

Гибридное моделирование в проектировании гидротехнических сооружений и FLOW-3D® как средство его реализации

*К.т.н., в.н.с. А.А. Гиргидов,
ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева»*

Ключевые слова: проектирование гидротехнических сооружений; гибридное моделирование; программный комплекс FLOW-3D®.

Одним из важнейших элементов проектирования гидротехнических сооружений является моделирование движения потока воды через сооружения. Вследствие того, что гидротехнические сооружения в большинстве своем являются уникальными по расположению, конструкции, расходам воды и пр., гидравлические явления на них также являются уникальными. В настоящее время широко используются два вида моделирования – физическое и математическое моделирование [1, 2].

В физическом моделировании, основанном на экспериментальных исследованиях модели объекта (гидроузла, самолета, корабля и пр.), имеется основная проблема практической ценности и применимости получаемых результатов к натурному объекту. Основным преимуществом физического моделирования является наглядность [3, 4].

Математическое моделирование гидравлических явлений реализуется, как правило, в виде численного моделирования (за исключением задач фильтрации). Оно позволяет получить экспресс оценку проектного решения, проводя расчеты с большим количеством вариантов, на ранних стадиях проектирования [5] и, при необходимости, произвести его корректировку. Используемые в программных пакетах трехмерного математического моделирования уравнения Рейнольдса [4, 6], описывающие потоки в гидротехнических сооружениях, являются незамкнутыми. Поэтому при реализации численного моделирования важными факторами, определяющими достоверность результатов расчетов, являются как выбор модели турбулентности (k , $k-\varepsilon$, LES и пр.) [6], так и задание параметров этих моделей, которые зависят главным образом от геометрической формы и, как правило, заранее не известны. Одним из инструментов, позволяющих проводить трехмерное моделирование безнапорных течений, является программный комплекс FLOW-3D®.

Существенным средством для преодоления описанных выше трудностей является их совместное использование, которое называют «гибридным моделированием» [1, 3]. Данный вид моделирования позволяет достаточно эффективно использовать все возможные инструменты для получения обоснованного проектного решения и исключить возможные негативные явления, такие как масштабный эффект. Использование при гибридном моделировании математического аппарата является наиболее сложным при выборе численной модели. Одним из наиболее развитых программных комплексов, разработанных для моделирования потоков со свободной поверхностью, является комплекс FLOW-3D®. Методика использования «гибридного моделирования» состоит из следующих трех основных этапов.

1. Создание физической модели в соответствии с существующими возможностями и требованиями и проведение на ней экспериментов (рис. 1а, 2а, 3а, 4а).
2. Создание компьютерной геометрической модели (рис. 1б, 2б, 3б, 4б) и на ее основе численной модели и последующий расчет на ней потока – гидравлических режимов, рассмотренных на физической модели. Параметры, характеризующие турбулентность, сетку, шероховатость и др. [7,8,9], подбираются на численной модели таким образом, чтобы важнейшие расчетные параметры потока на физической и численной моделях совпадали. Этот этап называется верификацией численной модели на физической модели.
3. Численное моделирование позволяет произвести расчет для натуральных размеров изучаемого объекта, при этом предоставляется возможность сохранить значения параметров численной модели, полученные при расчете потока в размерах физической модели.

Проведенное численное моделирование на программном комплексе FLOW-3D® показало, что каждое гидротехническое сооружение, как при проектировании, так и при физическом моделировании, требует особого подхода и использования специфических параметров сетки (рис. 5), турбулентности, граничных и начальных условий, вводимых параметров численных моделей и пр. [6, 7, 11].

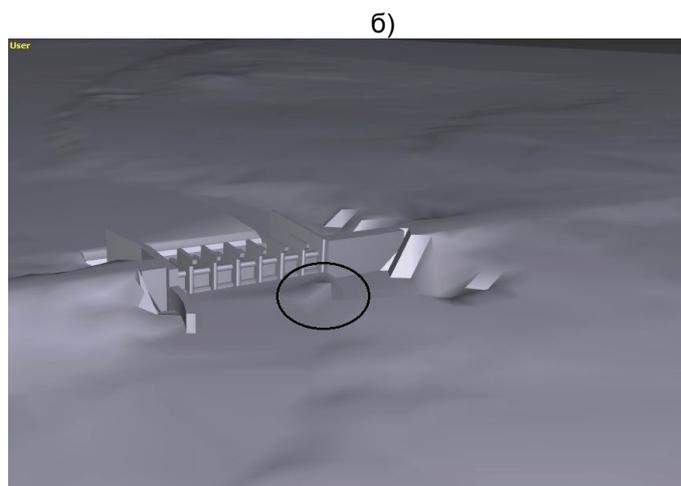
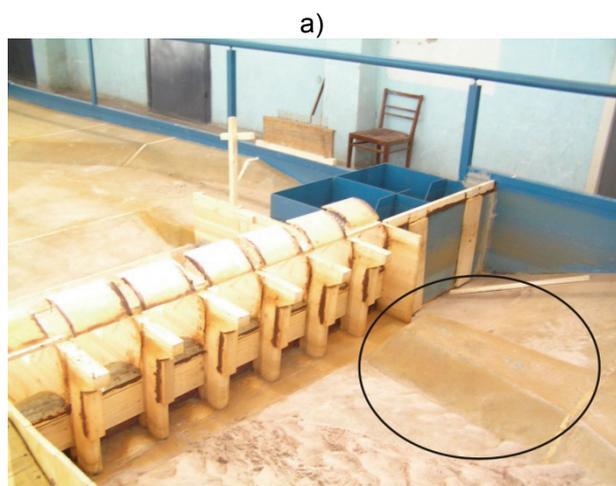


Рисунок 1. Вид с верхнего бьефа на физическую (а) и трехмерную компьютерную геометрическую (б) модели Нижне-Зейского гидроузла (М1:100). Черным обведены различия в построении моделей со стороны верхнего бьефа

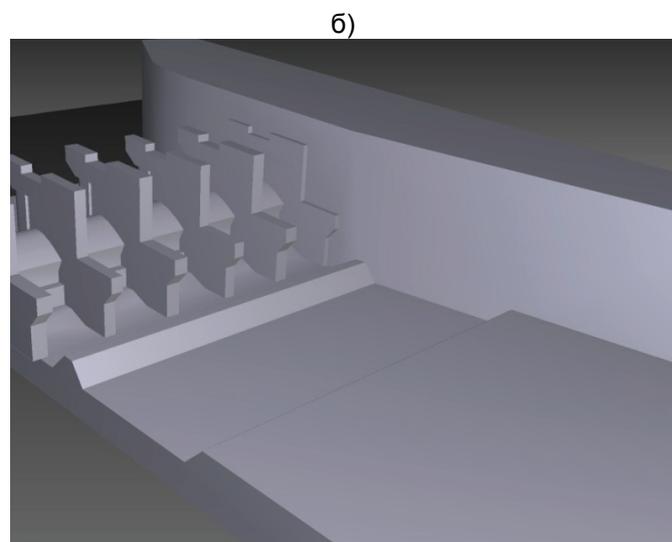
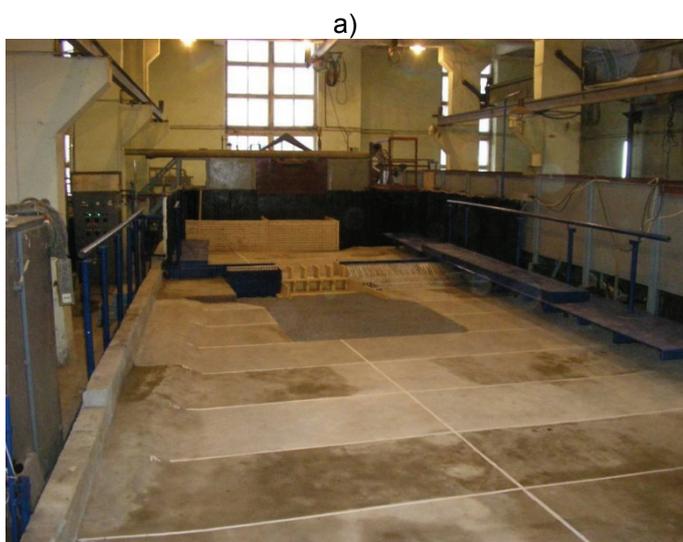


Рисунок 2. Вид с нижнего бьефа на физическую (а) и трехмерную компьютерную геометрическую (б) модели водосброса Нижне-Бурейского гидроузла (М1:100) (один из вариантов)

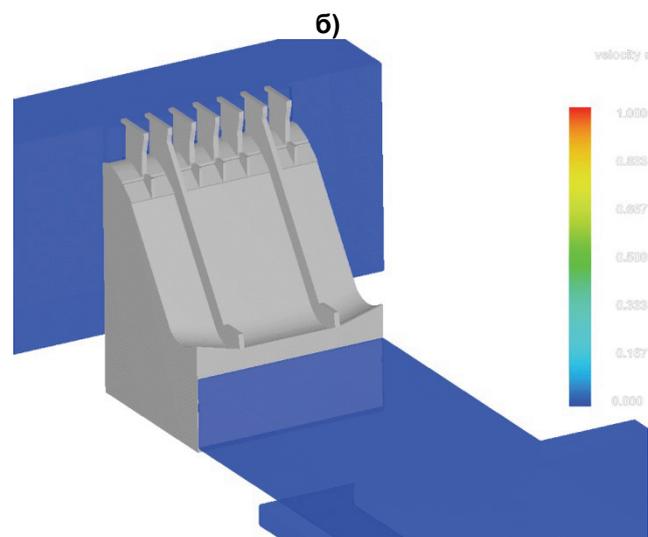
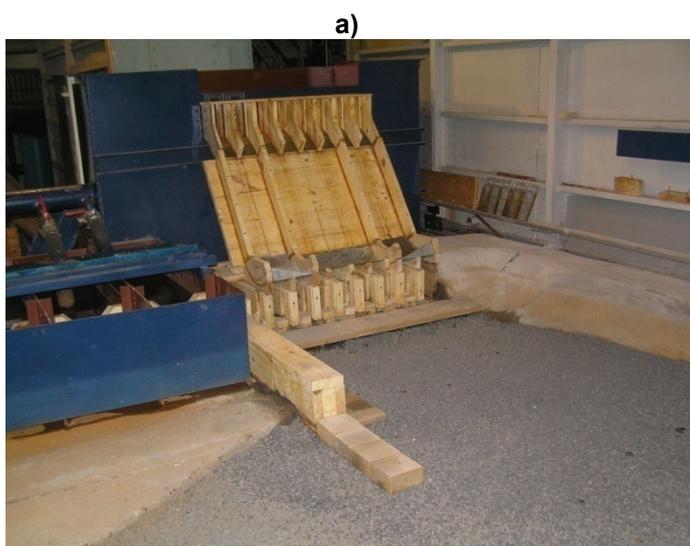


Рисунок 3. Вид с нижнего бьефа на физическую (а) [10] и трехмерную компьютерную геометрическую (б) модели водосброса Бурейского гидроузла (М1:100)

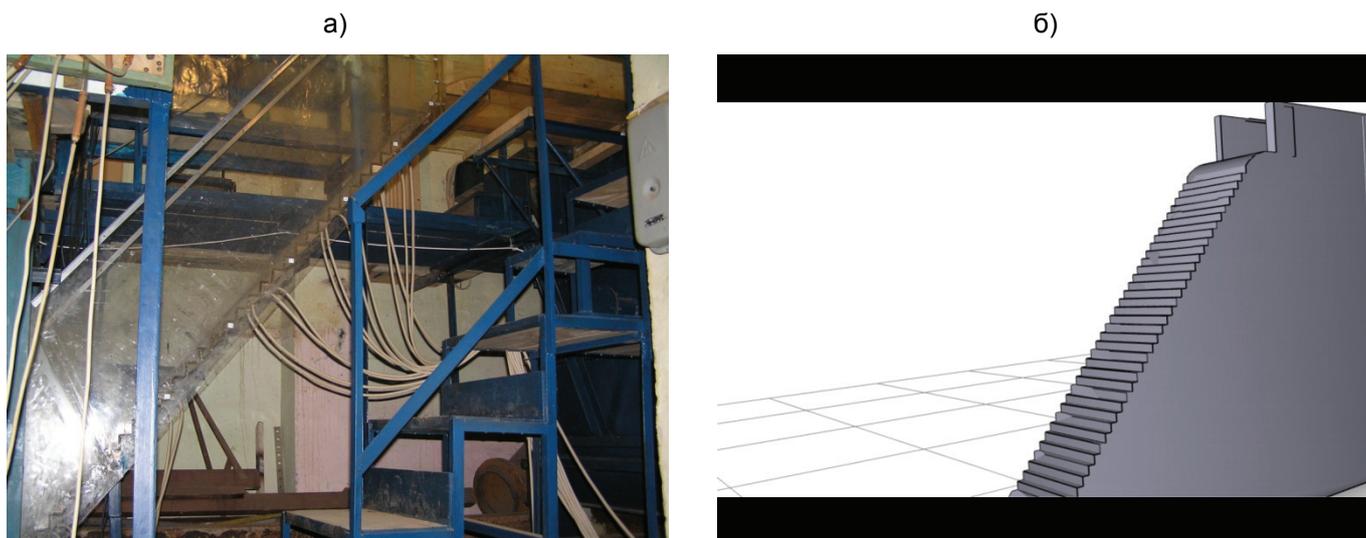


Рисунок 4. Вид с нижнего бьефа на физическую (а) и трехмерную компьютерную геометрическую (б) модели ступенчатого водосброса №2 Богучанского гидроузла (М1:30)

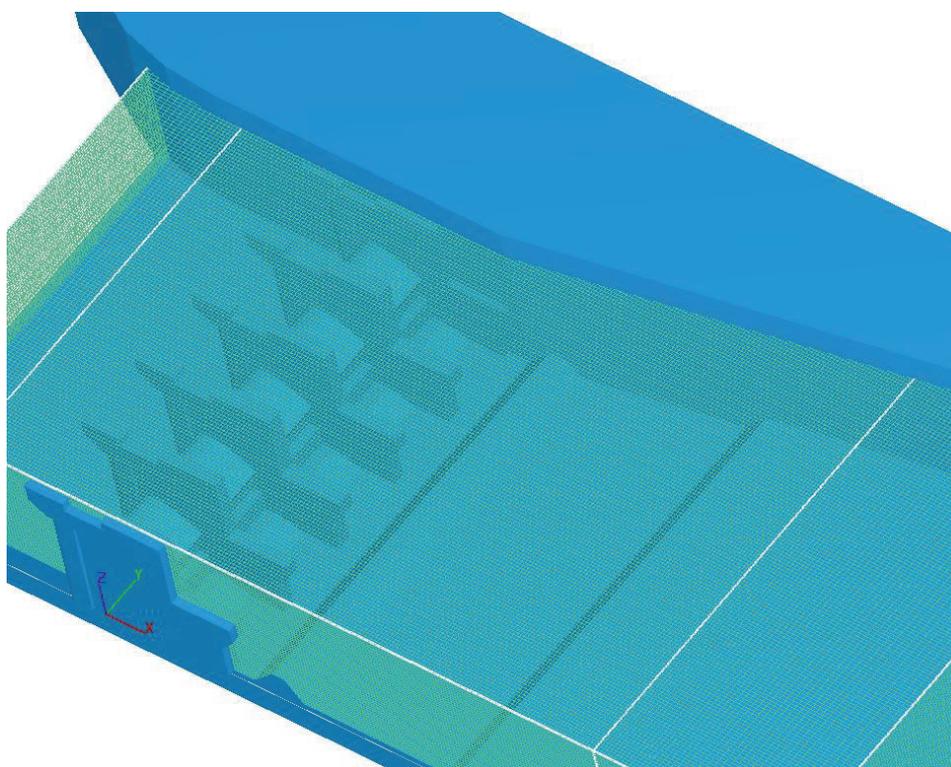


Рисунок 5. Сетка в среде программного комплекса FLOW-3D®, построенная для математической модели водосброса Нижне-Бурейского гидроузла

Сопоставления результатов, полученных на ряде физических моделей, с результатами численного моделирования показали, что трехмерные математические модели достаточно корректно описывают работу водосбросных сооружений гидроузлов (рис. 6, 7, 8). Например, верификация полученных математических моделей показала, что использование FLOW-3D® при моделировании гидравлических процессов дает результаты, близкие как к нормативным [12, 13, 14], так и к лабораторным (рис. 9, 10) и натурным результатам (рис. 11). Расхождения в пропускной способности не превышает 5%, в скорости – 7%, в значениях гидродинамического давления – 3%.

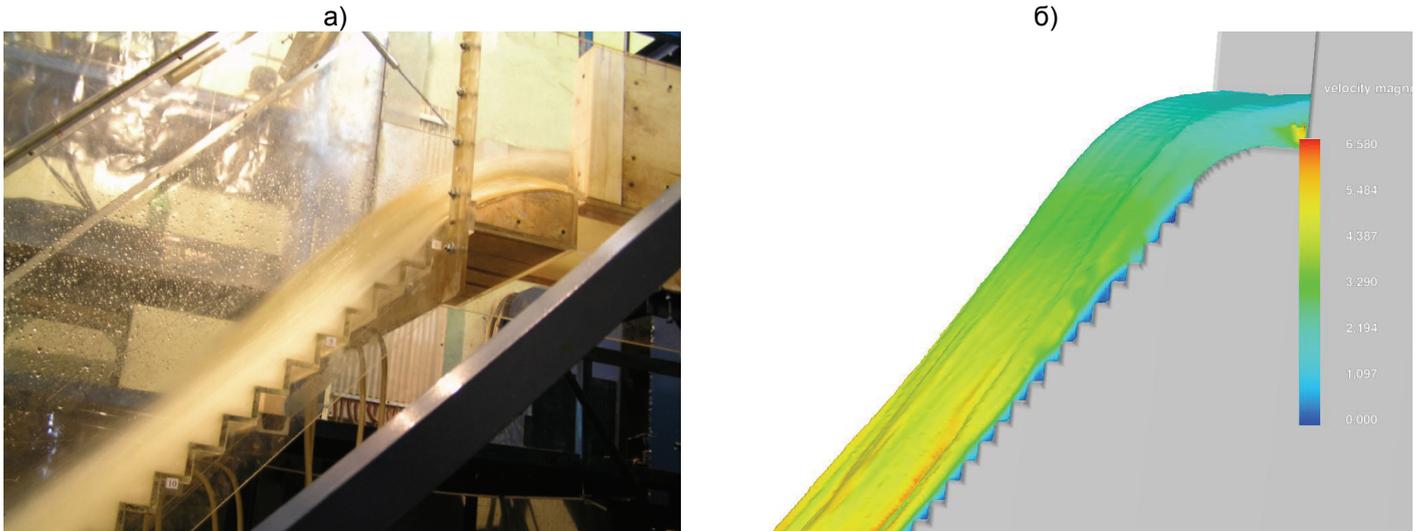


Рисунок 6. Вид на фрагмент струи на физической (а) и математической (б) моделях ступенчатого водосброса №2 Богучанского гидроузла (М1:30)

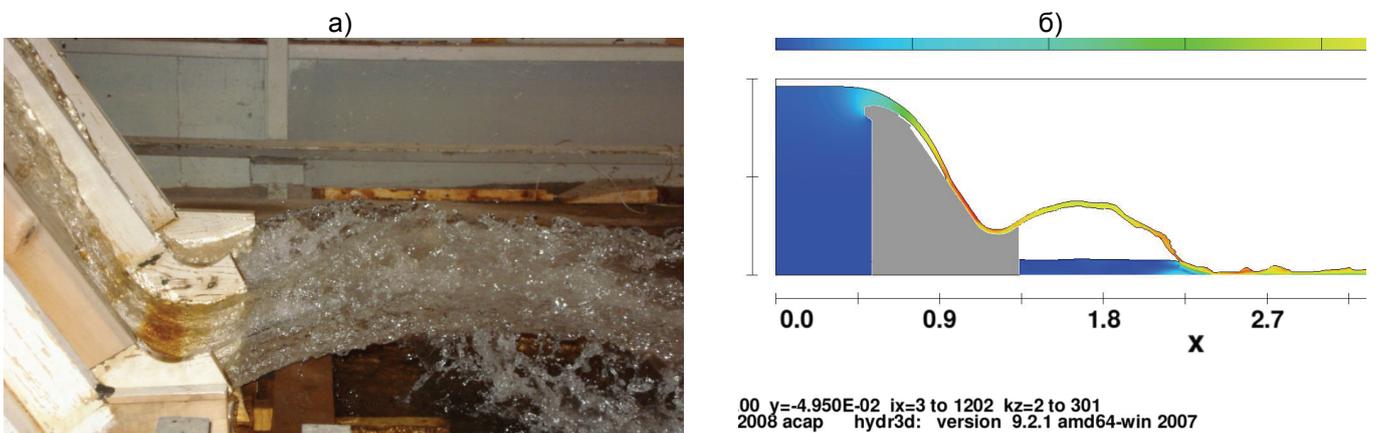


Рисунок 7. Вид на фрагмент струи на физической (а) и математической (б) моделях водосброса Бурейского гидроузла (М1:100)

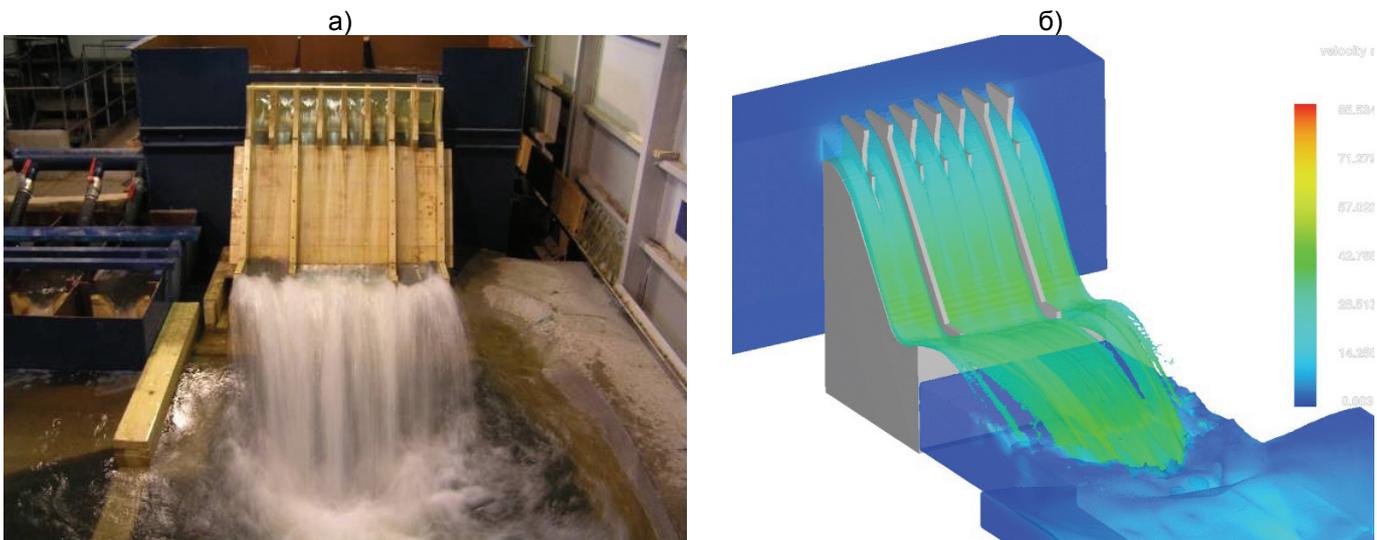


Рисунок 8. Вид на струю на физической (а) и математической (б) моделях водосброса Бурейского гидроузла (М1:100)

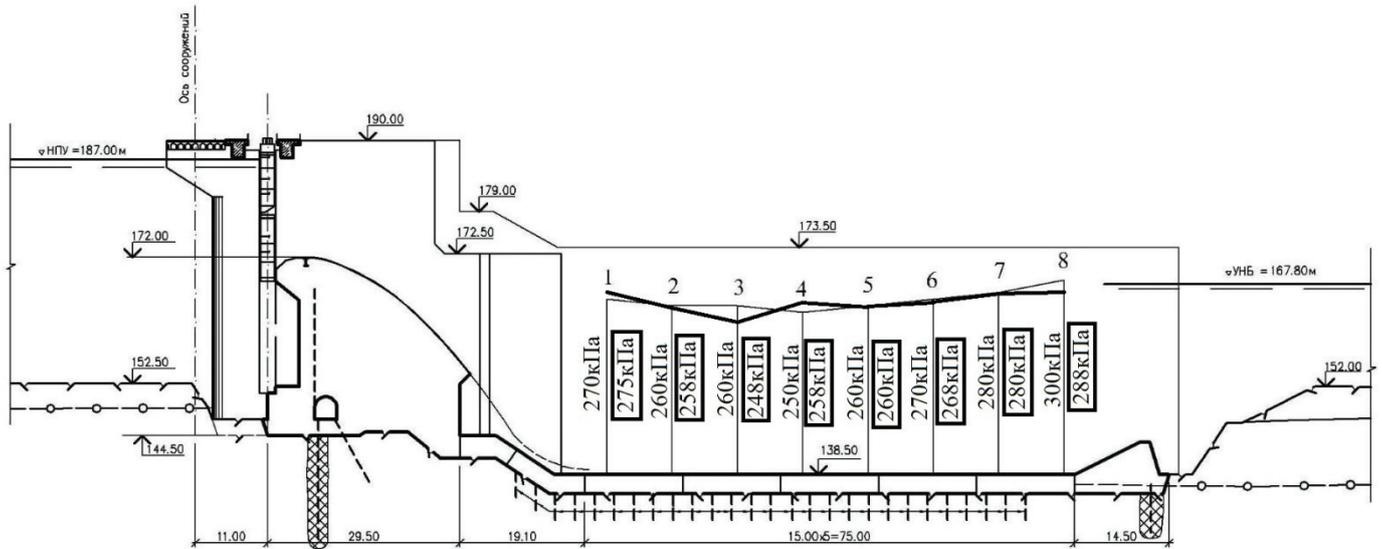


Рисунок 9. Сопоставление распределения гидродинамического давления в водобойном колодце Нижне-Зейского гидроузла при пропуске расхода 0,01%+г.п. при ФПУ=187,70м БС (экспериментальные данные показаны без рамок и тонкой линией, результаты математического моделирования на ПК FLOW-3D показаны в рамках и толстой линией)

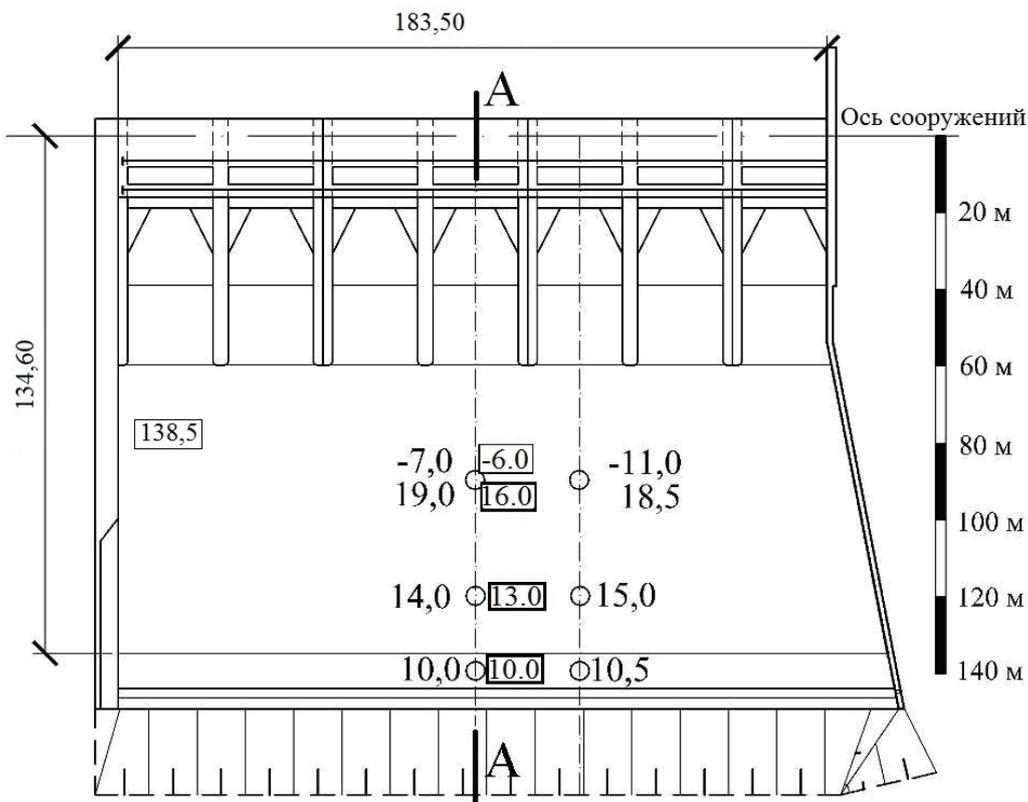


Рисунок 10. Максимальные скорости в водобойном колодце Нижне-Зейского гидроузла при пропуске расхода 0,01%+г.п. при ФПУ=187,70м БС (экспериментальные данные показаны без рамок, результаты математического моделирования на ПК FLOW-3D показаны в рамках). 138,50м БС – отметка дна колодца

а)



б)

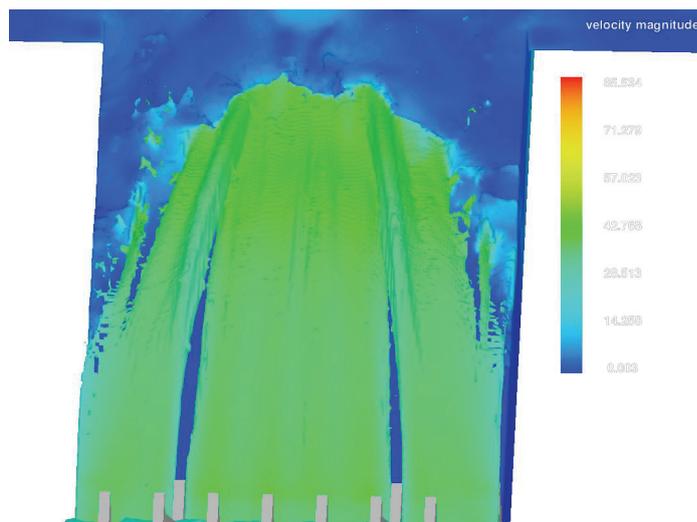


Рисунок 11. Вид сверху на поток воды при натурном испытании эксплуатационного водосброса Бурейского гидроузла (а) и тот же вид на поток при математическом моделировании (б) (М1:1)

Использование калиброванного и верифицированного математического аппарата позволяет детально исследовать части объекта, которые недоступны при физическом моделировании [11,15,16] вследствие масштабного эффекта, путем использования более мелкой мультиблочной сетки [11,17]. Также программный комплекс позволяет исследовать процесс деформации дна акватории [18], динамики работы механического оборудования гидроузла [19]. Необходимо отметить, что использование программного комплекса FLOW-3D® не ограничивается только гидротехническими сооружениями и течением со свободной поверхностью, эта программа применяется и в аэрокосмической отрасли, литейном деле, исследования, связанных с образованием капель малого размера, кораблестроении и прочих [20-24].

Проведенное гибридное моделирование, представленное в данной работе, показало, что дальнейшее использование FLOW-3D® для моделирования гидравлических процессов на сооружениях гидроузлов при их проектировании позволит не только исключить возможное проявление масштабного эффекта при физическом моделировании, но и определить ряд параметров, которые недоступны при физическом моделировании. Методика обоснования конструкций гидротехнических сооружений, созданная на основе гибридного моделирования, позволит принимать решения на ранних стадиях проектирования.

Литература

1. Гиргидов А. А. Использование FLOW-3D как инженерного инструмента при гибридном моделировании // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2010. Т. 260. С. 12-19.
2. Ивашинцов Д. А., Векслер А. Б., Климович В. И., Швайнштейн А. М. Современные подходы в гидравлических исследованиях гидротехнических сооружений и водотоков // Гидротехническое строительство. 2003. №8.
3. Лятхер В. М., Прудовский А. М. Гидравлическое моделирование. М. : Энергоатомиздат, 1984. 392 с.
4. Гиргидов А. Д. Механика жидкости и газа (гидравлика): Учебник для вузов. Спб. : Изд-во СПбГПУ, 2004. 545с.
5. Girgido A. A. Application Note: Using FLOW-3D as an Engineering Tool for Hybrid Modeling. [Электронный ресурс]. URL: http://www.flow3d.com/resources/news_10/resources-news-winter-application-note.html (дата обращения: 27.04.2011).
6. FLOW-3D® User's Manual, Version 9.3, Flow Science, Inc., 2008. 821p.
7. Hirt C., Nichols B. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. J. Comp. Phys.1980. 39. P. 201.
8. Hirt C., Sicilian J. A Porosity Technique for the Definition of Obstacles in Rectangular Cell Meshes. Proc. Fourth International Conf., Ship Hydro. National Academy of Science, Washington DC. 1985.
9. Hirt C. W., Brethour J. M. Contact Line on Rough Surfaces with Application to Air Entrainment, Presented at the 11th International Coating Science and Technology Symposium, September 23-25, 2002, Minneapolis, Minnesota [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://www.flow3d.com/pdfs/tp/coat_tp/FloSci-Bib22-02.pdf (дата обращения: 29.04.2011).

10. Васильев А. В., Двуреков В. Н., Дерюгин Г. К., Кузнецов Г. Н., Прокофьев В. А., Судольский Г. А. Гидравлическое обоснование новой конструкции эксплуатационного водосброса Бурейской ГЭС // Третья научно-техническая конференция «Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии». Материалы конференции. СПб. : Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», 2008.
11. Barkhudarov Michaelю Multi-Block Gridding Technique for FLOW-3D (Revised)ю Flow Science Technical Note #59-R2, FSI-00-TN59-R2. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: http://www.flow3d.com/pdfs/tp/gen_tp/FloSci-Bib17-04.pdf (дата обращения: 29.04.2011).
12. Рекомендации по гидравлическому расчёту водосливов. Ч.1. Прямые водосливы. Л. : Энергия, 1974. 312с.
13. Справочник по гидравлическим расчетам / Под ред. Киселева П. Г. М. : Энергия, 1972. 312 с.
14. Гидравлические расчеты водосбросных гидротехнических сооружений: Справочное пособие / Под ред. Д. Д. Лаппо. М. : Энергоатомиздат, 1988. 624 с.
15. Gessler Daniel. 3-D numeric modeling of the new powerhouse discharge and existing tailrace junction. [Электронный ресурс]. Систем. требования: Adobe Acrobat Reader. URL: <http://www.pplweb.com/NR/rdonlyres/460CB462-D9AF-49D2-8126-600A5B82CE78/0/report53Dmodelingoftailrace.pdf> (дата обращения: 29.04.2011).
16. Griffith Richard A., Rutherford James H., Alavi A., Moore David D., Groeneveld J. Stability Review of the Wanapum Spillway Using CFD Analysis. Canadian Dam Association Bulletin, Fall. 2007.
17. Fabián A. Bombardelli, Inês Meireles, Jorge Matos. Laboratory measurements and multi-block numerical simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways. SpringerLink, Environmental Fluid Mechanics, Online First™. 26 August 2010.
18. Vasquez J.A., Walsh B.W., CFD simulation of local scour in complex piers under tidal flow, 33rd IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment, © 2009 by International Association of Hydraulic Engineering & Research (IAHR), ISBN: 978-94-90365-01-1.
19. Amorim Jose Carlos C., Rodrigues Cavalcanti Renata, Marques Marcelo G., A Numerical and Experimental Study of Hydraulic Jump Stilling Basin, Advances in Hydro-Science and Engineering, Volume VI, Presented at the International Conference on Hydro-Science and Engineering, 2004.
20. Чижюмов С. Д. Основы гидродинамики : учеб. пособие / ГОУВПО «КНАГТУ». Комсомольск-на-Амуре, 2007. 106 с.
21. Behruzi Phillipp, Michaelis Mark, Khimeche Gaël, Behavior of the Cryogenic Propellant Tanks during the First Flight of the Ariane 5 ESC-A Upper Stage, 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 9-12 July 2006, Sacramento, California, © 2006 by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.
22. Anurag Chandorkar and Shayan Palit, Simulation of Droplet Dynamics and Mixing in Microfluidic Devices using a VOF-Based Method, Sensors & Transducers journal, ISSN 1726-5479 © 2009 by IFSA, Vol.7, Special Issue "MEMS: From Micro Devices to Wireless Systems," October 2009, pp. 136-149.
23. Shan-Hwei Ou, Tai-Wen Hsu, Jian-Feng Lin, Jian-Wu Lai, Shih-Hsiang Lin, Chen-Chen Chang, Yuan-Jyh Lan, Experimental and Numerical Studies on Wave Transformation over Artificial Reefs, Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering, No 32 (2010), Shanghai, China, 2010.
24. Kazuhiko Terashima, Ryuji Ito, Yoshiyuki Noda, Yoji Masui and Takahiro Iwasa, Innovative Integrated Simulator for Agile Control Design on Shipboard Crane Considering Ship and Load Sway, 2010 IEEE International Conference on Control Applications, Part of 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, Yokohama, Japan, September 8-10, 2010.

**Армен Артурович Гиргидов, Санкт-Петербург, Россия*

Тел. моб.: +7 (812) 972-4047; эл. почта: ghirghidovaa@vniig.ru

Hybrid simulation in hydrotechnical facilities design and FLOW-3D as a tool its realization

A. A. Girgidov,

JSC The B.E. Vedeneev VNIIG, Saint-Petersburg, Russia
+7 (812) 972-4047; e-mail: ghirgidovaa@vniig.ru

Key words

hydrotechnical facilities design, hybrid simulation, CFD software complex FLOW-3D®

Abstract

Hydraulic phenomena on hydraulic facilities are in most cases unique; therefore their modeling become more difficult. Hybrid simulation is one of the ways to solve the problem. It combines physical and computational modeling.

The article gives examples carried out in JSC The B.E. Vedeneev VNIIG of hybrid modeling. Using the commercial CFD solution – FLOW-3D® as a numerical simulation tool for the design Hydro power plant spillways is shown.

Testing of the software complex FLOW-3D® was carried out for both the laboratory and for field studies. Comparisons of numerical results to laboratory and field studies are well agreed. Using the CAB solution FLOW-3D® eliminates the emerging scale effects and it determines the numbers of parameters are not available for physical modeling.

Creating design methodology based on hybrid modeling of hydrotechnical facilities will simplify to make decisions at the early design stages.

References

1. Girgidov A. A. *Izvestiya VNIIG im. B.E. Vedeneeva*. 2010. vol. 260. p. 12-19. (rus)
2. Ivashintsov D. A., Veksler A. B., Klimovich V. I., SHvaynshteyn A. M. *Gidrotekhnicheskoe stroitelstvo*. 2003. No. 8. (rus)
3. Lyatkher V. M., Prudovskiy A. M. *Gidravlichesкое modelirovanie* [Hydraulic modelling]. Moscow : Energoatomizdat, 1984. 392 p. (rus)
4. Girgidov A. D. *Mekhanika zhidkosti i gaza (gidravlika)* [Fluid mechanics (Hydraulics)]. Spb. : Izd-vo SPbGPU, 2004. 545 p. (rus)
5. Girgidov A. A. *Application Note: Using FLOW-3D as an Engineering Tool for Hybrid Modeling*. URL: http://www.flow3d.com/resources/news_10/resources-news-winter-application-note.html (27.04.2011).
6. *FLOW-3D® User's Manual, Version 9.3*. Flow Science, Inc., 2008. 821 p.
7. Hirt C., Nichols B. Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries. *J. Comp. Phys.* 1980. 39. P. 201.
8. Hirt C., Sicilian J. A Porosity Technique for the Definition of Obstacles in Rectangular Cell Meshes. *Proc. Fourth International Conf., Ship Hydro*. National Academy of Science, Washington DC. 1985.
9. Hirt C. W., Brethour J. M. Contact Line on Rough Surfaces with Application to Air Entrainment, Presented at the *11th International Coating Science and Technology Symposium*, September 23-25, 2002, Minneapolis, Minnesota. URL: http://www.flow3d.com/pdfs/tp/coat_tp/FloSci-Bib22-02.pdf (data obrashcheniya: 29.04.2011).
10. Vasilev A. V., Dvurekov V. N., Deryugin G. K., Kuznetsov G. N., Prokofev V. A., Sudolskiy G. A. *Tretya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Gidroenergetika. Novye razrabotki i tekhnologii»*. Materialy konferentsii. Saint-Petersburg : Izd-vo OAO «VNIIG im. B.E. Vedeneeva», 2008. (rus)
11. Barkhudarov M. Multi-Block Gridding Technique for FLOW-3D (Revised). *Flow Science Technical Note #59-R2, FSI-00-TN59-R2*. URL: http://www.flow3d.com/pdfs/tp/gen_tp/FloSci-Bib17-04.pdf (29.04.2011).
12. *Rekomendatsii po gidravlicheskому raschetu vodoslivov. CH.1. Pryamyе vodoslivy* [Guidelines for hydraulic calculation of spillways. Part 1. Straight spillways]. Leningrad : Energiya, 1974. 312 p.
13. Kiselev P. G. *Spravochnik po gidravlicheskim raschetam* [Manual on the hydraulic calculations]. Moscow : Energiya, 1972. 312 p. (rus)
14. Lappo D. D. *Gidravlicheskie raschety vodosbrosnykh gidrotekhnicheskikh sooruzheniy: Spravochnoe posobie* [Hydraulic calculations of spillway works. Handbook]. Moscow : Energoatomizdat, 1988. 624 p. (rus)

15. Gessler D. *3-D numeric modeling of the new powerhouse discharge and existing tailrace junction*. URL: <http://www.pplweb.com/NR/rdonlyres/460CB462-D9AF-49D2-8126-600A5B82CE78/0/report53Dmodelingoftailrace.pdf> (29.04.2011).
16. Griffith Richard A., Rutherford James H., Alavi A., Moore David D., Groeneveld J. Stability Review of the Wanapum Spillway Using CFD Analysis. *Canadian Dam Association Bulletin*, Fall. 2007.
17. Fabián A. Bombardelli, Inês Meireles, Jorge Matos. Laboratory measurements and multi-block numerical simulations of the mean flow and turbulence in the non-aerated skimming flow region of steep stepped spillways. SpringerLink, *Environmental Fluid Mechanics*, Online First™. 26 August 2010.
18. Vasquez J.A., Walsh B.W., CFD simulation of local scour in complex piers under tidal flow. 33rd *IAHR Congress: Water Engineering for a Sustainable Environment*, © 2009 by International Association of Hydraulic Engineering & Research (IAHR), ISBN: 978-94-90365-01-1.
19. Amorim Jose Carlos C., Rodrigues Cavalcanti Renata, Marques Marcelo G. A Numerical and Experimental Study of Hydraulic Jump Stilling Basin. *Advances in Hydro-Science and Engineering*. 2004. Vol. VI.
20. Chizhiumov S. D. *Osnovy gidrodinamiki* [Fundamental hydrodynamics]. Komsomolsk-na-Amure : KnAGTU, 2007. 106 p.
21. Behruzi Phillipp, Michaelis Mark, Khimeche Gaël, Behavior of the Cryogenic Propellant Tanks during the First Flight of the Ariane 5 ESC-A Upper Stage, 42nd *AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 9-12 July 2006, Sacramento, California, © 2006 by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc.
22. Anurag Chandorkar and Shayan Palit. Simulation of Droplet Dynamics and Mixing in Microfluidic Devices using a VOF-Based Method. *Sensors & Transducers journal*. Vol.7, Special No. "MEMS: From Micro Devices to Wireless Systems," October 2009, pp. 136-149.
23. Shan-Hwei Ou, Tai-Wen Hsu, Jian-Feng Lin, Jian-Wu Lai, Shih-Hsiang Lin, Chen-Chen Chang, Yuan-Jyh Lan, Experimental and Numerical Studies on Wave Transformation over Artificial Reefs. *Proceedings of the International Conference on Coastal Engineering*, No 32 (2010), Shanghai, China, 2010.
24. Kazuhiko Terashima, Ryuji Ito, Yoshiyuki Noda, Yoji Masui and Takahiro Iwasa, Innovative Integrated Simulator for Agile Control Design on Shipboard Crane Considering Ship and Load Sway. *2010 IEEE International Conference on Control Applications*, Part of 2010 IEEE Multi-Conference on Systems and Control, Yokohama, Japan, September 8-10, 2010.

Full text of this article in Russian: pp. 21-27.