



УДК 620.92:627.8.04

*А.В. Скрынник*

## **КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭНЕРГОУСТАНОВОК НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ**

*A.V. Skrynnik*

### **COMPUTER AIDED DESIGN TECHNOLOGY POWER PLANTS BASED ON RENEWABLE ENERGY**

В статье рассмотрены вопросы применения современных компьютерных технологий в области проектирования гидроэлектростанций. Изложены основные тенденции автоматизации проектирования гидроэлектростанций с использованием трехмерного компьютерного моделирования, параметризации, систем виртуальной реальности.

ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ. ПРОЕКТИРОВАНИЕ. САПР. ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ. ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ. СИСТЕМА ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ.

In clause deals with the application of modern computer technology in the design of hydro power plants. The article describes the main trends in computer aided designing of hydro power plants using three-dimensional computer modelling, parametrization, virtual reality systems.

HYDRO POWER PLANTS. DESIGN. CAD SYSTEM. THREE-DIMENSIONAL MODEL. PARAMETRIC MODEL. VIRTUAL REALITY SYSTEM.

Энергоустановки на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) являются наиболее важными источниками электроэнергии, обеспечивающими рациональное природопользование, экологическую безопасность и энергоэффективность. Научно обоснованное развитие возобновляемой энергетики невозможно без совершенствования технологий проектирования. Одно из направлений внедрения прогрессивных методов — применение современных компьютерных технологий в процессе проектирования, строительства и эксплуатации объектов на основе ВИЭ.

Эффективное использование компьютерных технологий позволяет сократить количество ошибок на стадии проектирования, снизить сроки подготовки проектной документации, обеспечить совместную работу проектировщиков, строителей и эксплуатирующих организаций и тем самым повысить конкурентоспособность выпускаемого проекта [1].

Автоматизированная система проектирования (САПР), основанная на современных ком-

пьютерных технологиях, должна обеспечивать автоматизацию выполнения как графических, так и расчетных проектных процедур [2].

Предлагаемая автором технология предполагает использование трехмерной модели объекта для проведения технико-экономического анализа, расчета прочностных, гидравлических, энергетических, экономических и прочих характеристик элементов проектируемого объекта, а также создания проектной документации. Важной составляющей современной технологии проектирования является методика автоматизированного создания трехмерной модели энергетической установки [3]. Существенные результаты в разработке САПР ГЭС были достигнуты на кафедре возобновляемых источников энергии и гидроэнергетики СПбГПУ. В частности методология автоматизированного, в том числе трехмерного, моделирования гидроэнергетических установок была развита на кафедре ВИЭГ под руководством академика РАН Ю.С. Васильева и профессора Л.И. Кубышкина. Под их руководством выполняли научную работу О.С. Морозов

(автоматизация графических процедур), С.В. Светозарская (параметрическое моделирование) и др. В настоящее время на кафедре продолжают исследования и разработки в области автоматизации проектирования объектов возобновляемой энергетики, ведется работа в рамках научно-образовательных программ.

Автоматизация построения трехмерной модели энергетической установки достигается за счет использования базы данных, включающей параметрические модели оборудования и сооружений установок на основе ВИЭ, и прикладного программного обеспечения для расчета параметров проектируемого объекта, а также систем визуализации [4].

Системы автоматизированного проектирования играют ключевую роль в процессе проектирования ГЭС. Более того, цифровая модель, создаваемая при разработке проекта, в дальнейшем может сопровождать гидроэнергетический объект на стадиях строительства и эксплуатации, в том числе может быть использована при реконструкции сооружений и модернизации оборудования. На рис. 1 представлена блок-схема, укрупненно отображающая основные процессы, выполняемые на этапе проектирования гидроэлектростанции. Данная схема соответствует стадии «Технический проект» и является одним из вариантов организации проектных работ.

Существует множество факторов, влияющих на последовательность выполнения тех или иных операций (загруженность сотрудников другими проектами, бюджет проекта и т. д.), и соответственно блок-схема может выглядеть иначе. Данная блок-схема показывает, насколько значимое место в проектировании ГЭС занимают процессы анализа возможных вариантов конструкции и принятых решений, взаимосвязки оборудования и сооружений гидроузла. Для данных целей могут быть эффективно использованы технологии трехмерного компьютерного моделирования, которые в современных системах автоматизированного проектирования имеют основополагающее значение.

Важное звено САПР — библиотека параметрических моделей оборудования и элементов строительных конструкций. В настоящей работе под параметрическими моделями оборудования или сооружений понимается компьютерная

трехмерная модель, в которой при изменении одного или нескольких геометрических размеров (управляющие параметры) происходит автоматическая перестройка всей геометрии по заданным зависимостям.

Модель ГЭС представляет собой составную модель, включающую несколько отдельных деталей — компонентов энергетической установки, расположение которых определяется зависимостями и ограничениями.

Параметрические модели проектируемого объекта создаются в среде AutoDesk Inventor [1] на основе математического обеспечения, разработанного для описания этих моделей. Ниже приведено математическое описание некоторых конструктивных компонентов оборудования и сооружений ГЭС [5].

#### Рабочее колесо обратимой гидротурбины.

В качестве базового параметра, управляющего размерами модели рабочего колеса гидротурбины, был выбран его диаметр  $D_1$ , величина которого может быть определена исходя из приведенных ниже зависимостей.

Диаметр рабочего колеса турбины определяется по формуле

$$D_1 = \frac{n'_{I \text{ опт}} \sqrt{H_p}}{n}.$$

Здесь  $n'_{I \text{ опт}}$  — приведенная частота вращения турбины при максимальном КПД;  $H_p$  — расчетный напор гидротурбины, соответствующий оптимуму универсальной характеристики турбины;  $n$  — нормальная частота вращения гидротурбины, определяемая при помощи выражения

$$n = \frac{n_S H^{3/4}}{3,65 \sqrt{Q_p}};$$

где  $Q_p$  — расход воды, соответствующий расчетному напору;  $n_S$  — коэффициент быстроходности гидротурбины,

$$n_S = 3,65 \frac{n \sqrt{Q_p}}{H^{3/4}} = 3,65 n'_{I \text{ опт}} \sqrt{Q'_{I \text{ опт}}};$$

$Q'_{I \text{ опт}}$  — приведенный расход турбины, соответствующий максимальному КПД.

Приведенная частота вращения турбины и расход при максимальном КПД могут быть определены по таблицам систематизированных данных.

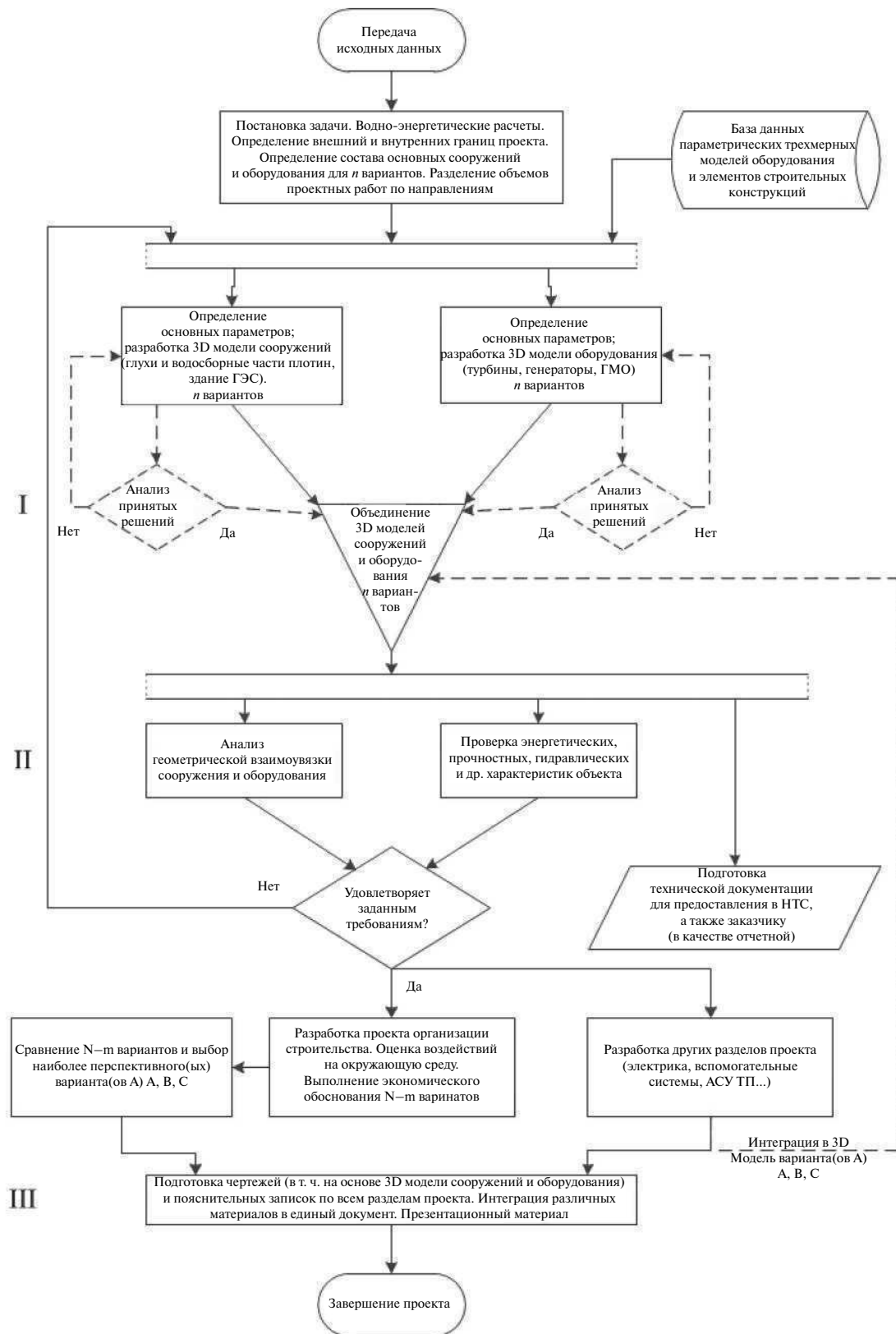


Рис. 1. Основные процессы, выполняемые в ходе проектирования ГЭС

**Гидрогенератор.** Базовые параметры обратимого гидрогенератора — диаметр его ротора и высота активной стали. Параметры гидрогенератора определяются в соответствии с рекомендациями, представленными в работе. Диаметр ротора гидрогенератора  $D_i$  определяется следующим выражением:

$$D_i = \frac{\tau^* 2p}{\pi},$$

где  $2p$  — число пар полюсов генератора, зависящее от синхронной частоты вращения;  $\tau^*$  — длина внешней дуги обода ротора, приходящаяся на один полюс;  $S^*$  — удельная нагрузка, приходящаяся на один полюс.

Высота активной стали вычисляется по формуле

$$l_a = \frac{30C_a S_p}{\pi n_c D_i^2},$$

где  $C_a$  — коэффициент машины, зависящий от удельной нагрузки  $S^*$  на полюс;  $S_p$  — расчетная мощность;  $n_c$  — синхронная частота вращения.

Математические зависимости, определяющие остальные размеры гидрогенератора, приведены в таблице.

Подобным образом осуществляется математическое описание других конструктивных элементов: спиральной камеры, отсасывающей трубы, статора турбины, напорных трубопроводов и т. д.

Расчет экономически наиболее выгодного диаметра трубопровода должен производиться

с учетом повышения давления при гидравлическом ударе, величина которого может быть определена по «цепным» уравнениям.

Поскольку средства графического пакета Autodesk Inventor не дают возможности провести расчеты, необходимые для определения диаметра рабочего колеса  $D_1$  и экономически наиболее выгодного диаметра трубопровода  $D_{эк}$ , то для этих расчетов были созданы на базе MS Excel специальные программы, связанные с графическим пакетом Autodesk Inventor.

Для расчета диаметра рабочего колеса гидротурбины исходными данными могут быть выбраны такие параметры, как тип, расчетный напор, расчетный расход турбины. При задании исходных данных в автоматическом режиме из таблицы систематизированных данных [6] выбираются соответствующие заданному напору приведенная частота вращения  $n'_{I_{опт}}$  и приведенный расход турбины при максимальном КПД  $Q'_{I_{опт}}$ . По полученным данным рассчитывается коэффициент быстроходности  $n_s$  и частота вращения гидротурбины  $n$ . Далее автоматически выбирается ближайшая синхронная частота вращения и рассчитывается диаметр рабочего колеса турбины  $D_1$ .

В результате расчета формируется таблица Excel, содержащая набор основных геометрических размеров будущей трехмерной модели. Данные из этой таблицы экспортируются в систему Autodesk Inventor как управляющие параметры,

**Параметры элементов гидрогенератора**

Элемент генератора	Параметр	Формула
Статор	Высота корпуса $h_{ст}$ , м	$1,8l_a$
	Диаметр корпуса $D_{ст}$ , м	$(1,05+0,0017 \cdot n_0) D_i$
Верхняя крестовина	Высота $h_{вк}$ , м	$(0,1-0,12) D_i$
	Диаметр лучей $D_{вк}$ , м	$D_{ст}$
Подпятник	Высота $h_{п}$ , м	$(0,15-0,2) D_i$
	Диаметр кожуха $D_{п}$ , м	$(0,4-0,5) D_i$
Шахта	Диаметр шахты $D_{ш}$ , м	$D_i-0,5$
Надстройка	Диаметр $D_0$ , м	$(0,3-0,5) D_i$
	Высота $h_0$ , м	$(0,3-0,4) D_i$
Кратер	Диаметр $D_{кр}$ , м	$(1,4-1,5) D_i$

которые совместно с заданными геометрическими зависимостями служат входными данными для автоматического построения трехмерной компьютерной модели.

Для возможности многократного использования и накопления информационного материала отдельные элементы трехмерной модели целесообразно объединять в единый массив данных [7].

Построение общей трехмерной модели станции осуществляется объединением моделей, включенных в базу данных проекта, ее отдельных элементов. Объединение моделей осуществляется путем наложения зависимостей (ограничений), определяющих местоположение конструктивных компонентов установки. Полученная модель может быть легко преобразована путем изменения состава и типов конструктивных компонентов оборудования и сооружений, редактированием исходных данных и параметров моделей.

Представленная здесь методика автоматизации создания 3D моделей была апробирована на примере Ленинградской ГАЭС, Мокской ГЭС и др. [1]. Для проведения технико-экономического обоснования проектных решений достаточно создать укрупненную модель станции, позволяющую с необходимой степенью точности определить объемы основных строительно-монтажных работ, и на основании полученных данных принять окончательное решение о составе и компоновке проектируемого объекта.

На следующем этапе возможно повышение детализации трехмерной модели. Детализованная модель используется для проведения прочностных расчетов, гидравлических исследований и т. д., составления документации и презентационных материалов. В процессе проведения проектных исследований параллельно с совершенствованием проектируемых сооружений проводится редактирование модели и автоматическое обновление созданных на ее основе документов.

С развитием компьютерных технологий, а также благодаря созданию соответствующих математических алгоритмов появилась возможность решать сложные дифференциальные и интегральные уравнения. В частности, широкое распространение получили метод конечных элементов и метод контрольных объемов [8]. В совокупности с компьютерной графикой развитие

данных технологий привело к созданию расчетных комплексов, позволяющих автоматизировать процесс выполнения прочностных, гидродинамических тепломассообменных расчетов и т. д. Большие возможности для проектирования оборудования и ГТС ГЭС представляют современные методы вычислительной гидродинамики [9]. Так, например, моделирование потока в рабочем колесе позволяет определить параметры скорости и давления во всех точках, а значит, установить величину механической энергии на валу, а также возможную кавитацию, потери и КПД рабочего колеса. В последнее время наблюдается устойчивая тенденция вытеснения классических натуральных гидравлических испытаний компьютерным моделированием гидравлических процессов, в том числе высокого уровня сложности. Многие гидравлические лаборатории, если не заменили полностью, то, по крайней мере, перенесли значительную часть испытаний (моделирование гидравлических процессов на водосбросных сооружениях, в гидротехнических туннелях, водоводах ГЭС, проточном тракте турбины и рабочем колесе) с физической модели на компьютерную.

Не менее важным этапом построения компьютерной трехмерной модели является визуализация проектных решений. Существует большое множество программных пакетов, позволяющих добиваться высококачественной визуализации трехмерных моделей. Для моделей гидроэнергетических объектов, основной программной средой создания которых являются САД-системы, общий алгоритм экспорта трехмерных моделей из САД-систем и последующей их визуализации представлен на рис. 2.

Общая трехмерная модель гидроэнергетического природно-технического комплекса получается путем объединения моделей сооружений и оборудования ГЭС или ГАЭС с моделью рельефа участка строительства станции. Для высокого качества визуализации и придания ей реалистичного вида полученная модель может быть экспортирована в специализированный графический пакет, например AutoDesk 3D MAX. В последующем трехмерная модель может быть адаптирована для визуализации в системах виртуальной реальности. На рис. 3 представлена модель Лен ГАЭС и Мокской ГЭС, отредактированные в системе 3D MAX.



Рис. 2. Алгоритм экспорта трехмерных моделей из CAD систем для последующей визуализации

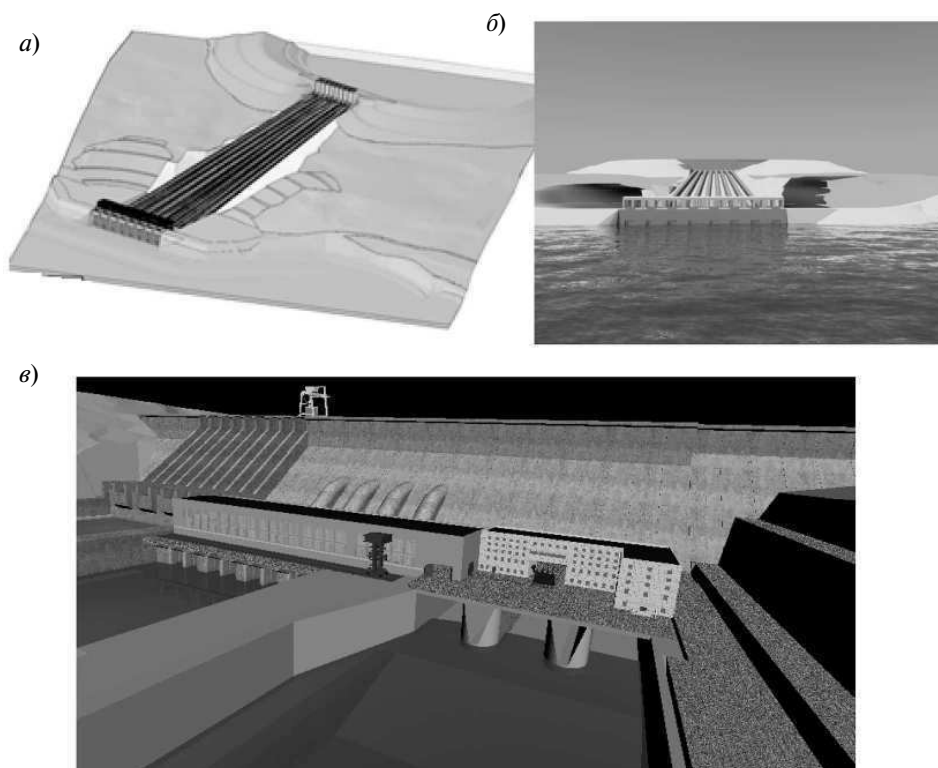


Рис. 3. Трехмерные компьютерные модели Ленинградской ГАЭС (а, б) и Мокской ГЭС (в)

Программные пакеты, используемые для визуализации модели, создания презентационного материала (иллюстрации и видеоролики), не позволяют работать с готовой моделью в интерактивном режиме. Для придания трехмерной модели интерактивности необходимо преобразовать ее в формат, используемый браузерами систем виртуальной реальности. Виртуальная реальность — мир, создаваемый техническими средствами и передаваемый человеку через его привычные для восприятия материального мира ощущения, интерактивный трехмерный мир, по которому пользователь может перемещаться и выполнять предусмотренные в программе действия [10].

Во время экспорта в формат виртуальной реальности имеется возможность конфигурировать некоторые важные параметры, такие, как экспорт анимации, тип описания геометрических граней, настройка камер и начального вида, начальный способ навигации в трехмерной сцене и другие.

После экспорта модели в формат виртуальной реальности ее можно просматривать в интерактивном режиме с помощью браузера (например Cortona VRML Client, BS Contact VRML/X3D, Octaga Player, Flux Player, Covise OpenCover).

На рис. 4 показано, как отображается 3D модель в системе виртуальной реальности, базирующейся на программном обеспечении Covise Open Cower.

При разработке изделия применение подобной технологии обосновано следующими соображениями:

возможностью в интерактивном режиме изучать и анализировать как общие (компоновка гидроузла), так и частные (узлы, механизмы) конструкторские решения, представленные в реальном пространстве, что дает более эффективное взаимодействие с 3D моделью по сравнению с визуализацией на плоском мониторе;

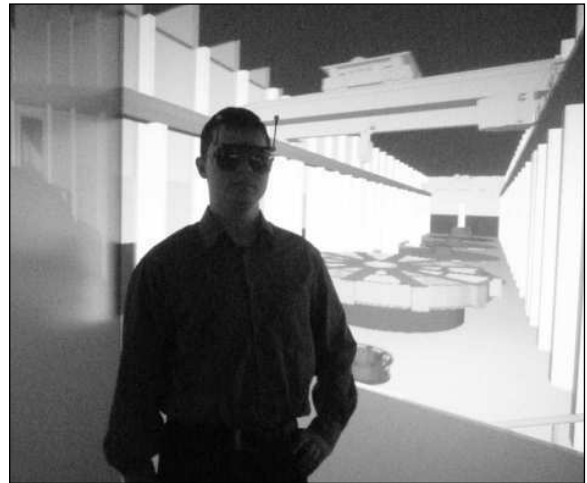


Рис. 4. Представление 3D модели Мокской ГЭС в виртуальной реальности

возможностью визуализации результатов гидравлических, аэродинамических, тепловых, прочностных расчетов;

созданием высококачественного презентационного материала.

Системы виртуальной реальности позволяют добиваться необходимого качества погружения в окружающую среду и работать с виртуальными мирами с высокой степенью интерактивности.

Результаты данного исследования могут использоваться организациями при проведении проектных и научно-исследовательских работ, для обоснования принимаемых решений, проведения прочностных, гидроэнергетических, сметных и прочих расчетов, моделирования аварийных и чрезвычайных ситуаций, получения проектной документации и составления презентационных материалов.

Статья написана в рамках работы научно образовательного центра ВИЭ (соглашение №14. В37.21.0302/240103201 от 30.07.2012г. между Минобрнауки России и ФГБОУВПО СПбГПУ).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Скрынник А.В.** Создание 3D моделей гидроузлов и их представление в системе виртуальной реальности [Текст] / А.В. Скрынник, Л.И. Кубышкин // XXXVII Неделя науки СПбГПУ. Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов.— СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2008.— С. 64—64.

2. **Васильев, Ю.С.** Разработка чертежей зданий ГЭС методом пространственного компьютерного моделирования [Текст] / Ю.С. Васильев, Л.И. Кубышкин, О.С. Морозов // Гидротехническое строительство.— 1998. № 11.— С. 7—11.— М: Энергопрогресс, 1998.

3. **Васильев, Ю.С.** Компьютерные технологии в научных исследованиях и проектировании объектов

возобновляемой энергетики [Текст]: Учебное пособие / Ю.С. Васильев, Л.И. Кубышкин, И.Г. Кудряшева.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008.— 262 с.

4. **Кубышкин, Л.И.** Моделирование гидроэнергетического оборудования [Текст] / Л.И. Кубышкин, С.В. Светозарская // XXVIII неделя науки СПбГПУ: Материалы международной научно-практической конференции. Ч. I.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.— С.59–60.

5. Гидроэнергетическое и вспомогательное оборудование гидроэлектростанций. В 2 т. [Текст]: Справочное пособие / Под ред. Ю.С. Васильева, Д.С. Щавелева.— Т. 1. Основное оборудование гидроэлектростанций.— М.: Энергоатомиздат, 1988.— 400 с.

6. **Кубышкин, Л.И.** Создание библиотеки параметрических моделей гидроэнергетического оборудования [Текст] / Л.И. Кубышкин, С.В. Светозарская

// XXVIII неделя науки СПбГПУ: Материалы международной научно-практической конференции. Ч. I.— СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009.— С. 57–59.

7. **Кубышкин, Л.И.** Параметрическое моделирование объектов возобновляемой энергетики [Текст] / Л.И. Кубышкин, С.В. Светозарская // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Сер.: Наука и образование.— 2010.— №4 (110).— С. 42–50.

8. **Зенкевич, О.** Метод конечных элементов в теории сооружений и механике сплошных сред [Текст] / О. Зенкевич, И. Чанг.— М.: Недра, 1974.— 240 с.

9. **Anderson, J.D.** Jr. Computational Fluid Dynamics. The basics with applications [Text].— McGraw-Hill Science/Engineering/Math; 1 edition (February 1, 1995).

10. **Малюх, В.Н.** Введение в современные САПР [Текст]: Курс лекций / В.Н. Малюх.— М.: ДМК Пресс, 2010.— 192 с.

## REFERENCES

1. **Skrynnik A.V., Kubyshkin L.I.** Sozdanie 3D modelei gidrouzlov i ikh predstavlenie v sisteme virtual'noi real'nosti [Tekst] // XXXVII Nedelia nauki SPbGPU. Materialy Vserossiiskoi mezhvuzovskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii studentov i aspirantov.— S-Petersburg: publishing SPU.— 2008. (rus)

2. **Vasil'ev Yu.S., Kubyshkin L.I., Morozov O.S.** Razrabotka chertezhei zdaniia GES metodom prostranstvennogo komp'iuternogo modelirovaniia [Tekst] // Gidrotekhnicheskoe stroitel'stvo.— 1998. № 11.— Moscow: Energo-progress.— P. 7–11. (rus)

3. **Vasil'ev Yu.S., Kubyshkin L.I. Kudriasheva I.G.** Komp'iuternye tekhnologii v nauchnykh issledovaniakh i proektirovaniia ob'ektov vozobnovliaemoi energetiki [Tekst] // Uchebnoe posobie.— S-Petersburg: publishing SPU, 2008.— 262 p. (rus)

4. **Kubyshkin L.I., Svetozarskaia S.V.** Modelirovanie gidroenergeticheskogo oborudovaniia // XXVIII nedelia nauki SPbGPU: Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Ch. I.— S-Petersburg: Publishing SPU, 2009. (rus)

5. Gidroenergeticheskoe i vspomogatel'noe oborudovanie gidroelektrostantsii [Tekst]: Spravochnoe posobie:

V 2t. / Pod red. Yu.S. Vasil'eva, D.S. Shchavaleva.— T. 1. Osnov-noe oborudovanie gidroelektrostantsii.— M.: Energoatomi-zdat, 1988.— 400 p. (rus)

6. **Kubyshkin L.I., Svetozarskaia S.V.** Sozdanie biblioteki parametricheskikh modelei gidroenergeticheskogo oborudovaniia [Tekst] // XXVIII nedelia nauki SPbGPU: Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii. Ch. I.— S-Petersburg: Publishing STU, 2009.— P. 57–59. (rus)

7. **Kubyshkin L.I., Svetozarskaia S.V.** Parametricheskoe modelirovanie ob'ektov vozobnovliaemoi energetiki [Tekst] // Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU.— 2010. №4(110). — S-Petersburg: publishing SPU, 2010.— P. 42–50. (rus)

8. **Zenkevich O., Chang I.** Metod konechnykh elementov v teorii sooruzhenii i mekhanike sploshnykh sred [Tekst].— M.: Nedra, 1974.— 240 p. (rus)

9. **Anderson J.D.** Jr. Computational Fluid Dynamics. The basics with applications [Text].— McGraw-Hill Science / Engineering / Math; 1 edition (February 1, 1995).

10. **Maliukh, V.N.** Vvedenie v sovremennye SAPR [Tekst]: Kurs lektzii.— Moscow: DMK Press, 2010.— 192 p. (rus)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ /AUTHORS

**СКРЫННИК Антон Владимирович** — аспирант кафедры водохозяйственного и гидроэнергетического строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: av.sknk@gmail.com

**SKRYNNIK Anton V.** — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: av.sknk@gmail.com