

УДК 532.53

ВЕРИФИКАЦИЯ РАСЧЁТНОГО КОМПЛЕКСА FLOW-3D НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВОДОСЛИВОВ

А.А. Гиргидов

*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
г. Санкт-Петербург (Российская Федерация)*

Аннотация. В статье рассматривается часть верификации расчётной программы FLOW-3D. Детально рассматривается верификация на моделях водосливов (с острым гребнем, длинным гребнем и Кригера-Офицерова). Величины расходов, полученные в результате численного моделирования водосливов сопоставляются с нормативными значениями. Дополнительно сравниваются профиль струи и величины давлений. На основании сопоставления результатов делается основной вывод о возможности использования FLOW-3D не только при моделировании водопропускных сооружений, но и при кросс-верификации альтернативного программного обеспечения.

Ключевые слова: численное моделирование, верификация, расчётное программное обеспечение, FLOW-3D

Ссылка для цитирования: Гиргидов А.А. Верификация расчётного комплекса FLOW-3D на основе моделирования водосливов // Инженерные исследования. 2023. №2 (12). С. 27-32. EDN: TKEJSB

VERIFICATION OF THE FLOW-3D SOFTWARE BASED ON NUMERICAL SIMULATION OF WEIRS

A.A. Girgidov

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, St.Petersburg (Russian Federation)

Abstract. The article discusses part of the FLOW-3D software verification. Verification using weir models (with a sharp ridge, a long ridge and WES (Krieger-Officerov) profile) is considered in detail. The flow rates obtained as a result of numerical simulation for weirs are compared with standard values. Additionally, the flow profile and pressure values are compared. Based on a comparison of the results, the main conclusion is made about the possibility of using FLOW-3D not only in modeling spillways, but also in cross-verification of alternative software.

Keywords: Numerical simulation, verification, software, FLOW-3D

For citation: Girgidov A.A. Verification of the FLOW-3D software based on numerical simulation of weirs // Inzhenernyye issledovaniya [Engineering Research]. 2023. No.2 (12). Pp. 27-32. EDN: TKEJSB

ВВЕДЕНИЕ

Использование расчётных программ при моделировании гидравлических процессов, в настоящее время приобретает всё более широкий характер по сравнению с физическими лабораторными исследованиями [1, 2].

В то же время, для обоснованного и эффективного использования расчетного программного обеспечения (ПО) необходима верификация, которая позволяет уточнить особенности численной модели и численных параметров. Процесс верификации заключается в сравнении результатов численного моделирования с теоретическими, нормативными или экспериментальными данными [3]. В работе представлены верификация расчётного ПО FLOW-3D [4] для моделирования водосливов:

- водослив с острым гребнем [5, 6] (водослив с тонкой стенкой [7, 8]);
- водослив с длинным гребнем [4, 5] (водослив с широким порогом [7, 8]);
- водослив с профилем WES [5] (безвакуумный водослив Кригера-Офицера [7, 8]).

Использование FLOW-3D обусловлено методикой описания свободной поверхности TrueVOF [9], которая эффективно и с достаточной точностью позволяет моделировать конфигурацию потока при обтекании стен с отрывом струи.

Для всех моделей использовалась абсолютная шероховатость, принятая для бетонной поверхности согласно [6, 7, 10].

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОСЛИВА С ОСТРЫМ ГРЕБНЕМ

Первой верификационной задачей в серии численных экспериментов была модель водослива с острым гребнем. Данная задача имеет ряд особенностей, наблюдение которых в численной модели обосновывает качество моделирования: расход через водослив при заданном напоре на гребне водослива, геометрия струи. Для проведения моделирования были приняты следующие параметры водослива и потока на подводящем и отводящем участках:

- ширина подводящего и отводящего участков равна $b = 1.0$ м;
- высота водосливной стенки $c_u = c_d = 3.0$ м, где c_u - высота стенки со стороны подводящего участка, c_d - высота стенки со стороны отводящего участка;
- толщина водосливной стенки составляет $d = 0.2$ м;
- напор на гребне водослива $H = 1.0$ м.

Водослив с приведёнными параметрами соответствует водосливу с острым гребнем [5, 7, 8].

Согласно принятой методике расчётов [7, 8], расход через водослив с острым гребнем определяется по формуле (1):

$$Q = mb\sqrt{2g}H^{\frac{3}{2}}, \quad (1)$$

где $m = 0.41$ - коэффициент расхода водослива, $g = 9.81$ м/с² - ускорение свободного падения.

Подставляя в формулу (1) параметры, приведённые выше, получается:

$$(Q)_{calc} = 0.41 \cdot 1.0 \sqrt{2 \cdot 9.81} \cdot 1.0^{\frac{3}{2}} = 1.81 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Для проведения численного эксперимента, в программный комплекс FLOW-3D была импортирована трёхмерная компьютерная геометрическая модель водослива, на основе которой была построена 3D численная модель (рис.1).

Моделирование проводилось до квази-стационарных условий (рис. 2). При моделировании использовались следующие граничные условия:

- левая граница – постоянный уровень воды. Давление распределено по гидростатическому закону (P);
- правая граница – условие пропускa расхода (O)
- нижняя граница – стена (W);
- верхняя граница – симметрия (учитывает атмосферное давление) (S);
- фронтальная и задняя граница – условия симметрии (S).

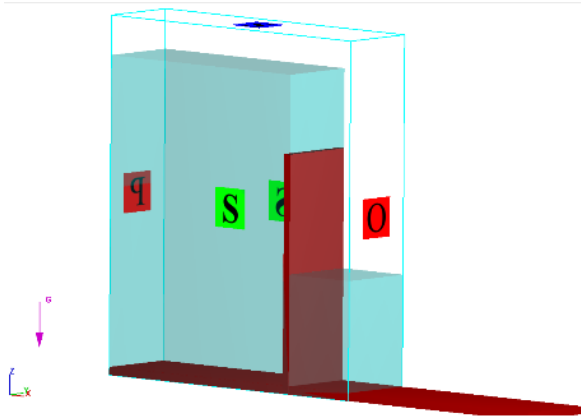


Рис. 1. Трёхмерная численная модель водослива с острым гребнем с граничными условиями в программном комплексе FLOW-3D

Fig. 1. 3D numerical model of a sharp crest weir with a boundary conditions in the FLOW-3D software

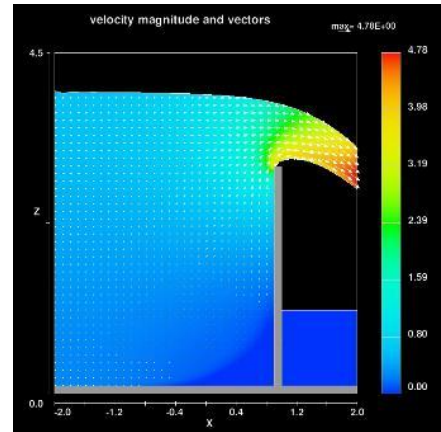


Рис. 2. Картина течения через водослив с острым гребнем в пост-процессоре FLOW-3D (разрез по продольной оси численной модели). Цветом показано распределение скорости в м/с
Fig. 2. Pattern of the flow through a sharp crest weir in the FLOW-3D post-processor (cross section along the longitudinal axis of the numerical model). The color shows the velocity distribution in m/s

Геометрия струи при переливе через водослив, полученная при численном моделировании соответствует геометрии, приведённой в справочной документации [7, 8]. На рис. 3 приведены кривые верхней и нижней поверхностей струи при переливе через водослив.

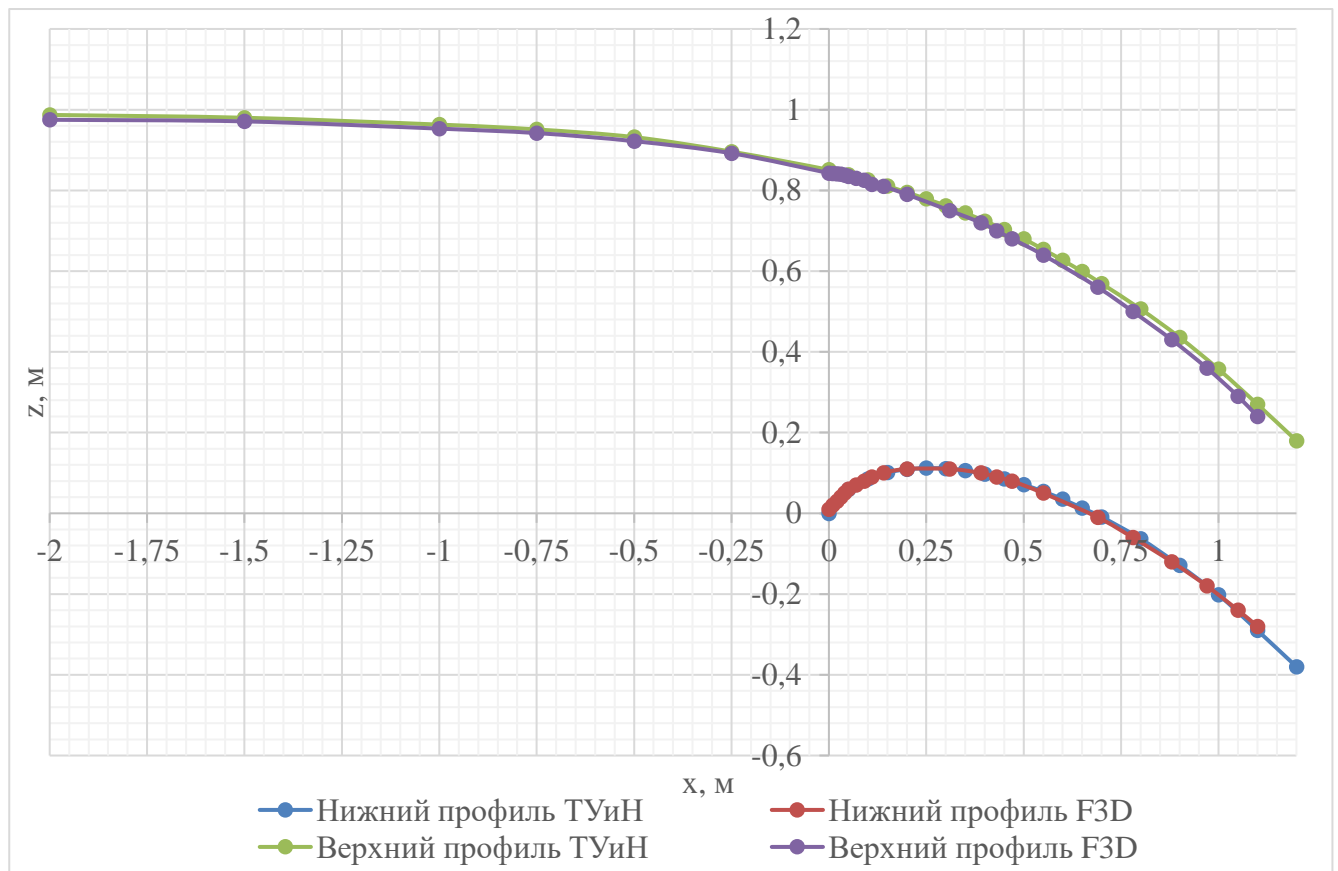


Рис. 3. Сопоставление координат верхнего и нижнего профилей струи через водослив
Fig. 3. Comparison of coordinates for the upstream and downstream profiles for the flow through the weir

Ошибка в величине расхода, полученного в результате численного моделирования $(Q)_{num}$, и рассчитанного по формуле (1) $(Q)_{calc}$, не превысила 2%:

$$\Delta = \frac{(Q)_{num} - (Q)_{calc}}{(Q)_{calc}} \cdot 100\% = \frac{1.84 - 1.81}{1.81} \cdot 100\% = 1.7\% .$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОСЛИВА С ДЛИННЫМ ГРЕБНЕМ

Аналогичное моделирование было проведено для водослива с длинным гребнем. Для проведения верификации были приняты следующие параметры водослива, подводящего и отводящего участков:

- ширина подводящего и отводящего каналов составляет $b = 1.0$ м;
- высота водосливной стенки $c_u = c_d = 3.0$ м, где c_u - высота стенки со стороны верхнего бьефа, c_d - высота стенки со стороны нижнего бьефа;
- толщина водосливной стенки составляет $d = 3.0$ м;
- напор на гребне водослива $H = 0.5$ м.

Согласно [6], расход через водослив с длинным гребнем определяется по формуле (1), при этом коэффициент расхода водослива, с учётом сеточной шероховатости [4, 9], равен $m = 0.33$ [7, 8]. Подставляя исходные данные в формулу (1), получаем:

$$Q = 0.33 \cdot 1.0 \cdot \sqrt{2 \cdot 9.81} \cdot 0.5^{\frac{3}{2}} = 0.516 \text{ м}^3/\text{с}.$$

На рис. 4 приведена численная модель в расчётном ПО FLOW-3D.

Моделирование до квазистационарных условий дало величину расхода равную $Q = 0.524 \text{ м}^3/\text{с}$. Картина течения через водослив показана на рис. 5. При моделировании использовались граничные условия аналогичные предыдущей модели.

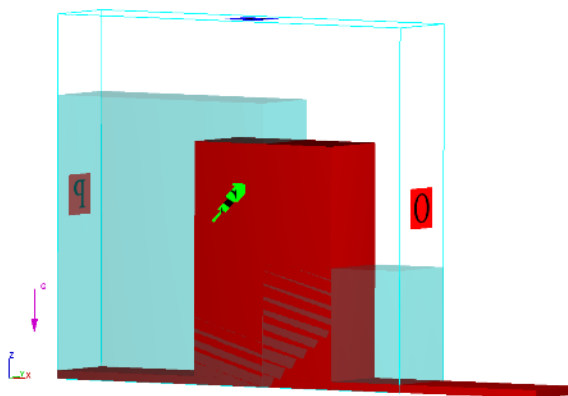


Рис. 4. Трёхмерная численная модель водослива с длинным гребнем с граничными условиями в программном комплексе FLOW-3D

Fig. 4. 3D numerical model of a long crest weir with boundary conditions in the FLOW-3D software

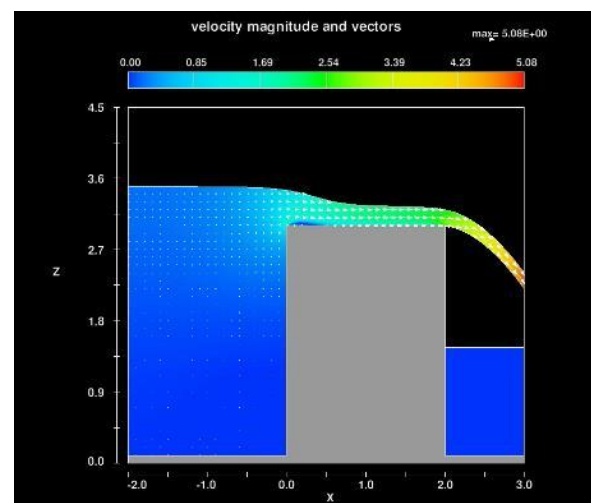


Рис. 5. Картина течения через водослив с длинным гребнем в пост-процессоре FLOW-3D (разрез по продольной оси численной модели). Цветом показано распределение скорости в м/с

Fig. 5. Pattern of the flow through a long crest weir in the FLOW-3D post-processor (cross section along the longitudinal axis of the numerical model). The color shows the velocity distribution in m/s

Ошибка в величине расхода, полученного в результате численного моделирования $(Q)_{num}$, и рассчитанного по формуле (1) $(Q)_{calc}$, не превысила 2%:

$$\Delta = \frac{(Q)_{num} - (Q)_{calc}}{(Q)_{calc}} \cdot 100\% = \frac{0.524 - 0.516}{0.516} \cdot 100\% = 1.6\% .$$

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДОСЛИВА С ПРОФИЛЕМ WES

Моделирование для водослива WES проводилось для аналогичных условий. Исходными данными для моделирования были:

- ширина подводящего и отводящего каналов составляет $b = 1.0$ м;
- высота водосливной стенки $c_u = c_d = 5.35$ м, где c_u - высота стенки со стороны верхнего бьефа, c_d – высота стенки со стороны нижнего бьефа;
- напор на гребне водослива $H = 1.0$ м.

Согласно [6-8], расход через водослив с длинным гребнем определяется по формуле (1), при этом коэффициент расхода водослива равен $m = 0.49$ [7, 8]. Подставляя исходные данные в формулу (1), получаем:

$$Q = 0.49 \cdot 1.0 \sqrt{2 \cdot 9.81} \cdot 1.0^{\frac{3}{2}} = 2.17 \text{ м}^3/\text{с}.$$

На рис. 6 приведена численная модель в расчётном ПО FLOW-3D. При моделировании использовались граничные условия аналогичные предыдущим моделям

В результате моделирования до квазистационарных условий было получено значение расхода через водослив $Q = 2.20 \text{ м}^3/\text{с}$.

Согласно [5], водослив WES является безвакуумным, что соответствует водосливу Кригера-Офицера [6], следовательно, давление на свободной поверхности потока и на низовой поверхности водослива должно быть близким к атмосферному. Таким образом, важнейшей характеристикой при моделировании такого водослива является распределение давления в потоке воды. Картина распределения давления при течении воды через водослив WES показана на рис. 7.

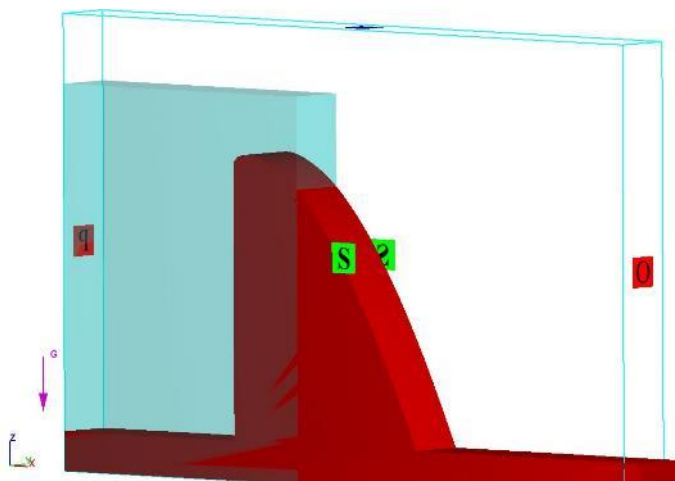


Рис. 6. Трёхмерная численная модель водослива с профилем WES с граничными условиями в среде программного комплекса FLOW-3D

Fig. 6. 3D numerical model of a WES profiled weir with boundary conditions in the FLOW-3D software

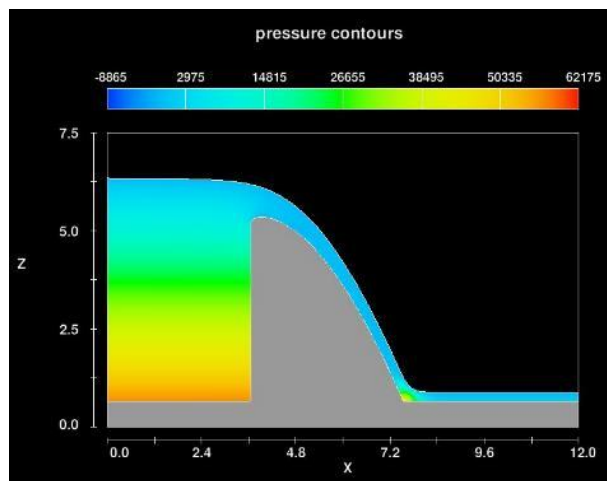


Рис. 7. Картина течения через водослив с профилем WES в пост-процессоре FLOW-3D (разрез по продольной оси численной модели). Цветом показано давление в Па

Fig. 7. Pattern of the flow through a WES profiled weir in the FLOW-3D post-processor (cross section along the longitudinal axis of the numerical model). The color shows the pressure distribution in Pa

Ошибка в величине расхода, полученного в результате численного моделирования $(Q)_{num}$, и рассчитанного по формуле (1) $(Q)_{calc}$, не превысила 2%:

$$\Delta = \frac{(Q)_{num} - (Q)_{calc}}{(Q)_{calc}} \cdot 100\% = \frac{2.20 - 2.17}{2.17} \cdot 100\% = 1.4\% .$$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённого численного моделирования и сопоставления результатов с расчётами по нормативным формулам было получено:

- пропускная способность водосливов не отличается более, чем на 2%, что соответствует точности определения коэффициента расхода;
- при моделировании водослива с острым гребнем, координаты профиля струи соответствуют нормативным и экспериментальным координатам;
- при моделировании водослива с длинным гребнем на горизонтальном участке водослива наблюдается участок с, практически, горизонтальной свободной поверхностью;
- при моделировании безвакуумного водослива с профилем WES давление на свободной поверхности потока и под струёй равно атмосферному, т.е водослив безвакуумный.

Таким образом, сравнивая результаты численного моделирования водосливов с результатами расчётов по общепринятым нормативным формулам можно сделать вывод о возможности использования программного ПО FLOW-3D при моделировании водосливов любой конфигурации. Также следует отметить, что успешная верификация расчётного ПО FLOW-3D позволяет использовать его для кросс-верификации альтернативных расчётных программных средств при моделировании аналогичных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ватин Н.И., Гиргидов А.А., Стрелец К.И. Численное моделирование трехмерного поля скорости в циклоне // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 5(23). С. 5-9. EDN NYDSNN.
2. Лятхер В.М., Прудовский А.М. Гидравлическое моделирование. М.: Энергоатомиздат, 1984. 392 с.
3. Гиргидов А.А. Гибридное моделирование в проектировании гидротехнических сооружений и FLOW-3D как средство его реализации // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 3(21). С. 21-27. EDN NTLXPX.
4. FLOW-3D® User's Manual, Version 12, Flow Science, Inc., 2019.
5. Гиргидов А.Д., Румянцев И. С., Штеренлихт Д. В. Предложения по терминологии и классификации прямых водосливов // Гидротехническое строительство. 2009. № 3. С. 51-53. EDN JWWEWF.
6. John, James E.A. Introduction to fluid mechanics / James E.A. John, William L. Haberman. 3rd ed. 609 p.
7. Справочник по гидравлическим расчетам. Под редакцией П.Г. Киселева. Изд. 4-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1972. 312с.
8. Лаппо Д.Д. и др. Гидравлические расчёты водосбросных гидротехнических сооружений: Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1988. 624 с.
9. Hirt C.W. Nicols B.D. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries, Journal of Computational Physics, Vol. 39, 1981, pp. 201-225.
10. Чоу В.Т. Гидравлика открытых каналов (пер. с англ.). М.: Стройиздат. 1969. 464 с.

ОБ АВТОРАХ

Армен Артурович Гиргидов – доцент. Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ). 195251, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.29. E-mail: ardgir@mail.ru

ABOUT THE AUTHORS

Armen A. Girgidov – student. Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU). 195251, Russia, St.Petersburg, Polytechnicheskaya st., 29. E-mail: ardgir@mail.ru