

УДК 536.24
DOI 10.17223/19988621/59/9

П.Д. Лобанов, М.А. Пахомов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА В ПУЗЫРЬКОВОМ ТЕЧЕНИИ ЗА ВНЕЗАПНЫМ РАСШИРЕНИЕМ ОСЕСИММЕТРИЧНОГО КАНАЛА¹

Представлены результаты экспериментального и численного моделирования структуры течения и теплообмена пузырькового восходящего течения за внезапным расширением трубы. Математическая модель использует эйлерово описание с учетом обратного влияния пузырьков на процессы переноса в жидкой фазе. Турбулентность жидкости моделируется с использованием модели переноса рейнольдсовых напряжений. Осредненная и пульсационная структура течения двухфазного потока при $\beta \leq 10\%$ остается качественно подобной таковой для однофазного течения жидкости. Показано, что добавление воздушных пузырьков вызывает значительное возрастание интенсивности теплообмена (до трех раз) в области релаксации течения при небольших числах Рейнольдса потока, причем эти эффекты возрастают с ростом концентрации пузырьков.

Ключевые слова: *пузырьковый поток, внезапное расширение, труба, измерения, расчет, турбулентность, теплообмен.*

Пузырьковые потоки широко распространены в химической технологии, в энергетике и других практических приложениях. Такие течения осложнены межфазным взаимодействием между несущей жидкостью и газовыми пузырьками, отрывом потока, полидисперсностью, дроблением и коалесценцией пузырьков и межфазным теплообменом. Рециркуляционное течение, образующееся при отрыве потока на острой кромке, во многом определяет структуру турбулентного потока и оказывает значительное влияние на интенсивность процессов переноса импульса, массы и теплоты.

Несмотря на наличие некоторого числа работ [1–6] по исследованию пузырьковых течений после внезапного расширения трубы или канала многие важные вопросы гидродинамики и теплофизики отрывных двухфазных течений остаются открытыми. Это касается, прежде всего, влияния дисперсной фазы на структуру течения, интенсивность теплообмена и другие факторы. Авторам не известно работ, кроме [5, 6], в которых был исследован теплообмен в отрывных пузырьковых течениях.

Целью настоящей работы является проведение экспериментального и численного исследования влияния концентрации газовой фазы на теплоперенос в восходящем пузырьковом потоке за внезапным расширением трубы. Полученная база экспериментальных данных позволила более точно провести верификацию разработанного авторами численного кода. В расчетной части данная работа представляет собой развитие подхода [5] для описания гидродинамики и теплообмена пу-

¹ Экспериментальная часть работы выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований (проект РФФИ № 18-58-45006 Инд), а расчетная – в рамках бюджетного финансирования ФАНО России (номер гос. рег. № 01201350445).

зырькового течения. Основное отличие данной работы от [6] заключается в том, что выполнено экспериментальное и численное исследование не только теплообмена, но и гидродинамики.

Экспериментальное исследование и математическая модель

В работе была использована рабочая установка для исследования течений двухфазных пузырьковых газожидкостных потоков в трубах с внезапным расширением (рис. 1). Экспериментальный стенд был подключен к замкнутому по жидкой фазе и разомкнутому по газовой фазе контуру, включающему бак для рабочей жидкости (1), напорную линию с вентилем (3, 4) и систему поддержания температуры в рабочем участке. Для контроля расхода рабочей жидкости применяется ультразвуковой расходомер (5), для контроля расхода воздуха – расходомеры производства фирмы Bronckhorst. Рабочий участок установки представляет собой трубу малого диаметра (8), вставленную через переходник в трубу большего диаметра (12). Торец малой трубы был зашлифован вровень с плоскостью переходника в отрывной зоне потока (9). Внутренний диаметр канала после расширения $R_2 = 42$ мм. Степень расширения $(R_2/R_1)^2 = 9$. Погрешность измерения расходов жидкости и газа составляла ± 2 % от измеряемой величины. Генерация пузырей производилась путем подачи воздуха в поток жидкости через 12 капилляров длиной 50 мм с внутренним диаметром 0.7 мм, равномерно распределенных в сечении канала. Экспериментальное исследование выполнено при вариации объемного расхода газа и жидкости соответственно. Размеры пузырей определялись с помощью видеосъемки с теневой подсветкой и анализа изображений. Средний диаметр пузырьков составлял $d = 1.7\text{--}2$ мм, среднее квадратичное отклонение диаметров пузырей для разных расходных характеристик находилось в пределах 0.3–0.4 мм, неопределенность определения диаметров пузырей около 5 %.

Для проведения экспериментальных исследований теплообмена от нагреваемой стенки к пузырьковому потоку использовался рабочий участок (2), изготовленный из тонкостенной нержавеющей стали. Внутренний диаметр рабочего участка был 42 мм, толщина стенки – 0.2 мм, длина области обогрева 500 мм. Нагрев участка производился с помощью электрического тока. Подвод тока осуществлялся с помощью лабораторного источника питания (ЛАТР), мощностью до 2 кВт, с помощью которого осуществлялось управление подаваемой мощностью. За измерительным участком находился участок трубы диаметром 42 мм и длиной 1 м. В качестве основного измерительного метода использовалась инфракрасная термография. Для проведения термографических измерений внешняя поверхность рабочего участка была покрашена в черный цвет при помощи матовой краски для увеличения коэффициента излучения. Для измерений использовался тепловизор Fluke Ti32 (3). Для сравнения, на поверхность рабочего участка с противоположной стороны были установлены 3 терморезистора Pt1000 на расстояниях $x/H = 5, 17$ и 30.

Для описания газожидкостных турбулентных потоков используется эйлерово двухжидкостное описание. В данной работе используется подход, получивший свое развитие на случай учета межфазного теплообмена [5–7]. В математической модели используется система осредненных RANS уравнений в осесимметричном приближении, записанная с учетом обратного влияния пузырьков на осредненные и пульсационные характеристики течения. Одним из способов, дающим возможность частичного учета анизотропии, является использование модели переноса

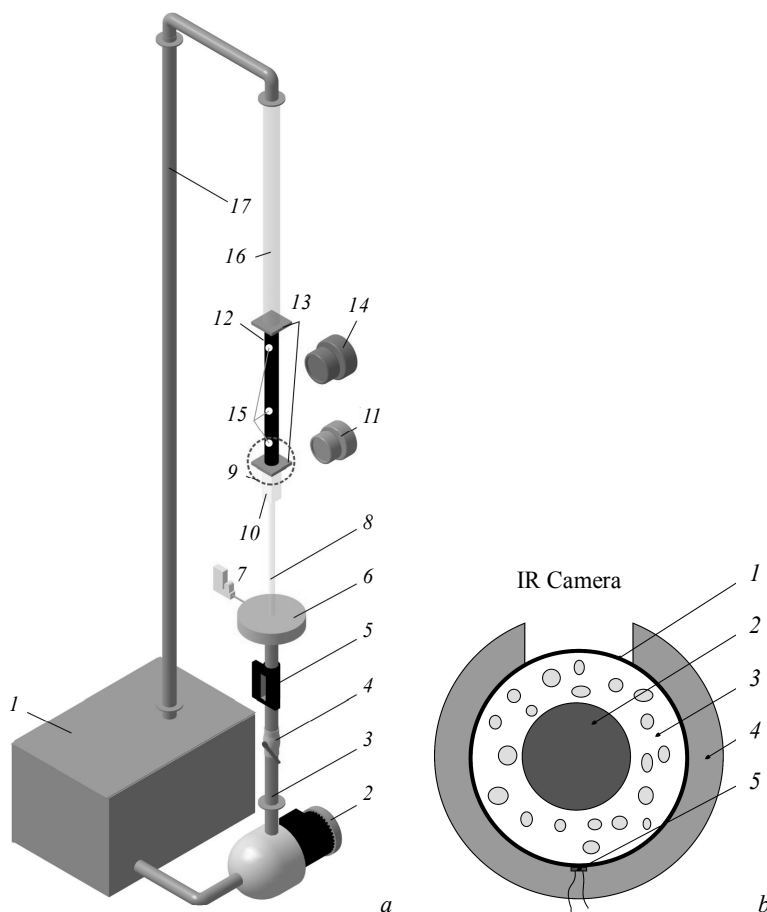


Рис. 1. Схемы экспериментальной установки (а) и рабочего участка для исследования теплообмена (б); а: 1 – основной бак; 2 – насос; 3 – напорная линия; 4 – вентиль; 5 – ультразвуковой расходомер; 6 – газожидкостный смеситель; 7 – контроллер расхода газовой фазы; 8 – труба малого диаметра; 9 – область расширения; 10 – бак, наполненный водой; 11 – видеокамера; 12 – измерительный участок; 13 – подвод электрического тока к тепло- вому участку; 14 – ИК камера; 15 – терморезисторы; 16 – труба большого диаметра. Поперечное сечение теплообменного участка (б): 1 – труба из нержавеющей стали; 2 – труба малого диаметра (до расширения); 3 – двухфазный пузырьковый поток после расширения; 4 – теплоизоляция; 5 – терморезисторы

Fig. 1. Design of the (a) experimental setup and (b) heat transfer measurement unit. (a): 1, main tank; 2, pump; 3, supply line; 4, control valve; 5, ultrasound flow meter; 6, gas-liquid mixer; 7, gas flow controller; 8, the pipe of small diameter (upstream of the expansion); 9, expansion section; 10, tank with water; 11, video camera; 12, test section; 13, power supply of the heated section; 14, infrared (IR) camera; 15, resistance temperature detectors (RTDs); 16, the pipe of large diameter (downstream of the expansion); and 17, downcomer. Cross section of the heat transfer measurement unit (b): 1, thin wall made of stainless steel; 2, inner pipe upstream of the expansion; 3, two-phase bubbly flow downstream of the expansion; 4, thermal insulation; and 5, RTDs

компонент тензора рейнольдсовых напряжений (Second Moment Closure – SMC). Эта модель является более сложной в вычислительном плане, чем известные и широко применяемые в численных расчетах k – ε -модели, но она обеспечивает более точный расчет турбулентных характеристик. Турбулентность несущей фазы рассчитывается с применением модели переноса рейнольдсовых напряжений [8] с учетом двухфазности течения.

Результаты измерений и расчетов и их сопоставительный анализ

Измеренные и рассчитанные радиальные распределения для средних осевых скоростей жидкости и пузырьков газа показаны на рис. 2 для двух расстояний вниз по потоку от сечения внезапного расширения трубы. Открытыми символами представлены экспериментальные данные для однофазного потока жидкости, а сплошными символами – характеристики жидкой фазы в двухфазном потоке. Сплошными линиями показаны расчетные данные для жидкой фазы, а пунктирными кривыми – результаты расчетов для монодисперсных пузырьков воздуха. Скорость жидкости для пузырьков потоков (2, 4) выше, чем скорость течения однофазной жидкости (1, 3). Рассчитанные скорости воздушных пузырьков (5) выше, чем значения скоростей жидкости в присутствии пузырьков воздуха из-за восходящего направления двухфазного потока. Осевые скорости жидкости имеют отрицательные значения вблизи отрывной области ($x/H = 4$ и 8). Профиль скорости жидкости в двухфазном потоке характеризуется наличием области с отрицательными значениями средней осевой скорости в пристеночной области трубы.

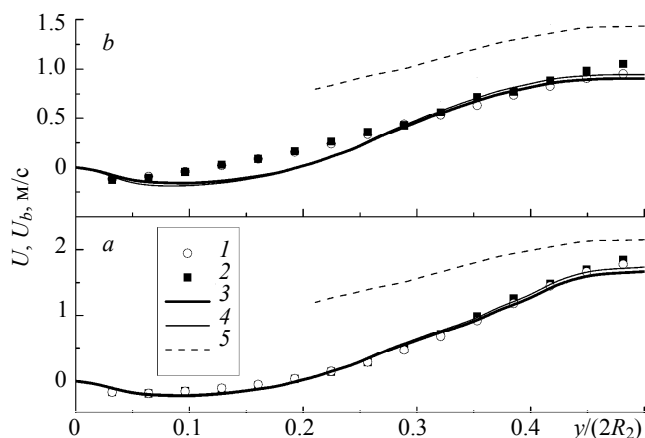


Рис. 2. Распределения осредненной аксиальной скорости фаз по сечению трубы на расстоянии $x/H = 4$ (a) и 8 (b). $Re_H = 2.09 \cdot 10^4$, $d = 1.7$ мм, $\beta = 3.5$ %. Точки и линии – измерения и расчет авторов. 1, 3 – $\beta = 0$ (однофазный поток жидкости), 2, 4 – жидкость в двухфазном течении при $\beta = 3.5$ %, 5 – воздушные пузырьки при $\beta = 3.5$ %.

Fig. 2. Distributions of the axial velocity of the fluid and gas bubbles averaged along the pipe cross-section at a distance of $x/H =$ (a) 4 and (b) 8. $Re_H = 2.09 \cdot 10^4$, $d = 1.7$ mm, and $\beta = 3.5\%$. The dotted and solid lines indicate the authors' measurements and calculations, respectively. 1, 3 – $\beta = 0$ (a single-phase fluid flow); 2, 4 – a two-phase fluid flow at $\beta = 3.5\%$; and 5 – gas bubbles at $\beta = 3.5\%$.

На рис. 3 показаны распределения локального теплопереноса в пузырьковом потоке за внезапным расширением трубы при вариации числа Рейнольдса потока $Re_H = U_{m1}H/\nu = 1.02 \cdot 10^4$, $2.09 \cdot 10^4$ и $3.15 \cdot 10^4$. Здесь H – высота уступа, U_{m1} – осредненная скорость жидкости на входе и ν – кинематическая вязкость. Точки и линии – данные измерений и результаты численного моделирования настоящей работы, пунктир – расчет для однофазного течения ($\beta = 0$) при прочих идентичных условиях. Отметим, что имеется удовлетворительное согласие между данными экспериментальных измерений и численных расчетов как для области отрыва потока (различие не превышает 10–15 %), так и в зоне его восстановления. Максимум теплоотдачи в экспериментах и расчетах приходится на расстояние $x/H = 7$ –10 для исследованного диапазона чисел Рейнольдса и концентраций воздушных пузырьков. Отметим, что положение точки максимума теплоотдачи примерно совпадает с точкой присоединения потока [9]. Для измеренных и рассчитанных распределений числа Нуссельта по длине трубы характерным является возрастание интенсивности теплообмена примерно до точки присоединения потока, далее происходит его резкое снижение в области релаксации течения. В целом, распределения числа Нуссельта по длине трубы имеют качественно подобный вид, как для случаев однофазного воздушного [9].

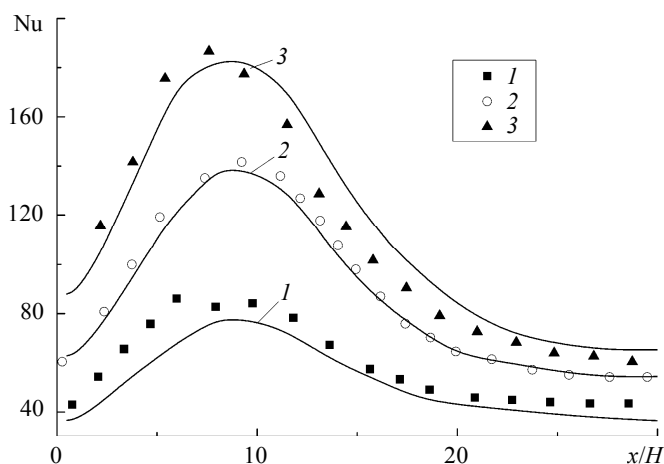


Рис. 3. Влияние числа Рейнольдса потока на изменение числа Нуссельта в пузырьковом потоке за внезапным расширением трубы. Точки и линии – измерения и расчет авторов соответственно. $\beta = 3.5\%$, $d_1 = 1.7$ мм. 1 – $Re_H \cdot 10^4 = 1.02$, 2 – 2.09, 3 – 3.15.

Fig. 3. Impact of the Reynolds number on the variation in the Nusselt number in a bubbly flow downstream of the sudden pipe expansion. The dotted and solid lines indicate the authors' measurements and calculations, respectively. $\beta = 3.5\%$, $d = 1.7$ mm. $Re_H \cdot 10^4 = (1) 1.02$, (2) 2.09, and (3) 3.15.

Заключение

Представлены результаты экспериментального исследования и численного моделирования структуры течения и теплообмена пузырькового восходящего течения за внезапным расширением трубы. Для измерения гидродинамики пузырькового течения был использован метод PIV/PLIF, измерения теплообмена выпол-

нены с применением метода инфракрасной термографии. В математической модели используется система осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса в осесимметричном приближении, записанная с учетом обратного влияния пузырьков на осредненные и пульсационные характеристики течения. Турбулентность несущей фазы рассчитывается с применением модели переноса рейнольдсовых напряжений. Исследование выполнено при изменении числа Рейнольдса потока в диапазоне $Re_H = (1.02-3.15) \cdot 10^4$ и объемного расходного газосодержания $\beta = 0-10\%$. Показано, что добавление воздушных пузырьков вызывает значительное возрастание интенсивности теплообмена (до 3 раз), причем эти эффекты возрастают с ростом концентрации пузырьков. Распределения числа Нуссельта по длине трубы имеют качественно подобный вид, как для случаев однофазного потока.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rinne A., Loth R. Development of local two-phase flow parameters for vertical bubbly flow in a pipe with sudden expansion // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 1996. V. 13. Iss. 1. P. 152–166. DOI: 10.1016/0894-1777(96)00039-8.
2. Aloui F., Doublier L., Legarand J., Souhar M. Bubbly flow in an axisymmetric sudden expansion: pressure drop, void fraction, wall shear stress, bubble velocities and sizes // *Exp. Therm. Fluid Sci.* 1999. V. 19. Iss. 1. P. 118–130. DOI: 10.1016/S0894-1777(98)10017-1.
3. Voutsinas A., Shakouchi T., Tsujimoto K., Ando T. Investigation of bubble size effect on vertical upward bubbly two-phase pipe flow consisted with an abrupt expansion // *J. Fluid Sci. Techn.* 2009. V. 4. Iss. 2. P. 442–453. <https://doi.org/10.1299/jfst.4.442>.
4. Krepper E., Beyer M., Frank T., Lucas D., Prasser H.-M. CFD modelling of polydispersed bubbly two-phase flow around an obstacle // *Nucl. Eng. Des.* 2009. V. 239. Iss. 11. P. 2372–2381. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2009.06.015.
5. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. Modeling of the flow patterns and heat transfer in a turbulent bubbly polydispersed flow downstream of a sudden pipe expansion // *Int. J. Heat Mass Transfer*. 2016. V. 101. P. 1251–1262. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.054.
6. Lobanov P.D., Pakhomov M.A. Experimental and numerical study of heat transfer enhancement in a turbulent bubbly flow in a pipe sudden expansion // *J. Eng. Thermophys.* 2017. V. 26. Iss. 3. P. 377–390. DOI: 10.1134/S1810232817030080.
7. Зайчик Л.И., Скибин А.П., Соловьев С.Л. Моделирование распределения пузырьков в турбулентной жидкости на основе диффузионно-инерционной модели // *Теплофизика высоких температур*. 2004. Т. 42. № 1. С. 111–117; Zaichik L.I., Skibin A.P., Solov'ev S.L. Simulation of the distribution of bubbles in a turbulent liquid using a diffusion-inertia model // *High Temp.* 2004. V. 42. Iss. 1. P. 111–118. DOI: 10.1023/B:HITE.0000020098.97475.9c.
8. Fadai-Ghotbi A., Manceau R., Boree J. Revisiting URANS computations of the backward-facing step flow using second moment closures. Influence of the numerics // *Flow, Turbulence and Combust.* 2008. V. 81. Iss. 3. P. 395–410. DOI: 10.1007/s10494-008-9140-8.
9. Eaton J.K., Johnston J.P. Review of research on subsonic turbulent flow reattachment // *AIAA J.* 1981. V. 19. Iss. 9. P. 1093–1100. DOI: 10.2514/3.60048.

Статья поступила 27.11.2018

Lobanov P.D., Pakhomov M.A. EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF THE HYDRODYNAMICS AND HEAT TRANSFER IN A BUBBLY FLOW DOWNSTREAM OF THE AXISYMMETRIC SUDDEN EXPANSION. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika* [Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics]. 59. pp. 87–93

DOI 10.17223/19988621/59/9

Keywords: bubbly flow, sudden expansion, pipe, measurement, modeling, turbulence, heat transfer.

The results of experimental and numerical simulations of the flow and heat transfer in the polydispersed bubbly flows in a pipe with sudden expansion are presented. Mathematical model is based on the use of the Eulerian approach considering the effect of the bubbles on the mean characteristics and turbulence of the carrier phase. The turbulence of the carrier fluid phase is predicted using the model of Reynolds stress transport. The structure of the mean and fluctuating two-phase bubbly flow at small volumetric gas flow rate ratio, $\beta \leq 10\%$, is qualitatively similar to that of a single-phase fluid flow. The small bubbles are observed in almost the entire pipe section, whereas the large ones mostly move through the flow core and shear mixing layer. Addition of the air bubbles results in a significant increase in the heat transfer rate (up to 300%) in the flow relaxation region for the moderate Reynolds numbers. This effect enhances with an increase in the gas volumetric flow rate ratio. The largest heat transfer enhancement is observed in the flow relaxation zone downstream of the reattachment point.

LOBANOV Pavel Dmitrievich (Candidate of Technical Sciences, Laboratory of Problems of Heat and Mass Transfer, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: lobanov@itp.nsc.ru

PAKHOMOV Maksim Aleksandrovich (Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Laboratory of Thermal and Gas Dynamics, Kutateladze Institute of Thermophysics, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation). E-mail: pakhomov@ngs.ru

REFERENCES

1. Rinne A., Loth R. (1996) Development of local two-phase flow parameters for vertical bubbly flow in a pipe with sudden expansion. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 13(1). pp. 152–166. DOI: 10.1016/0894-1777(96)00039-8.
2. Aloui F., Doublier L., Legrand J., Souhar M. (1999) Bubbly flow in an axisymmetric sudden expansion: pressure drop, void fraction, wall shear stress, bubble velocities and sizes. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 19(1). pp. 118–130. DOI: 10.1016/S0894-1777(98)10017-1.
3. Voutsinas A., Shakouchi T., Tsujimoto K., Ando T. (2009) Investigation of bubble size effect on vertical upward bubbly two-phase pipe flow consisted with an abrupt expansion. *Journal of Fluid Science and Technology*. 4(2). pp. 442–453. DOI: 10.1299/jfst.4.442.
4. Krepper E., Beyer M., Frank T., Lucas D., Prasser H.-M. (2009) CFD modelling of polydispersed bubbly two-phase flow around an obstacle. *Nuclear Engineering and Design*. 239(11). pp. 2372–2381. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2009.06.015.
5. Pakhomov M.A., Terekhov V.I. (2016) Modeling of the flow patterns and heat transfer in a turbulent bubbly polydispersed flow downstream of a sudden pipe expansion. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 101. pp. 1251–1262. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.05.054.
6. Lobanov P.D., Pakhomov M.A. (2017) Experimental and numerical study of heat transfer enhancement in a turbulent bubbly flow in a pipe sudden expansion. *Journal of Engineering Thermophysics*. 26(3). pp. 377–390. DOI: 10.1134/S1810232817030080.
7. Zaichik L.I., Skibin A.P., Solov'ev S.L. (2004) Simulation of the distribution of bubbles in a turbulent liquid using a diffusion-inertia model. *High Temperature*. 42(1). pp. 111–118. DOI: 10.1023/B:HITE.0000020098.97475.9c.
8. Fadai-Ghotbi A., Manceau R., Boree J. (2008) Revisiting URANS computations of the backward-facing step flow using second moment closures. Influence of the numerics. *Flow, Turbulence and Combustion*. 81(3) pp. 395–410. DOI: 10.1007/s10494-008-9140-8.
9. Eaton J.K., Johnston J.P. (1981) Review of research on subsonic turbulent flow reattachment. *AIAA Journal*. 19(9). pp. 1093–1100. DOI: 10.2514/3.60048.

Received: November 27, 2018