения резервуара

$$T = \frac{H_0 S}{s_0 \sqrt{2gH_0}} = \frac{S}{s_0} \sqrt{\frac{H_0}{2g}}. \quad (18)$$

Следует заметить, что криволинейность поверхности вращения, какой является поверхность параболоида, влияет на длительность опорожнения. Так, например, при сравнении конического и параболического сосудов при равных основных геометрических радиусах: H_0 , r_0 , R_0 , время истечения из конуса в 2,5 раза меньше, чем из параболоида, хотя объем конуса при этом меньше объема параболоида всего лишь в 1,5 раза.

Выводы

1. Разработана гидродинамическая модель движения частиц идеальной жидкости по искривленным трубкам тока, являющихся совокупностью осесимметричного потока, позволяющая объяснить:

а) причину равномерного снижения уровня жидкости при переменном напоре в сосудах формы параболоида вращения;

б) эффект деформации свободной поверхности и получить уравнение плоского осевого сечения этой поверхности.

2. Показано, что «прогиб» свободной поверхности возникает из-за неравномерного распределения вертикальной составляющей скорости истечения, которая, в свою очередь, является действием градиента давления в криволинейных трубках тока.

3. Получены аналитические зависимости основных гидродинамических параметров истечения жидкости из донного отверстия сосудов типа параболоида вращения. Сравнивается время опорожнения с резервуарами другой геометрической формы.

4. Результаты исследования могут быть использованы специалистами, работающими на объектах агропромышленного комплекса, в частности реализующими процессы искусственного орошения земель. Кроме того, элементы предложенной гидродинамической модели могут быть использованы при решении фундаментальных и прикладных задач механики сплошной среды, а также в учебном процессе при освоении курсов гидравлики и механики жидкости.

Библиографический список

1. Аладьев В.З. Классические однородные структуры. Клеточные автоматы : монография / В.З. Аладьев. – Таллинн : Fultus™Books, 2009. – 535 с.
2. Амелькин В.В. Дифференциальные уравнения в приложениях / В.В. Амелькин. – Москва : Наука, 1987. – 160 с.
3. Беляев И.М. К вопросу воронкообразования без вращения при сливе через донные отверстия / И.М. Беляев, Г.С. Шандоров // Гидромеханика. – 1965. – Вып. 2. – С. 171–188.
4. Водоснабжение сельской местности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://planetaklimat.ru> (дата обращения: 17.01.2019).
5. Дзюбо В.В. Водоочистные системы для индивидуального дома / В.В. Дзюбо, Л.И. Алферова, В.И. Черкашин // Сельское строительство. – 1998. – № 1. – С. 35–37.
6. Зотов В.А. Математическое моделирование процесса истечения жидкости из резервуара / В.А. Зотов // Математическое моделирование и информационные технологии в сфере обслуживания потребителей : матер. III Межвузовской научно-практической конференции (г. Сочи, 10–12 мая 2007 г.). – Сочи : СГУТ и КД, 2007. – С. 45–46.
7. Исакян С.М. О воронкообразовании при осесимметричном истечении жидкости из донных отверстий / С.М. Исакян // Известия АН Армянской ССР. – 1969. – Т. 6. – С. 257–265.
8. Калашник М.В. Формирование вихревой воронки стоком массы в модели мелкой воды / М.В. Калашник // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2004. – № 2. – С. 120–132.
9. Калинкин А.А. Гидродинамическое моделирование формирования и истечения высоконапорной свободной жидкостной струи / А.А. Калинкин // Интеллектуальные системы в производстве. – 2006. – № 2. – С. 84–103.
10. Карликов В.П. К проблеме воронкообразования при истечении жидкости из сосудов / В.П. Карликов, А.В. Розин, С.Л. Толоконников // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2008. – № 3. – С. 140–151.

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

11. Крамаренко В.В. Гидравлика. Методические материалы по курсу «Гидравлика» для студентов II курса, обучающихся по направлению 280302 «Комплексное использование и охрана водных ресурсов». Ч. I / В.В. Крамаренко, О.Г. Савичев. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 112 с.
12. Кумицкий Б.М. Исследование вязкости аномальных жидкостей методом ротационной вискозиметрии / Б.М. Кумицкий, Н.А. Саврасова // Инженерные системы и сооружения. – 2014. – № 4–3 (17). – С. 198–201.
13. Лаврентьев М.А. Проблемы гидродинамики и их математические модели / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. – Москва : Наука, 1973. – 416 с.
14. Мингалеева Г.Р. Механика движения жидкости и газа по спирали на участках крупного поворота тракта / Г.Р. Мингалеева // Письма в Журнал технической физики. – 2002. – Т. 28. – Вып. 15. – С. 79–85.
15. О внесении изменений в федеральную целевую программу «Устойчивое развитие сельских территорий на 2014–2017 годы и на период до 2020 года» : Постановление Правительства РФ от 16 января 2015 г. № 17 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70748296/> (дата обращения: 04.12.2018).
16. О федеральной целевой программе «Чистая вода» на 2011–2017 годы : Постановление Правительства РФ от 22.12.2010 № 1092 (ред. от 25.05.2016) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://legalacts.ru/doc/postanovlenie-pravitelstva-rf-ot-22122010-n-1092/> (дата обращения: 04.12.2018).
17. Павельев А.А. Эксперимент по формированию вихря при вытекании жидкости из бака / А.А. Павельев, А.А. Штарев // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2001. – № 5. – С. 203–207.
18. Поликовский В.И. Воронкообразование в жидкости с открытой поверхностью / В.И. Поликовский, Р.Т. Перельман. – Москва : Госэнергоиздат, 1959. – 191 с.
19. Пупырев Е.Н. Технологические регламенты и качество питьевой воды в России / Е.Н. Пупырев // Водоснабжение и санитарная техника. – 2007. – № 2. – С. 6–13.
20. Раинкина Л.Н. Техническая гидромеханика в вопросах и задачах : учеб. пособие / Л.Н. Раинкина. – Москва : Изд-во «Нефть и газ», 2008. – 253 с.
21. Реологическое моделирование истечения жидкости при переменном напоре из вертикального трубопровода / Б.М. Кумицкий, С.Г. Тульская, И.А. Апарина, М.А. Сарычев // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. – 2017. – Вып. 4 (9). С. 19–23.
22. Рожков А.Н. Водоснабжение и водоотведение в сельском хозяйстве / А.Н. Рожков // Сантехника, отопление, кондиционирование. – 2010. – № 9 (105). – С. 24–25.
23. Русанов Н.А. Расчет времени самотечного слива светлых нефтепродуктов на автозаправочных станциях / Н.А. Русанов, Д.Н. Китаев // Градостроительство. Инфраструктура. Коммуникации. – 2017. – № 2 (7). – С. 66–72.
24. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. 1. Механика / Д.В. Сивухин. – Москва : Наука, 1979. – 520 с.
25. Стрелков С.П. Механика : учеб. пособие / С.П. Стрелков. – 2-е изд., перераб. – Москва : Наука, 1965. – 528 с.
26. Франс Д. Математические модели в сельском хозяйстве / Д. Франс. – Москва : Агропромиздат, 1987. – 400 с.
27. Штарев А.А. Экспериментальное исследование расхода при нестационарном истечении жидкости из заполненной емкости / А.А. Штарев // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2005. – № 2. – С. 113–121.
28. Штеренлихт Д.В. Гидравлика : учебник для вузов / Д.В. Штеренлихт. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва : КолосС, 2005. – 655 с.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ Принадлежность к организации

Борис Михайлович Кумицкий – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и нефтегазового дела ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», Россия, г. Воронеж, e-mail: boris-kum@mail.ru.

Наталья Александровна Саврасова – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры физики и химии ФГКВОУ ВО «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) Министерства обороны Российской Федерации, Россия, г. Воронеж, e-mail: savrasova-nataly@mail.ru.

Дмитрий Николаевич Афоничев – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой электротехники и автоматики ФГБОУ ВО «Воронежский государственный аграрный университет имени императора Петра I», Россия, г. Воронеж, e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Дата поступления в редакцию 10.03.2019

Дата принятия к печати 15.04.2019

AUTHOR CREDENTIALS Affiliations

Boris M. Kumitsky, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, the Dept. of Heat and Gas Supply and Oil & Gas Business, Voronezh State Technical University, Russia, Voronezh, e-mail: boris-kum@mail.ru.

Natalia A. Savrasova, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, the Dept. of Physics and Chemistry, Military Educational and Scientific Center of the Air Force N.E. Zhukovsky and Y.A. Gagarin Air Force Academy (Voronezh) the Ministry of Defence of the Russian Federation, Russia, Voronezh, e-mail: savrasova-nataly@mail.ru.

Dmitriy N. Afonichev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Dept. of Electrical Engineering and Automation, Voronezh State Agrarian University named after Emperor Peter the Great, Russia, Voronezh, e-mail: et@agroeng.vsau.ru.

Received March 10, 2019

Accepted April 15, 2019