

С. В. СТАСЬ, О. М. ЯХНО, Е. В. ЛАВРУХИН

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СКОРОСТИ И ДАВЛЕНИЯ ВОДЯНОЙ СТРУИ НА ВЫХОДЕ ИЗ ПОЖАРНОГО СТВОЛА ИЛИ НАСАДКИ

Важнейшими элементами систем генерирования огнетушащих потоков являются устройства формирования струй – пожарные стволы (либо насадки). Управлять струями за пределами пожарных стволов не представляется возможным. Поэтому особое внимание инженеров-конструкторов должно быть обращено на создание таких устройств, которые бы позволили наилучшим образом обеспечивать получение нужных характеристик огнетушащих струй в зоне очага пожара еще на этапе их формирования в стволах. Определяющими характеристиками устройств формирования струй в этом случае есть их геометрические конструктивные параметры, а также расход жидкости, давления на входе и выходе ствола, вид получаемой струи, ее дальность, особенности используемых жидкостей. На начальное разрушение водяных струй существенное влияние оказывают вихри, которые образуются вследствие турбулентности. Также разрушение водяных струй может быть следствием изменения средних скоростей в пограничных слоях вдоль поверхностей при движении струй в газах. Водяная струя на выходе из ствола не имеет твердых границ, в ней формируется гидродинамический начальный участок за счет перераспределения скоростей от максимального в ядре струи до минимального на поверхности струи. При определенных условиях можно утверждать о некоем подобии гидродинамических начальных участков во входной зоне ствола и на его выходе. Длина гидродинамического начального участка за пределами пожарного ствола может быть определена подобно длине гидродинамического начального участка во входной зоне ствола. Фактически можно получить описание для поля скоростей движения жидкости по всей длине струеформирующего канала внутри пожарного ствола и за его пределами в компактной части струи. Качество проектирования пожарных стволов и насадок с круговым профилем поперечного сечения внутреннего струеформирующего канала непосредственно зависит от точности определения длины гидродинамического начального участка, что позволяет получить устойчивое течение жидкости на выходе из пожарного ствола без колебаний и пульсаций скорости и давления.

Ключевые слова: пожаротушение, пожарный ствол, водяная струя, гидродинамический начальный участок, вязкие и аномально-вязкие жидкости, насадка.

С. В. СТАСЬ, О. М. ЯХНО, Е. В. ЛАВРУХИН

ОСОБЛИВОСТІ РОЗПОДІЛУ ШВИДКОСТІ ТА ТИСКУ ВОДЯНОГО СТРУМЕНЯ НА ВИХОДІ З ПОЖЕЖНОГО СТВОЛА АБО НАСАДКИ

Найважливішими елементами систем генерування вогнегасних потоків є пристрої формування струменів – пожежні стволи (або насадки). Керувати струменями за межами пожежних стволів не має можливості. Тому особливу увагу інженерів-конструкторів слід звертати на створення таких пристроїв, які б дозволили найкращим чином забезпечувати отримання потрібних характеристик вогнегасних струменів в зоні вогнища пожежі ще на етапі їх формування у стволах. Визначальними характеристиками пристроїв формування струменів у таких випадках є їх геометричні конструктивні параметри, а також витрата рідини, тиску на вході і виході ствола, вид одержуваного струменя, його дальність, особливості застосовуваних рідин. На початкове руйнування водяних струменів істотний вплив чинять вихори, які утворюються внаслідок турбулентності. Крім того, руйнування водяних струменів може бути наслідком зміни середніх швидкостей в граничних шарах вздовж поверхонь при русі струменів у газах. Водяний струмінь на виході зі ствола не має твердих стінок, у ньому формується гідродинамічна початкова ділянка за рахунок перерозподілу швидкостей від максимальної в ядрі струменя до мінімальної на поверхні струменя. За певних умов можна стверджувати про деяку подібність гідродинамічних початкових ділянок у вхідній зоні ствола й на його виході. Довжина гідродинамічної початкової ділянки за межами пожежного ствола може бути визначена подібно до визначення довжини гідродинамічної початкової ділянки у вхідній зоні ствола. Таким чином можна отримати опис для поля швидкостей руху рідини по всій довжині струміноформувального каналу всередині пожежного ствола і за його межами в компактній частині струменя. Якість проектування пожежних стволів і насадок з круговим профілем поперечного перерізу внутрішнього струміноформувального каналу безпосередньо залежить від точності визначення довжини гідродинамічної початкової ділянки, що дозволяє отримати стійкий плин рідини на виході з пожежного ствола без коливань і вібрацій швидкості та тиску.

Ключові слова: пожежогасіння, пожежний ствол, водяний струмінь, гідродинамічна початкова ділянка, в'язкі й аномально-в'язкі рідини, насадка.

S. STAS, O. YAKHNO, Ye. LAVRUKHIN

FEATURES OF SPEED DISTRIBUTION AND PRESSURE OF A WATER JET IN THE AREA OF OUTFLOW FROM BRANCH PIPE OR NOZZLE

Branch pipes or jet formation devices are the most important elements of systems for generating fire extinguishing streams. It is impossible to control the jets outside the branch pipes. Therefore, special attention of engineers should be paid to the moments of creation of such devices, which would make it possible to provide the best receiving to required characteristics of fire extinguishing jets in the area of fire, even at the stage of their formation in the branch pipes. In this case, the defining characteristics of jet forming devices are their geometric design parameters, fluid flow, pressure at the inlet and outlet of the pipe, type of the resulting jet, its range and features that liquids are use. The primary breakup of water jets is significantly affected by vortices that are formed due to turbulence. Also, breakup of water jets can be a consequence of changes in average speed in border layers along surfaces when jets move in gases. The water jet at the exit from the branch pipe hasn't solid borders, a hydrodynamic initial section is formed in it due to the redistribution of speed from the maximum in the jet core to the minimum on the jet surface. Under certain conditions, it can be argued about a certain similarity of hydrodynamic initial sections in the entry zone of the pipe and at its exit. The length of the hydrodynamic initial section outside the branch pipe can be defined similarly to the length of the hydrodynamic start section in the entrance zone of the pipe. In fact, it is possible to obtain a description for the field of speed of fluid motion along the entire length of the jet-forming channel inside the branch pipe and outside in the compact part of the jet. The design quality of branch pipes and nozzles with a circular cross-sectional profile of the internal jet-forming channel directly depends on the precision of determining the length of the hydrodynamic initial section, which allows you to obtain a stable fluid flow at the exit from the branch pipe without fluctuations and pulsations of speed and pressure.

Keywords: fire extinguishing, branch pipe, water jet, hydrodynamic initial section, viscous and abnormally viscous liquids, nozzle.

© С. В. Стась, О. М. Яхно, Е. В. Лаврухин, 2020

Введение и анализ основных исследований.

Существующие конструкции пожарных стволов и насадок, как приспособлений для создания и направления струй воды, пены, порошка или других огнетушащих веществ в очаг пожара, позволяют получать самые разнообразные типы струй. Они могут использоваться для пожаротушения или локализации очагов пожаров, создания водяных туманных тепловых полей, облаков распылённой жидкости и для других целей. Разные типы стволов и насадок позволяют получать сплошные и распылённые струи, а также, например, перекрывать водяной поток, не отключая при этом питающее устройство.

Экспериментальное исследование процессов разрушения струи жидкости, а также свойства турбулентного первичного разрушения на поверхности круглых струй жидкости в спокойном воздухе при стандартных температуре и давлении описаны Салламом К. А. и соавторами [1], для нетурбулентных струй [2]. Соотношение длины внутреннего канала к диаметру выходного отверстия струеформирующего устройства в их исследованиях составляло более 40:1, числа Рейнольдса Re в начале струи варьировались в диапазоне 5000–200000, числа Вебера We соответственно – 235–270000, при этом проявление прямого эффекта вязкости было несущественным (числа Онезорге Oh не превышали 0,0053). Было предложено первичное разрушение на поверхности жидкости представлять с использованием неких коэффициентов эффективности поверхности. При этом, полученные коэффициенты варьировались от небольших значений в области начала разрушения поверхности жидкости до значений единицы при приближении к области разрушения сплошной струи в целом.

Модель, основанная на положениях теории разрушения с учетом сопротивления воздуха, предложена Шангом В. и соавторами [3, 4] позволяет прогнозировать траектории огнетушащих водяных струй. Предполагалось, что траектория струи, созданной пожарным стволом, в основном зависит от собственной гравитации и сопротивления воздуха, а величина сопротивления воздуха изменяется в зависимости от площади поперечного сечения струи. Был проведен сравнительный анализ данных теоретического моделирования и экспериментальных данных, погрешность составляла около 10 %, что можно считать вполне удовлетворительным результатом.

Точность определения зоны распыла огнетушащей струи оказывает существенное влияние на эффективность тушения пожара. Чжан М. и соавторы использовали модель квадратичного сопротивления на основе анализа механической модели гидравлического контрольного объема с учетом изменения площади поперечного сечения, вызванной разрушением струи воды по ее длине [5]. Моделирование струи воды выполнялось путем исследования нескольких основных рабочих параметров, таких как угол позиционирования пожарного ствола (угол выброса струи) и начальная

скорость струи.

Дальность генерирования «классической» водяной огнетушащей струи зависит от обеспечения стабильности ее поверхности в зоне выхода из пожарного ствола. Джи Хи и соавторы предложили экспериментальный метод визуализации стабильности поверхности струи [6–9] для получения картин образующихся поверхностных волн на струе в зоне вылета струи из пожарного ствола. На основе анализа морфологии поверхности определялась связь между волновой характеристикой струи воды и числом Вебера We . Было установлено, что средняя длина волны струи воды, сформированной пожарным стволом (монитором) уменьшается с увеличением числа Вебера, при этом амплитуда волн непрерывно увеличивается по мере удаления от выходного отверстия ствола. Другими словами, чем больше число Вебера, тем выше скорость поверхностных волн на струе воды.

На рис. 1. показано картину движения и распада струи согласно модели, предложенной Лей М. К. и соавторами [10] и уточненной Лю Х. [4].

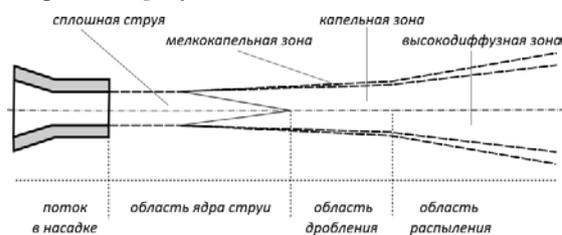


Рис. 1. Картина движения и распада струи [4, 10]

С помощью высокоскоростной камеры Лю Х. с соавторами получили и проанализовали изображения струй жидкости, сформированных пожарным стволом (монитором) при различных значениях выходного давления [4]. Был проведен количественный анализ для струйного течения и проанализированы факторы, влияющие на расширение струи (изменение диаметра струи в зависимости от расстояния от насадки). Утверждается, что при одинаковом расстоянии x от насадки безразмерное $D_x d_0^{-1}$ растет с увеличением выходного давления (рис. 2). При постоянном давлении и росте расстояния x , отношение $D_x d_0^{-1}$ сначала увеличивается, а затем уменьшается. Причина в том, что при истечении воды из сопла, из-за влияния сопротивления воздуха, струя начинает, рассеиваясь, расширяться. Далее, по мере увеличения расстояния x внешнее распыление струи продолжает увеличиваться, отбирая часть жидкости от основного потока до тех пор, пока последний не исчезнет.

Условия на выходе из насадки (ствола), в частности наличие вихрей из-за турбулентности или изменения средних скоростей от вязких эффектов в пограничных слоях, играют доминирующую роль в первичном разрушении вдоль поверхностей жидких струй в газах [11–14]. Для турбулентного первичного разрушения при существенном проявлении аэродинамических явлений отношение плотностей жидкости и газа (при $\rho_i \rho_a^{-1} < 500$) влияет как на

условия в начале разрушения, так и на размеры и скорости капель после разрушения.

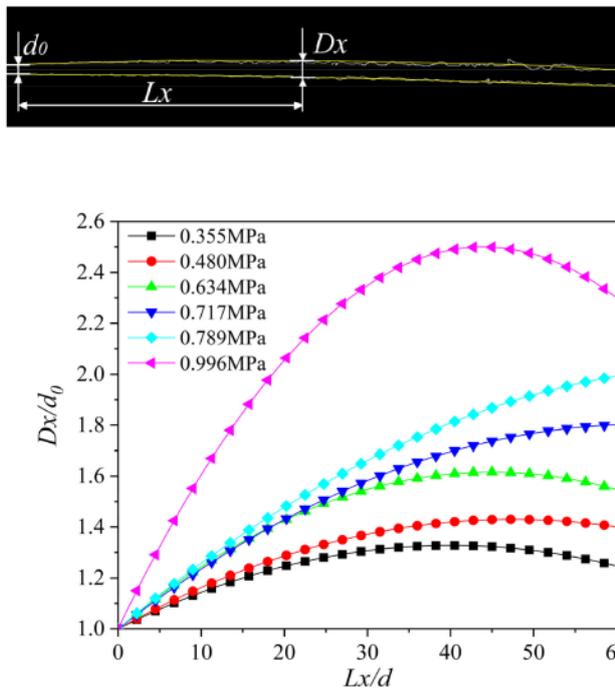


Рис. 2. Зависимость, полученная Лю Х. и соавторами, для диаметра струи от расстояния от насадки при различных давлениях [4]

Особенности движения жидкости внутри простейшего пожарного ствола и в компактной части струи. В большинстве случаев для практических применений используются простейшие пожарные стволы с круговым профилем поперечного сечения внутреннего струеформирующего канала. Отметим, что, чаще всего стволами называют устройства, длина внутреннего канала которых превышает четыре диаметра выходного их отверстия. В ином случае устройство принято называть насадкой. Для того, чтобы течение жидкости на выходе из пожарного ствола было устойчивым и в нем отсутствовали бы различные колебания и пульсации, необходимо обеспечить условия, когда движение жидкости в самом стволе позволит получить на его выходе Стоковское движение. Но, как известно, такой процесс происходит на гидродинамическом начальном участке L_{hd} . Предложим упрощенное описание течения жидкости в самом стволе и на его выходе следующим образом. На гидродинамическом начальном участке в стволе поперечное сечение ядра эпюры скоростей постоянно уменьшается по длине струеформирующего канала. Далее ядро исчезает, что свидетельствует об устойчивом движении жидкости (рис. 3). Таким образом, в зоне выхода из ствола течение жидкости продолжает быть устойчивым. Длина гидродинамического начального участка L_{in} зависит от диаметра внутреннего канала ствола d и числа Рейнольдса Re .

$$L_{hd} = L_{in} = kd Re, \quad (1)$$

где k – характерная константа, определяемая экспериментальным путем.

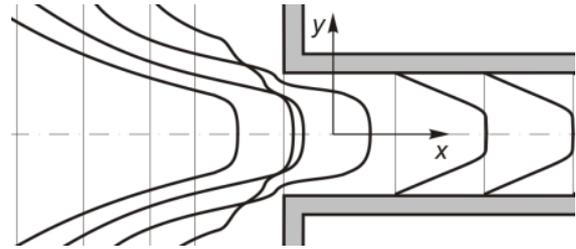


Рис. 3. Картина движения жидкости в зоне входа в цилиндрический осесимметричный внутренний канал пожарного ствола

Таким образом, отношение инерционных сил к силам вязкого трения жидкости, определяемое числом Рейнольдса Re , будет определять длину гидродинамического начального участка L_{in} внутри пожарного ствола.

Соответственно, зная вязкость используемой жидкости ν (для воды $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2 \text{ с}^{-1}$) и расход жидкости ствола, можно определить длину гидродинамического начального участка. При проектировании пожарного ствола требуется обеспечить следующее условие

$$L_{in} < L_{br}, \quad (2)$$

где L_{br} – длина внутреннего струеформирующего канала пожарного ствола.

Таким образом, в зависимости от режима работы пожарного ствола, выполняя условие (2), можно обеспечить требуемую форму эпюры скоростей на его выходе (параболического, логарифмического либо иного вида).

Поскольку струйное течение на выходе из ствола со скоростью u_{out} не имеет твердых границ, в самой струе происходит перераспределение скоростей, которое формирует ее гидродинамический начальный участок. В струе появляется ядро, а по периметру ее поперечного сечения – зона перехода от локальной скорости u до «0» в окружающей среде. При определенных условиях можно утверждать о некоем подобии гидродинамических начальных участков во входной зоне ствола и на его выходе.

Длина гидродинамического начального участка, а также компактной части струи будет зависеть от вида и параметров эпюры скоростей на выходе из ствола (рис. 4).

Подобно случаю движения жидкости внутри струеформирующего канала пожарного ствола, когда должно выполняться условие (2), вначале струи для получения устойчивого движения жидкости должно обеспечиваться условие (3) для длины гидродинамического начального участка L_{out}

$$L_{out} < L_{comp}, \quad (3)$$

где L_{comp} – длина компактной части струи, за пределами которой движение жидкости становится неустойчивым.

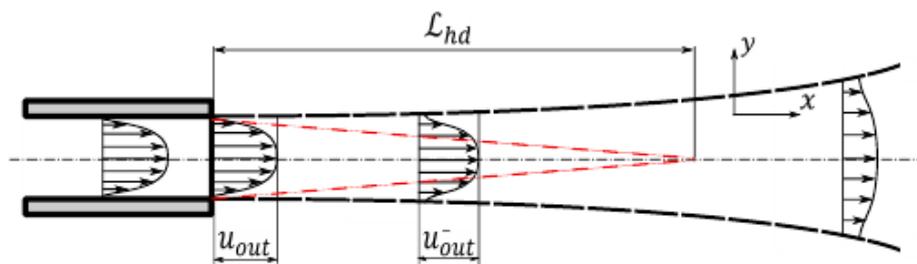


Рис. 4. Картина движения жидкости в зоне выхода из пожарного ствола

За компактной частью струи, формируются раздробленная и распылённые зоны. Хотя строгого определения границ зон осуществить не удастся, чаще всего принято выделять именно три указанные участка струи: компактный, раздробленный и распыленный. Предполагается, что условие (3) не будет выполняться в случае мгновенного распыла струи на выходе из пожарного ствола.

Расчет длины гидродинамического начального участка за пределами пожарного ствола $L_{hd} = L_{out}$ можно проводить подобно расчету L_{in} внутри его. При этом характерная константа k также как и в предыдущем случае должна определяться экспериментальным путем.

В зависимости от условия движения жидкости на выходе ствола определяют условия движения жидкости в компактной части струи. Таким образом, можно получить описание для поля скоростей движения жидкости по всей длине струеформирующего канала внутри пожарного ствола и за его пределами в компактной части струи. Особое внимание при построении поля скоростей следует уделить участку перехода «выход из ствола» – «начало компактной части струи».

Размеры ствола следует определять, учитывая длину гидродинамического начального участка L_{hd} , которая в общем случае может быть функцией не только числа Рейнольдса Re , но и числа Вайсенберга Wa [15–17].

Следует отметить, что на длину начального участка L_{hd} , при рассматриваемом подходе к решению задачи могут оказывать влияние различные факторы. В прикладном плане определенный интерес представляют такие факторы как магнитное поле и пульсации стенок ствола [18–20].

Выводы. Определение длины начального гидродинамического участка L_{hd} для пожарных стволов и насадок с круговым профилем поперечного сечения внутреннего струеформирующего канала является важным этапом их проектирования. Во-первых, выполнение условия (2) позволяет получить устойчивое течение жидкости на выходе из пожарного ствола без колебаний и пульсаций скорости и давления. Вышеуказанное при определенных условиях обеспечивает возрастание длины струи в первую очередь за счет увеличения ее компактной части. Во-вторых, расчет длины начального гидродинамического участка указывает на минимальные геометрические размеры пожарного ствола (при известных значениях входного давления,

реологических особенностей используемой жидкости, расхода и диаметра выходного струеформирующего отверстия). Таким образом, можно определить минимальные геометрические размеры струеформирующего устройства, позволяющего обеспечить требуемые параметры огнетушащей струи, например дальность ее генерирования при заданных значениях расхода и давления.

Список литературы

1. Sallam K.A., Dai Z., Faeth G.M. Liquid break-up at the surface of turbulent round liquid jets in still gases. *International Journal of Multiphase Flow*. 2002. Vol. 28, iss. 3. P. 427–449. doi: 10.1016/S0301-9322(01)00067-2
2. Sallam K. A., Aalburg C., Faeth G. M. Breakup of round nonturbulent liquid jets in gaseous crossflows. *AIAA Journal*. 2004. Vol. 42, no 12. P. 2529–2540. doi: 10.2514/1.3749
3. Shang W., Liu X., Zhang M., Qu Y., Wang Y. Firewater Monitor Trajectories Based on Jet Expansion and Dynamic Breakup Model. *Journal of Testing and Evaluation*. 2020. Vol. 49. doi: 10.1520/JTE20190748
4. Liu X., Wang J., Li B., Li W. Experimental study on jet flow characteristics of fire water monitor. *The Journal of Engineering*. 2019. Vol. 13. P. 150–154. doi: 10.1049/joe.2018.8950
5. Zhang M., Liu X., Wang X., Wang Y., Liang W. Fire Water Monitor Trajectories Based on Turbulence Breakup Model. *Journal of Testing and Evaluation*. 2020. Vol. 48, iss. 6. P. 4454–4472. doi: 10.1520/JTE20180428
6. He J., Wang J., Liu X., Li B., Li W., Gu M., Xie Y., Cai Z., Ma J. Investigation on Surface Wave Characteristic of Water Jet. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019. Vol. 2019, article ID 4047956. 10 p. doi: 10.1155/2019/4047956
7. Tafreshi H. V., Pourdeyhimi B. The effects of nozzle geometry on waterjet breakup at high Reynolds numbers. *Experiments in Fluids*. 2003. Vol. 35, no. 4. P. 364–371. doi: 10.1007/s00348-003-0685-y
8. Guha A., Barron R. M., Balachandrar. Numerical simulation of high-speed turbulent water jets in air. *Journal of Hydraulic Research*. 2010. Vol. 48, no. 1. P. 119–124. doi: 10.1007/s00170-011-3508-y
9. Shinjo J., Umemura A. Simulation of liquid jet primary breakup: dynamics of ligament and droplet formation. *International Journal of Multiphase Flow*. 2010. Vol. 36, no. 7. P. 513–532. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2010.03.008
10. Leu M. C., Meng P., Geskin E. S., Tismeneskiy L. Mathematical Modeling and Experimental Verification of Stationary Waterjet Cleaning Process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, American Society of Mechanical Engineers (ASME)*. 1998. Vol. 120, iss. 3. P. 571–579. doi: 10.1115/1.2830161
11. Wu P. K., Faeth G. M. Aerodynamic Effects in Primary Breakup of Turbulent Liquids. *Atomization and Sprays*. 1993. Vol. 3, iss. 3. P. 265–289. doi: 10.1615/AtomizSpr.v3.i3.20
12. Wu P. K., Miranda R. F., Faeth G. M. Effects of Initial Flow Conditions on Primary Breakup of Nonturbulent and Turbulent Liquid Jets. *Atomization and Sprays*. 1995. Vol. 5, iss. 2. P. 175–196. doi: 10.1615/AtomizSpr.v5.i2.40
13. Wu P. K., Tseng L. K., Faeth G. M. Primary breakup in gas/liquid mixing layers for turbulent liquids. *AIAA Journal*. 1992. 12 p. doi: 10.2514/6.1992-462
14. Rajendran S., Jog M. A., Manglik R. Experimental investigation of liquid jet breakup at low Weber number. *Atomization and Sprays*.

2017. Vol. 27, iss. 9. P. 821–834. doi: 10.1615/AtomizSpr.2017019424
15. Stas S., Maglyovana T., Nyzhnyk T., Kolesnikov D., Strikalenko T. Improving the efficiency of water fire extinguishing systems operation by using guanidine polymers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 1, no. 10 (103). P. 20–25. doi: 10.15587/1729-4061.2020.196881
 16. Стась С. В. Анализ гидродинамических характеристик потока жидкости в специальных пожарных стволах и насадках щелевого типа. *Вісник Нац. техн. ун-ту України «КПІ». Сер.: Машинобудування*. Київ: НТУУ «КПІ». 2009. № 57. С. 139–142.
 17. Yakhno O., Stas S., Gnativ R. Taking into account the fluid compressibility at its unsteady flow in pressure pipelines of fire extinguishing systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 3, no. 7 (75). P. 38–42. doi: 10.15587/1729-4061.2015.42447
 18. Яхно О. М., Мамедов А. Н., Стась С. В. Влияние поперечного магнитного поля на дестабилизацию потока в канале. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv: NTU "KhPI". 2019. No. 1. P. 25–29. doi: 10.20998/2411-3441.2019.1.04
 19. Mamedov A., Stas S. Influence of surface roughness of channel on friction coefficient of electrically conducting fluids. *Journal of the Technical University of Gabrovo*. 2018. Vol. 57. P. 16–19.
 20. Mamedov A. N., Stas S. V., Honcharova Y. A., Yakhno O. M. The analysis of interaction of inertia forces and mass forces which have magnetic nature in unstable mechanical and biological flows. *Journal of the Technical University of Gabrovo*. 2019. Vol. 59. P. 36–40.
- References (transliterated)**
1. Sallam K.A., Dai Z., Faeth G.M. Liquid break-up at the surface of turbulent round liquid jets in still gases. *International Journal of Multiphase Flow*. 2002, vol. 28, issue 3, pp. 427–449. doi: 10.1016/S0301-9322(01)00067-2
 2. Sallam K. A., Aalburg C., Faeth G. M. Breakup of round nonturbulent liquid jets in gaseous crossflows. *AIAA Journal*. 2004, vol. 42, no 12, pp. 2529–2540. doi: 10.2514/1.3749
 3. Shang W., Liu X., Zhang M., Qu Y., Wang Y. Firewater Monitor Trajectories Based on Jet Expansion and Dynamic Breakup Model. *Journal of Testing and Evaluation*. 2020, vol. 49. doi: 10.1520/JTE20190748
 4. Liu X., Wang J., Li B., Li W. Experimental study on jet flow characteristics of fire water monitor. *The Journal of Engineering*. 2019, vol. 13, pp. 150–154. doi: 10.1049/joe.2018.8950
 5. Zhang M., Liu X., Wang X., Wang Y., Liang W. Fire Water Monitor Trajectories Based on Turbulence Breakup Model. *Journal of Testing and Evaluation*. 2020. Vol. 48, issue 6. P. 4454–4472. doi: 10.1520/JTE20180428
 6. He J., Wang J., Liu X., Li B., Li W., Gu M., Xie Y., Cai Z., Ma J. Investigation on Surface Wave Characteristic of Water Jet. *Mathematical Problems in Engineering*. 2019, vol. 2019, article ID 4047956. 10 p. doi: 10.1155/2019/4047956
 7. Tafreshi H. V., Pourdeyhimi B. The effects of nozzle geometry on waterjet breakup at high Reynolds numbers. *Experiments in Fluids*. 2003, vol. 35, no. 4, pp. 364–371. doi: 10.1007/s00348-003-0685-y
 8. Guha A., Barron R. M., Balachandar R. Numerical simulation of high-speed turbulent water jets in air. *Journal of Hydraulic Research*. 2010, vol. 48, no. 1, pp. 119–124. doi: 10.1007/s00170-011-3508-y
 9. Shinjo J. Umemura A. Simulation of liquid jet primary breakup: dynamics of ligament and droplet formation. *International Journal of Multiphase Flow*. 2010, vol. 36, no. 7, pp. 513–532. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2010.03.008
 10. Leu M. C., Meng P., Geskin E. S., Tismeneskiy L. Mathematical Modeling and Experimental Verification of Stationary Waterjet Cleaning Process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, American Society of Mechanical Engineers (ASME)*. 1998, vol. 120, issue 3, pp. 571–579. doi: 10.1115/1.2830161
 11. Wu P. K., Faeth G. M. Aerodynamic Effects in Primary Breakup of Turbulent Liquids. *Atomization and Sprays*. 1993, vol. 3, issue 3, p. 265–289. doi: 10.1615/AtomizSpr.v3.i3.20
 12. Wu P. K., Miranda R. F., Faeth G. M. Effects of Initial Flow Conditions on Primary Breakup of Nonturbulent and Turbulent Liquid Jets. *Atomization and Sprays*. 1995, vol. 5, issue 2. P. 175–196. doi: 10.1615/AtomizSpr.v5.i2.40
 13. Wu P. K., Tseng L. K., Faeth G. M. Primary breakup in gas/liquid mixing layers for turbulent liquids. *AIAA Journal*. 1992. 12 p. doi: 10.2514/6.1992-462
 14. Rajendran S., Jog M. A., Manglik R. Experimental investigation of liquid jet breakup at low Weber number. *Atomization and Sprays*. 2017, vol. 27, issue 9, pp. 821–834. doi: 10.1615/AtomizSpr.2017019424
 15. Stas S., Maglyovana T., Nyzhnyk T., Kolesnikov D., Strikalenko T. Improving the efficiency of water fire extinguishing systems operation by using guanidine polymers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020, vol. 1, no. 10 (103), pp. 20–25. doi: 10.15587/1729-4061.2020.196881
 16. Стась С. В. Анализ гидродинамических характеристик потока жидкости в специальных пожарных стволах и насадках щелевого типа [Analysis of the hydrodynamic characteristics of fluid flow in special fire nozzles and slot-type nozzles]. *Вісник Нац. техн. ун-ту України «КПІ». Серія: Mashynobuduvannya* [Bulletin of the National Technical University of Ukraine "KPI". Series: Engineering]. Kiev, NTUU "KPI" Publ., 2009, no. 57, pp. 139–142.
 17. Yakhno O., Stas S., Gnativ R. Taking into account the fluid compressibility at its unsteady flow in pressure pipelines of fire extinguishing systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015, vol. 3, no. 7 (75), pp. 38–42. doi: 10.15587/1729-4061.2015.42447
 18. Яхно О. М., Мамедов А. Н., Стась С. В. Влияние поперечного магнитного поля на дестабилизацию потока в канале [Influence of the transverse magnetic field on the destabilization of the flow in the channel]. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units*. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2019, no. 1, pp. 25–29. doi: 10.20998/2411-3441.2019.1.04
 19. Mamedov A., Stas S. Influence of surface roughness of channel on friction coefficient of electrically conducting fluids. *Journal of the Technical University of Gabrovo*. 2018, vol. 57, pp. 16–19.
 20. Mamedov A. N., Stas S. V., Honcharova Y. A., Yakhno O. M. The analysis of interaction of inertia forces and mass forces which have magnetic nature in unstable mechanical and biological flows. *Journal of the Technical University of Gabrovo*. 2019, vol. 59, pp. 36–40.

Поступила (received) 06.10.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Стась Сергій Васильович (Stas Sergey Vasilevich, Stas Serhiy) – кандидат технічних наук, доцент, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, професор кафедри «Техніка та засоби цивільного захисту»; м. Черкаси, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6139-6278>; e-mail: stas_serhiy@yahoo.com

Яхно Олег Михайлович (Yakhno Oleg Mikhailovich, Yakhno Oleg) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», професор кафедри «Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка»; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9522-5549>; e-mail: oleg.yakhno@gmail.com

Лаврухін Єгор Валерійович (Lavrukhin Egor Valeriyevich, Lavrukhin Evhen) – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», магістрант кафедри «Прикладна гідроаеромеханіка і механотроніка»; м. Київ, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6128-8066>; e-mail: lavruhin.egor@gmail.com