

УДК 627.13

О.В. Павлова, В.С. Боровков
ФГБОУ ВПО «МГСУ»

АНАЛИЗ УСЛОВИЙ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АЭРАЦИИ ОТКРЫТЫХ ПОТОКОВ

Рассмотрены условия возникновения аэрации в открытых бурных потоках и описаны проблемы гидравлического моделирования при проектировании водосбросных сооружений. Проанализировано влияние поверхностного натяжения, глубины потока, уклона дна на число Фруда, соответствующее началу аэрации, определяемое по критерию начала аэрации Войнич-Сяноженцкого. Анализ позволил установить, что величина поверхностного натяжения начинает влиять на критерий начала аэрации при глубинах потока менее 0,2 м.

Ключевые слова: аэрация открытых потоков, критерий начала аэрации, коэффициент поверхностного натяжения, моделирование аэрированных потоков.

При движении бурных открытых потоков наблюдается аэрация, т.е. насыщение водных масс воздухом. Процесс аэрации начинается в результате нарушения поверхности жидкости волновыми образованиями вследствие неустойчивости волновой формы движения на поверхности бурного открытого потока. Проникание воздушных пузырьков в поток происходит при схлопывании каверн, образующихся на поверхности потока за счет пульсации вертикальной составляющей скорости движения водных масс в поверхностном слое, а также при обрушении волн, когда кинетической энергии вертикально перемещающихся водных масс достаточно для преодоления работы сил поверхностного натяжения [1].

Причиной процесса возмущения поверхности открытого потока является выход на поверхность турбулентного пограничного слоя, сопровождающийся пульсациями скорости [2, 3]. Развитие турбулентного пограничного слоя на всю толщу движущейся жидкости определяет переход потока из спокойного состояния в бурное, что численно принято характеризовать критическим числом Фруда, значение которого определяют с использованием энергетической и волновой трактовки критического режима течения [4]. Поэтому многие исследователи определяли критерий начала аэрации через некоторое число Фруда, соответствующее возникновению процесса аэрации в бурном открытом потоке.

Возмущения на поверхности жидкости, имеющие сложную пространственную структуру, приводят к возникновению и развитию аэрации в поверхностных слоях. В некоторых случаях пузырьки воздуха могут распространяться на всю глубину потока. Явление аэрации необходимо учитывать при расчете водосбросных гидротехнических сооружений. Динамическая неустойчивость бурных открытых потоков определяет некоторые особые формы движения жидкости на водосбросах высоконапорных гидроузлов: образование системы «катающихся волн» на быстротоках достаточно большой протяженности, дискретное движение водных масс при сбросе потоков с гребней высоких плотин, либо с

носка-трамплина, явление гидравлического прыжка. Адекватное качественное и количественное прогнозирование форм потери устойчивости водного потока необходимо для улучшения условий эксплуатации и увеличения срока службы проектируемых гидротехнических сооружений [5]. Воздухововлечение в поток может значительно увеличить его глубину, что негативно сказывается на работе безнапорных тоннелей (занапоривание), если степень аэрированности водного потока и образование стоячих волн при расчете не учитывались. Также при аэрации водного потока изменяется картина динамических нагрузок на дно и стенки водосброса, что может повлечь за собой разрушение обделки водосброса [6, 7].

При проектировании конструкций водосбросных сооружений для проверки тех или иных инженерных решений проводятся их лабораторные испытания. Как показывают отечественные и зарубежные исследования, гидравлическое моделирование водосбросных сооружений согласуется с результатами натурных наблюдений только при моделировании неаэрированных потоков. Для сильно аэрированных потоков результаты натурных и лабораторных исследований существенно различаются, что снижает возможности проверки проектных решений моделированием [8, 9].

Также при гидравлическом моделировании аэрированных потоков была обнаружена «невоспроизводимость» процесса аэрации в лабораторных условиях, т.е. при соблюдении геометрического и динамического подобия аэрация на модели не возникает. Таким образом, можно сделать вывод: при моделировании аэрированных водных потоков соблюдение геометрического и динамического подобия модели натурному объекту является необходимым, но не достаточным условием возникновения аэрации.

Для определения начала возникновения аэрации наиболее широко используемым является критерий Войнич-Сяноженцкого [10]:

$$\frac{V^2}{gR} \geq \frac{\rho k}{2\pi\rho_a} \left(1 + \frac{4\pi^2\sigma}{\rho g \cos\psi k^2 R^2} \right) \left(1 + \frac{n\sqrt{g}}{kR^{1/6}} \right)^{-2} \cos\psi, \quad (1)$$

где ρ и ρ_a — плотность воды и воздуха; g — ускорение свободного падения; σ — коэффициент поверхностного натяжения; $k = 0,36 - 0,38$ — константа Кармана для неаэрированного потока; V — средняя скорость потока; R — гидравлический радиус; n — коэффициент шероховатости стенок водовода; ψ — угол наклона дна водовода, т.е. начало аэрации связывается с некоторым значением числа Фруда $Fr_a = \left(\frac{V^2}{gh} \right)_a$, которое по критерию Войнич-Сяноженцкого

зависит от плотностей воды и воздуха, величины поверхностного натяжения жидкости, угла наклона дна водовода, величины шероховатости стенок водовода, величины гидравлического радиуса (для широких каналов — глубины потока).

Т.Г. Войнич-Сяноженцкий для определения критерия начала аэрации рассматривал процесс формирования и развития волн на поверхности потока.

Величина $\frac{4\pi^2\sigma}{\rho g \cos\psi k^2 R^2}$ описывает влияние соотношения работы силы по-

верхностного натяжения и вертикальной пульсационной кинетической составляющей энергии потока на величину числа Фруда, соответствующего началу аэрации. Турбулентные вихри, обладающие кинетической энергией, перемещаясь в верхних слоях движущейся жидкости, становятся причиной волнообразования на поверхности потока. Силы поверхностного натяжения препятствуют вертикальному перемещению масс жидкости на поверхности потока, создавая сопротивление для процесса волнообразования.

Исследуем степень влияния параметров, входящих в данную величину, на значение данной величины, чтобы определить ее значимость в общей формуле для определения критерия начала аэрации Войнич-Сяноженцкого.

Величины: $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$, $k = 0,38$, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ в данном исследовании известны и постоянны.

Рассмотрим зависимость выбранной величины от глубины потока при трех различных значениях уклона дна канала:

$$F(h) = \frac{4\pi^2\sigma}{\rho g \cos\psi k^2 h^2} \quad (\text{для широких потоков } R \approx h). \quad (2)$$

Исходные значения для расчета:

$\sigma = 0,036 \text{ Н/м}$ (водные потоки с органическими примесями),

$\cos\psi = 0,996 (5^\circ)$, $0,866 (30^\circ)$, $0,5 (60^\circ)$,

$h = 0,05 \dots 0,5 \text{ м}$.

Результаты расчета приведены на рис. 1.

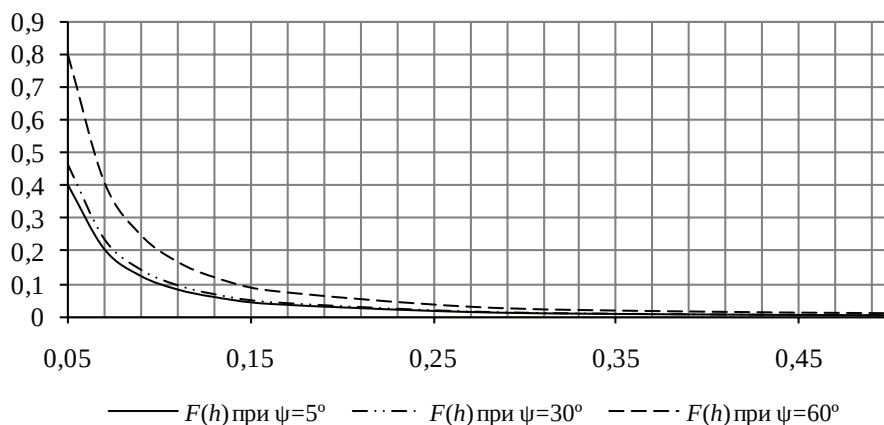


Рис. 1. График зависимости исследуемой величины от глубины канала при значениях угла наклона дна канала 5° , 30° , 60°

Считая величину функции $F(h)$ малозначимой при значениях менее 0,03, что соответствует 3 % от единицы (формула (1)), и проанализировав график (см. рис. 1), можно видеть, что величина поверхностного натяжения не оказывает значимого влияния на величину критерия начала аэрации при глубине более 0,2 м (при $\psi = 5^\circ$), 0,27 м (при $\psi = 60^\circ$).

Рассмотрим зависимость выбранной величины от уклона дна канала при трех различных значениях глубины потока:

$$F(\cos\psi) = \frac{4\pi^2\sigma}{\rho g \cos\psi k^2 h^2}. \quad (3)$$

Исходные значения для расчета:

$\sigma = 0,036$ Н/м (водные потоки с органическими примесями),

$\cos\psi = 0,996$ (5°) – $0,5$ (60°),

$h = 0,05, 0,1, 0,5$ м.

Результаты расчета приведены на рис. 2.

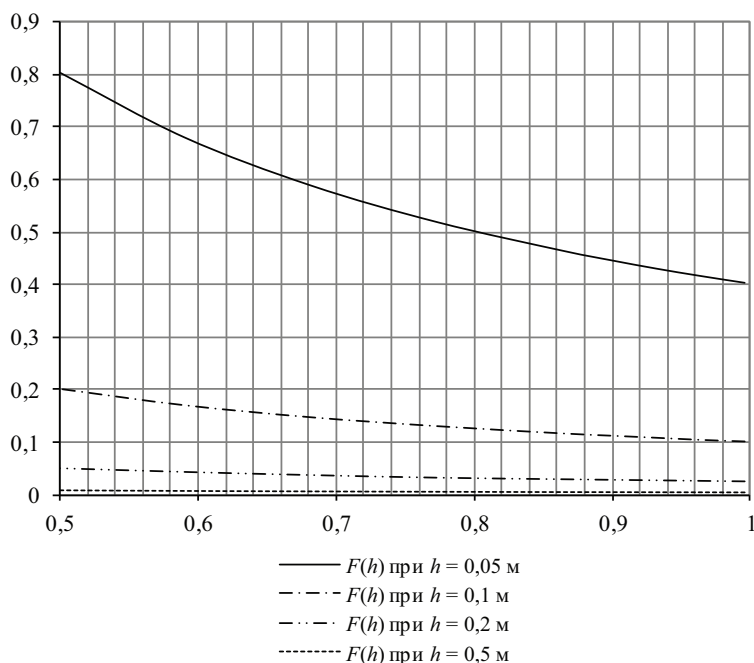


Рис. 2. График зависимости исследуемой величины от уклона дна канала при значениях глубины потока 0,05, 0,1, 0,2, 0,5 м

Из анализа рис. 2 видно, что при глубинах более 0,2 м значение уклона практически не влияет на изменение значения исследуемой величины.

Рассмотрим зависимость выбранной величины от глубины потока при различных значениях коэффициента поверхностного натяжения:

$$F(h) = \frac{4\pi^2\sigma}{\rho g \cos\psi k^2 h^2}.$$

Исходные значения для расчета:

$\sigma = 0,036$ Н/м (водные потоки с органическими примесями), $0,073$ Н/м (дистиллированная вода при 20°C),

$\cos\psi = 0,866$ (30°),

$h = 0,05 \dots 0,5$ м.

Результаты расчета приведены на рис. 3.

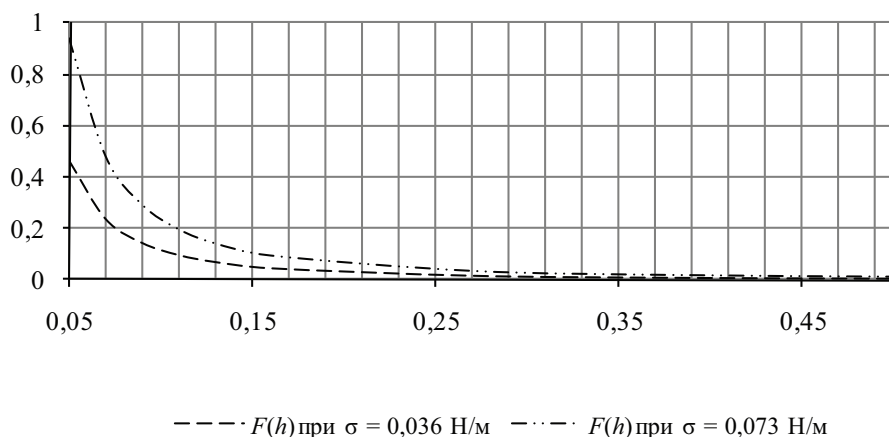


Рис. 3. График зависимости исследуемой величины от глубины канала при значениях коэффициента поверхностного натяжения 0,036, 0,073 Н/м

Анализ рис. 3 показывает, что значение функции $F(h)$ можно не учитывать при глубине более 0,22 м ($\sigma = 0,036$ Н/м), 0,27 м ($\sigma = 0,073$ Н/м).

Таким образом, результаты расчета показывают, что исследуемая величина начинает зависеть от величин коэффициента поверхностного натяжения, уклона дна водовода, а также влиять на значение критерия начала аэрации при расчетных глубинах потока менее 0,2 м. Причем, например, при глубине 0,05 м, которую можно реализовать в лабораторных условиях, значение исследуемой величины велико и может иметь значения от 0,4 до 1,63 (согласно (4), (5)), что в 1,5...2,5 раза увеличивает значение числа Фруда, соответствующее началу аэрации.

$$\max \left(\frac{4\pi^2\sigma}{\rho g \cos\psi k^2 R^2} \right) = \frac{4 \cdot 3,14^2 \cdot 0,073}{1000 \cdot 9,81 \cdot 0,5 \cdot 0,38^2 \cdot 0,05^2} = 1,63; \quad (4)$$

$$\min \left(\frac{4\pi^2\sigma}{\rho g \cos\psi k^2 R^2} \right) = \frac{4 \cdot 3,14^2 \cdot 0,036}{1000 \cdot 9,81 \cdot 0,996 \cdot 0,38^2 \cdot 0,05^2} = 0,4. \quad (5)$$

Анализ проведенного расчета показал, что происходит существенное увеличение влияния поверхностного натяжения на формирование потока в лабораторных условиях при малых глубинах. В натуральных потоках кинетическая энергия масс жидкости, перемещаемых турбулентными вихрями в поверхностных слоях потока, намного выше работы сил поверхностного натяжения, поэтому процесс волнообразования и возникновения аэрации начинается при более низких числах Фруда, чем в модельных потоках, в которых кинетическая энергия вертикально перемещающихся масс жидкости сопоставима с величиной работы сил поверхностного натяжения, и необходима большая кинетическая энергия для начала процесса аэрации.

Это объясняет «невоспроизводимость» явления аэрации открытых водных потоков в лабораторных условиях при гидродинамической тождественности их натурным аэрированным потокам.

Библиографический список

1. Слисский С.М. Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений. М. : Энергия, 1979. 336 с.
2. Lane E.W. Entrainment of Air in Swiftly Flowing Water // Civil Engineering. February 1939. Vol. 9. No. 2. pp. 88—91.
3. Halbronn G. Etude de la mise en regime des ecoulements sur les ouvrages a forte pente, application au problem de l'entrainement d'air // La Houille Blanche. 1952. No. 3. pp. 347—371.
4. Брянская Ю.В., Остякова А.В. Анализ условий возникновения критического режима течения в широком открытом потоке // Вестник МГСУ. 2009. № 3. С. 190—194.
5. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений. М. : Энергоатомиздат, 1988. 624 с.
6. Богомолов А.И., Боровков В.С., Майрановский Ф.Г. Высокоскоростные потоки со свободной поверхностью. М. : Стройиздат, 1979. 347 с.
7. Dong Zhiyong, Wu Yihong, Zhang Dong. Cavitation characteristics of offset-into-flow and effect of aeration // Journal of hydraulic research. 2010. Vol. 48. Iss. 1. pp.74—80.
8. Скребков В.П. Моделирование сбросных аэрированных потоков в комплексе с энергогасящими сооружениями // Гидротехническое строительство. 2012. № 3. С. 45—49.
9. Bombardelli F.A., Buscaglia G.C., Rehmann C.R., Rincón L.E., García M.H. Modeling and scaling of aeration bubble plumes: A two-phase flow analysis // Journal of hydraulic research. 2007. Vol. 45. Iss. 5. pp. 617—630.
10. Войнич-Сяноженцкий Т.Г. Некоторые теоретические задачи гидравлики открытых русел и сооружений : автореф. дисс. д-ра техн. наук. Тбилиси, 1962.

Поступила в редакцию в марте 2013 г.

Об авторах: Павлова Ольга Викторовна — аспирант кафедры гидравлики, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВПО «МГСУ»), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, madiken@yandex.ru;

Боровков Валерий Степанович — доктор технических наук, профессор, профессор кафедры гидравлики, ФГБОУ ВПО «Московский государственный строительный университет» (ФГБОУ ВПО «МГСУ»), 129337, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26, (499)261-39-12, mgsu-hydraulic@yandex.ru.

Для цитирования: Павлова О.В., Боровков В.С. Анализ условий возникновения аэрации открытых потоков // Вестник МГСУ. 2013. № 5. С. 169—175.

O.V. Pavlova, V.S. Borovkov

CONDITIONS OF FREE STREAM AERATION OCCURRENCE

The article represents an overview of conditions facilitating aeration of a stream. The authors describe the spillway formation process that has enjoyed poor attention of researchers until now. The authors also consider the problems that accompany stimulation of aeration which is impossible to reproduce in the laboratory environment.

The analysis is based on the Voynich-Syanozhentskiy criterion of aeration initiation, which contemplates superficial tension and the Froude number equivalent of the aeration commencement. The intensity of the impact produced by the surface stress factor, the flow depth and the bottom slope of the water conduit on the Froude number are also taken into consideration.

The analysis findings have proven that superficial tension begins to produce a substantial effect on the aeration beginning criterion if the flow depth is below 0.2 m, as in this case the superficial tension value prevents perturbations of the free surface. Liquid masses concentrated in the upper layer of natural flows having sufficient depths have a considerable kinetic energy which is sufficient for the flow to overcome the resistance of superficial tension forces. Laboratory modeling of free streams cannot assure sufficient depth values; therefore, the aeration process is not similar to the one of natural flows. The analysis performed by the authors makes it possible to adjust conditions of hydraulic modeling of aeration to assure accurate reproduction of this phenomenon.

Key words: aeration of free surface flow, aeration beginning criterion, superficial tension factor, aeration flow modeling.

References

1. Slisskiy S.M. *Gidravlicheskie raschety vysokonapornykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Hydraulic Analysis of High Pressure Hydraulic Structures]. Moscow, Energiya Publ., 1979, 336 p.
2. Lane E.W. Entrainment of Air in Swiftly Flowing Water. *Civil Engineering*. February 1939, vol. 9, no. 2, pp. 88—91.
3. Halbronn G. Etude de la mise en regime des ecoulements sur les ouvrages a forte pente, application au problem de l'entrainement d'air. *La Houille Blanche*. 1952, no. 3, pp. 347—371.
4. Bryanskaya Yu.V., Ostyakova A.V. Analiz usloviy vozniknoveniya kriticheskogo rezhima techeniya v shirokom otkrytom potoke [Analysis of Conditions for Emergence of the Critical Mode of a Free Wide Flow]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2009, no. 3, pp. 190—194.
5. *Gidravlicheskie raschety vodosbrosnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy* [Hydraulic Analysis of Hydraulic Water Intake Structures]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1988, 624 p.
6. Bogomolov A.I., Borovkov V.S., Mayranovskiy F.G. *Vysokoskorostnye potoki so svoobodnoy poverkhnost'yu* [Free Surface High-velocity Flows]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1979, 347 p.
7. Zhiyong Dong, Yihong Wu, Dong Zhang. Cavitation Characteristics of Offset-into-flow and Effect of Aeration. *Journal of Hydraulic Research*. 2010, vol. 48, no. 1, pp. 74—80.
8. Skrebkov V.P. Modelirovanie sbrosnykh aerirovannykh potokov v komplekse s energogasyashchimi sooruzheniyami [Modeling of Aerated Overflows Exposed to the Impact of Energy Suppression Structures]. *Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo* [Hydraulic Engineering Construction]. 2012, no. 3, pp. 45—49.
9. Bombardelli F.A., Buscaglia G.C., Rehmann C.R., Rincón L.E., García M.H. Modeling and Scaling of Aeration Bubble Plumes: a two-phase Flow Analysis. *Journal of Hydraulic Research*. 2007, vol. 45, no. 5, pp. 617—630.
10. Voynich-Syanozhentskiy T.G. *Nekotorye teoreticheskie zadachi gidravliki otkrytykh rusel i sooruzheniy* [Some Theoretical Problems of Hydraulics of Open Flow Beds and Structures]. Tbilisi, 1962.

About the authors: **Pavlova Ol'ga Viktorovna** — postgraduate student, Department of Hydraulics, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; madiken@yandex.ru;

Borovkov Valeriy Stepanovich — Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor, Department of Hydraulics, **Moscow State University of Civil Engineering (MGSU)**, 26 Yaroslavskoe shosse, Moscow, 129337, Russian Federation; mgsu-hydraulic@yandex.ru; +7 (499) 261-39-12.

For citation: Pavlova O.V., Borovkov V.S. Analiz usloviy vozniknoveniya aeratsii otkrytykh potokov [Process Organization Design within the Framework of Construction Projects]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2013, no. 5, pp. 169—175.