

УДК 621.791.037(204.1)

UDC 621.791.037(204.1)

**ЧИСЛЕННЫЙ РАСЧЕТ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ПОДВОДНОЙ СВАРКЕ С ВОДЯНОЙ ЗАВЕСОЙ СОПЛА\*****NUMERICAL CALCULATION OF HYDRODYNAMIC PARAMETERS FOR UNDERWATER WELDING WITH WATER CURTAIN NOZZLES***Д. В. Rogozin, И. В. Maslov,  
Д. А. Koronchik*

Донской государственный технический университет, Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[deagls666@mail.ru](mailto:deagls666@mail.ru)[dim-1972@ya.ru](mailto:dim-1972@ya.ru)[koronchic@mail.ru](mailto:koronchic@mail.ru)*D. V. Rogozin, I. V. Maslov, D. A. Koronchik*

Don State Technical University Rostov-on-Don, Russian Federation

[deagls666@mail.ru](mailto:deagls666@mail.ru)[dim-1972@ya.ru](mailto:dim-1972@ya.ru)[koronchic@mail.ru](mailto:koronchic@mail.ru)

Приведены результаты численного расчета гидродинамических характеристик водяной завесы при различном расположении среза сопла к поверхности свариваемой детали. Получены и проанализированы зависимости распределения скорости и турбулентной кинетической энергии, а также распределения давления на поверхности свариваемой детали. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании горелок для подводной сварки с водяной завесой сопла.

The paper presents the results of numerical calculation of hydrodynamic characteristics of the water curtain at different positions of the nozzle exit to the surface of the workpiece. The authors have obtained and analyzed distribution dependencies of velocity and turbulent kinetic energy, as well as pressure distribution on the surface of the work piece. The research results can be used in the design of burners for underwater welding with water curtain nozzle.

**Ключевые слова:** сварка с водяной завесой, локальная защита, подводная сварка, вычислительная гидродинамика, плоская затопленная струя

**Keywords:** water curtain welding, local cavity, underwater welding, computational fluid dynamics, flat flooded jet

**Введение.** Расчет характеристик течений водяной завесы является одним из важнейших этапов при разработке и проектировании горелок для подводной дуговой сварки с водяной завесой сопла [1]. Оптимальное расположение выходного среза водяного сопла способствует снижению расхода защитного газа и воды, необходимого для обеспечения безводной среды в зоне сварки. Это очень важно на больших глубинах, где под воздействием давления объем защитного газа снижается в несколько раз, что требует увеличения скорости его подачи. Выходной срез сопла может быть расположен параллельно, перпендикулярно или под углом к поверхности свариваемых деталей. Данные конфигурации были использованы при лабораторных исследованиях сварки с водяной завесой [2–8]. Плоский макет разреза горелки позволяет исследовать характер течений, однако это не дает точной картины протекания гидродинамических процессов [2,9].

\* Работа выполнена по гранту РФФИ №16-38-60055 мол а дк (<https://kias.rfbr.ru/Application.aspx?id=14677513>)

В работе проведено численное исследование гидродинамических характеристик водяной завесы при различных конфигурациях выходного среза сопла.

**Основная часть.** Водяная завеса представляет собой плоскую кольцевую струю, которая направлена под углом к поверхности свариваемых деталей. В процессе сварки поток защитного газа, направленный по нормали к поверхности свариваемых деталей, растекается по ней и высвобождается в зоне ослабления пристенной струи образованной водяной завесой. Исследование данного процесса осложнено неоднородностью сред, между которыми протекают потоки водяной завесы, и воздействием на нее потоков защитного газа. Также данный процесс не может переходить в стационарный режим при стационарных краевых условиях и имеет периодический характер [1]. В связи с тем, что при разном расположении выходного среза сопла периоды между образованием и отрывом пузырей будут отличаться по времени, а также во избежание появления гравитационной (конвективной) турбулентности, расчет произведен без подачи защитного газа в стационарной постановке с замкнутой областью зоны локальной защиты. В данном случае водяную завесу можно рассматривать как течение свободной затопленной струи вязкой жидкости, направленной под углом  $135^\circ$  к плоской преграде, и ограниченным объемом против острого угла между завесой и преградой. Взаимодействуя с преградой, свободная струя образует пристенную, которая растекается в радиальном направлении от оси горелки. Следовательно, для численного расчета необходима модель турбулентности, хорошо описывающая как свободные, так и пристеночные течения. До настоящего времени в коммерческих CFD пакетах и при решении реальных инженерных задач в большей степени применяется k-ε модель турбулентности и ее модификации [10]. Она применяется для описания достаточно широкого класса турбулентных течений, включающих как сдвиговую, так и гравитационную турбулентность. К недостаткам k-ε модели можно отнести низкую точность при моделировании течений с отрывом от гладких поверхностей, а также необходимость использования специальных приемов при расчете пристеночных течений [11]. Этих недостатков не наблюдается у k-ω модели Уилкокса. Модель переноса сдвиговых напряжений — Shear Stress Transport (SST), предложенная Ментером, представляет собой комбинацию k-ε и k-ω моделей [12]. Она включает в себя сочетание лучших качества этих давно известных моделей, используя каждую из них там, где она оказывается наиболее точной: k-ε — в области развитой турбулентности, k-ω — в пристеночных областях. Основная идея SST модели турбулентности состоит в том, что с помощью стыковочной функции  $F_1$  получается линейная комбинация уравнений из k-ω модели и уравнений из преобразованной

k-ε модели в эквивалентной k-ω формулировке:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \tilde{u}_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \tilde{P}_k + G_b - \beta^* \rho \omega k$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \tilde{u}_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \frac{\alpha}{v_t} P_k - \beta^* \rho \omega^2 + (1 - F_1) 2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}$$

Таким образом, плавное переключение от k-ε модели к k-ω модели, в зависимости от расстояния до поверхности, способствует получению качественных результатов, как в ядре потока, так и вблизи стенок. Для обеспечения устойчивости решения, сеточной сходимости и высокого разрешения результатов была использована сеточная модель, в которой больше 1 500 000 узлов и более

9 000 000 элементов (рис. 1). При вычислениях использовалась одинаковая конечно-элементная сетка для всех моделей. Расчеты произведены с использованием секторной части геометрии (рис.1), скорость подачи воды — 10 м/с, абсолютное давление в расчетной среде — 1,05 атм. Процесс сходимости контролировался по значениям среднеквадратичных невязок (RMS) уравнений динамики и турбулентности.

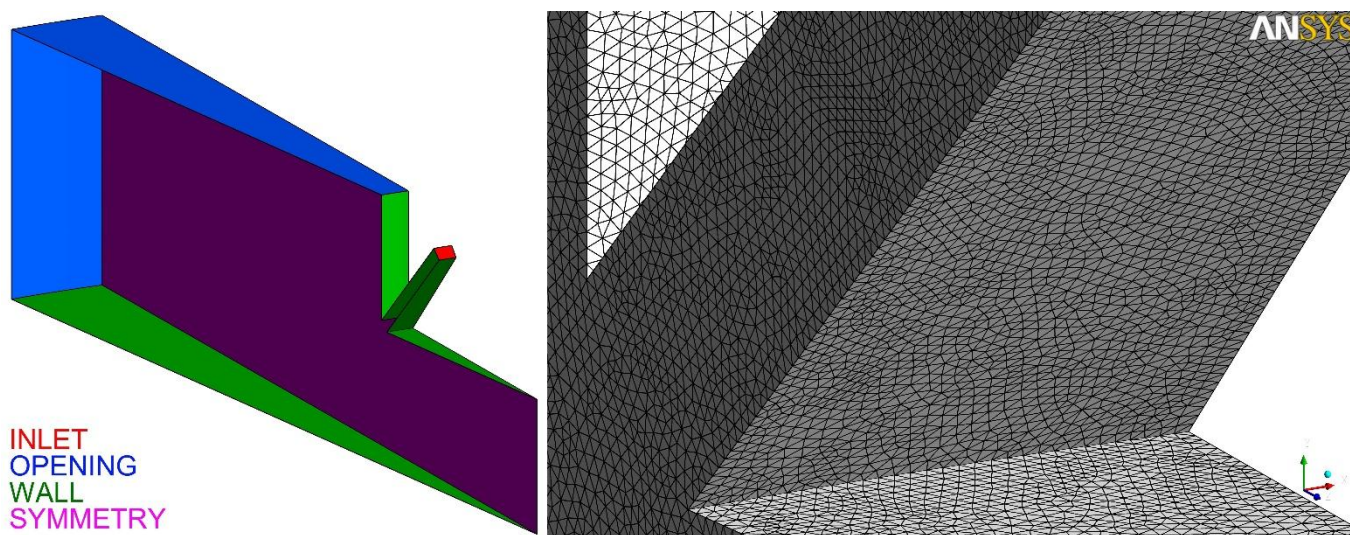


Рис. 1. Условия на элементы и область среза сопла расчетной сетки

На рис. 2 представлены поля скоростей и значения давления в точках замкнутой и открытой области расчетной среды. Можно заметить, что при параллельном расположении сопла к поверхности свариваемой детали, пристенная струя в открытой области имеет меньшую скорость и толщину. Большие значения скорости пристенной струи в замкнутой области наблюдаются и при параллельном расположении. Это объясняется тем, что свободная струя расслаивается в сторону острого угла более интенсивно, чем при наклонном (когда срез сопла является осесимметричным) и перпендикулярном расположении среза сопла. Это также подтверждается тем, что в точках В2 и В3 значения давления ниже, чем в точке В1 ( $-0,0062$  Па и  $-0,0378$  Па против  $0,0064$  Па соответственно), что демонстрирует большую скорость течений, образованных пристенными струями, и направленных к ним в открытой области. Таким образом, при наклонном и перпендикулярном расположении среза сопла водяная завеса способна поддерживать большее давление, создаваемое в замкнутой области, чем при параллельном. Это подтверждается большим давлением в точках А2 и А3, чем в точке А1 ( $1879,85$  Па и  $1686,61$  Па против  $1385,02$  Па соответственно).

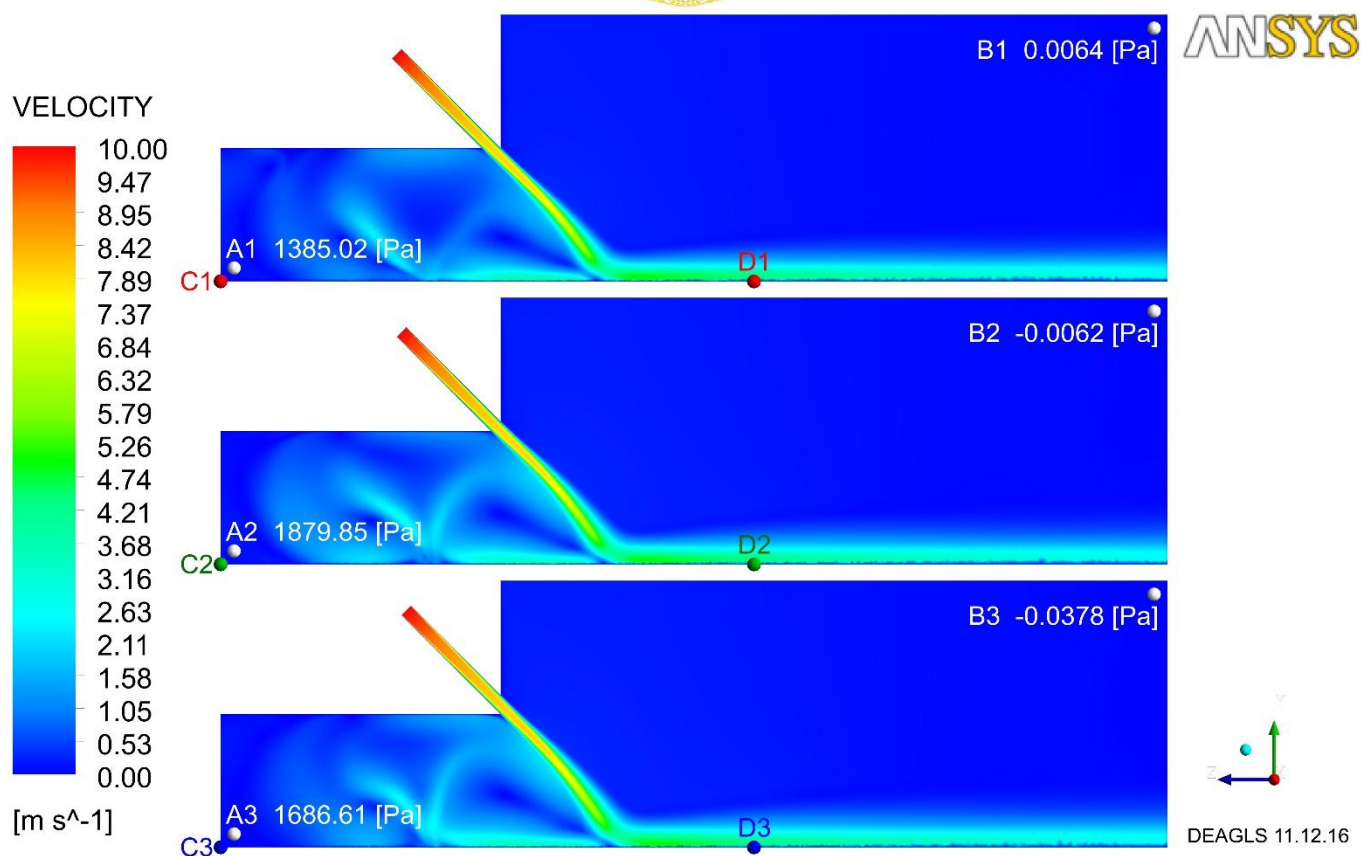


Рис. 2. Поля скоростей

Для более детального исследования гидродинамических характеристик струи были построены графики распределения давления на отрезках C1–D1, C2–D2 и C3–D3 (рис. 2). Они представлены на рис. 3. Графики для отрезков C2–D2 и C3–D3 практически повторяют друг друга и имеют наиболее плавный характер, по сравнению с графиком для отрезка C1–D1, что демонстрирует более развитую турбулентность в замкнутой области во втором случае. Максимальное значение давления на отрезках C2–D2 и C3–D3 выше, чем на отрезке C1–D1 (11 505,3 Па и 11 460,3 Па против 11 448,5 соответственно). Это свидетельствует о меньшем воздействии сил трения, возникающих на границе струи и неподвижной окружающей жидкости. Следовательно, при параллельном расположении среза сопла к поверхности свариваемой детали, струя в большей степени склонна к расширению и генерации турбулентных течений в замкнутой области, что способствует потере кинетической энергии основного потока.

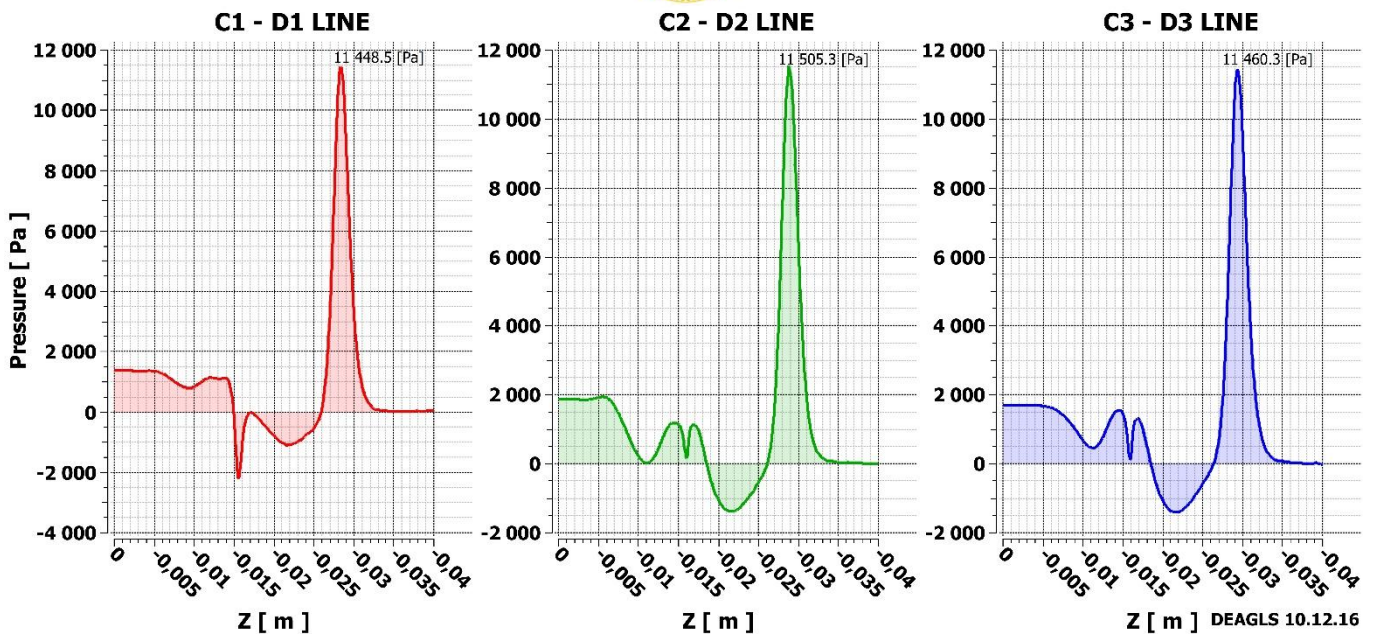


Рис. 3. Графики распределения давления на отрезках C1–D1, C2–D2 и C3–D3

Это также наблюдается при анализе изолиний турбулентной кинетической энергии, представленных на рис. 4, где при параллельном расположении ее значение в замкнутой области превышает  $0,67 \text{ м}^2/\text{с}^2$ , а максимальное значение в области разворота струи у преграды (в точке E1) составляет  $1,80537 \text{ м}^2/\text{с}^2$ . При наклонном и перпендикулярном расположении среза сопла эти значения значительно ниже. В замкнутой области они не превышают  $0,48 \text{ м}^2/\text{с}^2$  и  $0,38 \text{ м}^2/\text{с}^2$ , а максимальные значения в точках E2 и E3 составляют  $1,74927 \text{ м}^2/\text{с}^2$  и  $1,73604 \text{ м}^2/\text{с}^2$ . Следовательно, при перпендикулярном расположении среза сопла к поверхности свариваемой детали водяная завеса в меньшей степени подвержена воздействию на нее давления в зоне локальной защиты, так как потери кинетической энергии в данном случае являются наименьшими. Это также говорит о том, что расслоение струи в открытую область происходит интенсивнее, чем при параллельном и наклонном расположении, образуя при этом более мощную пристенную струю. Это снижает вероятность попадания воды в зону локальной защиты.

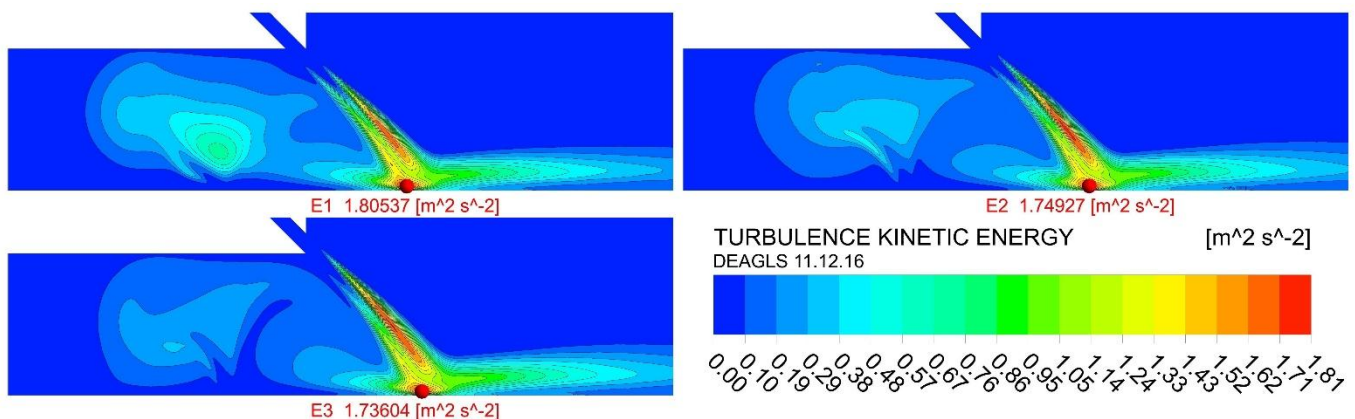


Рис. 4. Изолинии турбулентной кинетической энергии

Из общей картины полученных результатов можно сделать вывод, что при наклонном и перпендикулярном расположении среза сопла к поверхности свариваемой детали струя имеет аналогичные гидродинамические характеристики. При этом максимальное давление на поверхность свариваемой детали и в замкнутой области наблюдается в первом случае, а меньшие значения турбулентной кинетической энергии во втором. Это обосновывает целесообразность проведения численного исследования с подачей защитного газа в нестационарной постановке.

**Выводы.** Анализ результатов численного исследования показал:

1. При параллельном расположении среза сопла к поверхности свариваемой детали струя расширяется преимущественно в зоне локальной защиты и имеет наибольшие потери кинетической энергии.
2. При наклонном расположении среза сопла к поверхности свариваемой детали струя расширяется наиболее равномерно с двух сторон и имеет наибольшее значение давления на преграду.
3. При перпендикулярном расположении среза сопла к поверхности свариваемой детали струя расширяется преимущественно в открытой области и имеет наименьшие потери кинетической энергии.

**Библиографический список.**

1. Рогозин, Д. В. Исследование влияния геометрии горелки с водяной завесой сопла на процесс подводной сварки [Электрон. ресурс] / Д. В. Рогозин, И. В. Маслов, Д. А. Корончик // Молодой исследователь Дона. — 2016. — № 3 (3). — Режим доступа: <http://mid-journal.ru/upload/iblock/26b/3-rogozin-182-.pdf> (дата обращения 21.12.16).
2. 浜崎, 榊原: "水カーテン式水中炭酸ガスアーク溶接法の研究", 本誌, Vol. 42, No. 9 (1973), pp. 897–906.
3. Hamasaki, M., Sakakibara, J., and Watanabe, M., "Underwater Butt Welding of Mild Steel with Water Curtain Type CO<sub>2</sub> Arc Welding Method", Transactions of the Japan Welding Society, Vol. 6, No. 2, Sept. 1976, pp. 83–89.
4. 浜崎, 榊原: 高張力鋼の水中溶接, 本誌, Vol. 48, No. 2 (1979), pp. 115–120.
5. H. Hoffmeister, K. Küster, T. Böllinghaus, E. Bunes, Repair welding of tubular structures by an underwater low hydrogen wet fillet weld system, Welding of Tubular Structures, Proceedings of the Second International Conference Held in Boston, Massachusetts, USA, 16 – 17 July 1984, pp. 145–150.
6. 임채환, 해양공간이용 대형 복합플랜트 개발; 부유구조물 구조·용접 기술 개발, 한국기계연구원, 1998–12.
7. 이규복, 황선효, 박영조, 김종열; "국부건식(물커튼식)수중용접법에 관한 연구", 대한용접학회지, v.10 no.2, 1992년, pp.51–63
8. Y.Ogawa, Mechanization of Underwater Wet Welding, VLFS99, vol.2, pp.708–716(1999).

9. Automatisierte Fertigung unter Wasser (Sonderforschungsberichte Der Deutschen Forschung). K. Tönshoff, Hans: Verlag: Wiley-VCH, 2003.
10. Маслов, И. В. Численное моделирование потоков защитного газа при подводной дуговой сварке с водяной завесой сопла в программном комплексе ANSYS CFX [Электрон. ресурс] / И. В. Маслов // Блокнот молодого учёного. Выпуск 1 (на электронном диске) / ДГТУ. — Ростов-на-Дону, 2016.
11. Москвичев, А. В. Применимость моделей турбулентности, реализованных в ANSYS CFX, для исследования газодинамики в щелевом канале ТНА ЖРД / А. В. Москвичев // Вестник Воронежского государственного технического университета. — 2013. — Т. 9, № 5–1. — С. 82–85.
12. Menter, F. R., “Two–Equation Eddy–Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications”, AIAA Journal, 32(8):1598–1605, August, (1994).