

УДК 620.92:4.042(075.8)

Ю.С. Васильев, Л.И. Кубышкин

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БАНКА ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Yu.S. Vasil'ev, L.I. Kubyshkin

USE OF PARAMETRIC MODELS IN DESIGN HYDROPOWER PLANTS

Рассмотрены вопросы применения современных компьютерных технологий при проектировании гидроэнергетических установок. Представлена методика автоматизации проектирования гидроэнергетических установок с использованием банка параметрических моделей сооружений и оборудования проектируемых объектов.

ГИДРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА; ПРОЕКТИРОВАНИЕ; САПР; ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ; БАНК ДАННЫХ.

The article discusses the use of modern computer technology in the design of hydropower plants. Presents a methodology for design automation of hydropower plants using parametric models of the bank facilities and equipment designed objects.

HYDROPOWER PLANTS; DESIGN; CAD SYSTEM; PARAMETRIC MODEL; DATABASE.

Обзор традиционных методов проектирования объектов гидроэнергетики

Проектирование гидроэнергетических объектов (ГЭО) базируется на комплексной проработке различных вопросов, относящихся к гидромашиностроению, электромашиностроению, гидромеханике, гидротехнике, производству работ, экономике и охране окружающей среды. Эффективная совместная работа специалистов разного профиля при проектировании гидроэлектростанций (ГЭС) и гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС) обеспечивается имеющимися в проектных организациях техническими средствами, упрощающими и ускоряющими создание проектной документации.

Периоды совершенствования технологии проектирования гидроэнергетических объектов. До 60-х годов прошлого столетия в качестве технических средств, упрощающих и ускоряющих

создание проектной документации, использовались кульманы, механические счетные машины, копировальные аппараты. Проектная документация выпускалась на листах бумаги («синьках») разного формата. Можно выделить четыре периода в развитии и совершенствовании применения вычислительной техники в проектной практике, каждый из которых связан с освоением инженерами-гидроэнергетиками ресурсов и возможностей очередного поколения ЭВМ и нового программного обеспечения:

1. Вопросы автоматизации проектирования ГЭО начали решаться с появлением в 60-е годы прошлого столетия в организациях энергетической отрасли электронных аналоговых вычислительных машин (МН-7, МН-10, Ритм) и цифровых ЭВМ первого поколения (Урал) [1, 2].

2. Накопленный в 60–90-е годы опыт использования ЭВМ в проектной практике, соз-

данные за это время библиотеки алгоритмов и программ, освоение новых технологий разработки проектной документации привели к изменению структуры проектной организации и задач, решаемых в ее подразделениях.

3. С появлением ЭВМ второго (Наири, Минск-3, Одра), затем третьего (ряд ЭВМ ЕС) поколений, новых языков программирования и новых режимов работы на этой технике появилась возможность создавать программное обеспечение для моделирования сложных переходных процессов в водопроводящих трактах и сооружениях ГЭС [3, 4]. В этот период разрабатываются государственные стандарты и формулируются требования к системам автоматизированного проектирования гидроэнергетических объектов (САПР ГЭС) [5].

4. В Ленинградском политехническом институте (ныне Санкт-Петербургский государственный политехнический университет) в эти годы выполняется ряд хозяйственных научно-исследовательских работ по созданию математического, программного, информационного и лингвистического обеспечения САПР ГЭС [2]. Новые технологии проектирования ГЭС успешно внедряются в учебный процесс [3–5]. В период с 1960-го по 2000-й годы решались следующие проблемы автоматизации проектирования ГЭС:

разработка численных методов решения инженерных задач на ЭВМ, создание программного обеспечения для выполнения ряда вычислительных проектных процедур [6];

формирование общей концепции САПР ГЭС как единого программно-технического комплекса, взаимодействующего со специалистами разных подразделений проектной организации [7];

научное обоснование САПР ГЭС как многоуровневой сетевой иерархической системы с ассоциативными связями и сквозной параметризацией проектируемых объектов [8];

разработка методов и алгоритмов создания трехмерных твердотельных моделей проектируемых объектов электроэнергетики, автоматизация выполнения графических проектных процедур [9–12];

создание банка параметрических моделей строительных конструкций, сооружений, основного и вспомогательного оборудования гидроэнергетических объектов, разработка методики

автоматизированного проектирования ГЭС в среде CAD — CAM — CAE (геометрическое моделирование — моделирование физических процессов — производство) [13, 14].

Стадии проектирования объектов возобновляемой энергетики. До 2008 года в отделениях института Гидропроект существовало 6 стадий проектирования гидроэнергетических объектов: технико-экономическое обоснование (ТЭО); технико-экономический расчет (ТЭР); эскизный проект (ЭП); проект (П); рабочий проект (РП); рабочая документация (Р).

На стадии ТЭО рассматривались и оценивались возможные схемы комплексного использования гидроэнергоресурсов реки или бассейна.

На стадии ТЭР выполнялись технико-экономические расчеты и составлялись документы по проектированию и строительству объекта для доклада и утверждения в Госстрое, Госплане и Совете Министров СССР.

На стадии ТЭО определялись и обосновывались основные технические параметры проектируемого объекта.

На стадии П выполнялась детальная проработка основных технических решений, оптимизировались параметры основных сооружений и оборудования.

На стадии РД группой рабочего проектирования на строящемся объекте выпускалась и корректировалась проектно-сметная документация.

В настоящее время в связи с вступлением в силу Положения о составе разделов проектной документации и требованиях к их содержанию, утвержденного Постановлением Правительства РФ №87 от 16.02.2008, не предусматривается стадийность проектирования, а вводятся понятия «проектная документация» и «рабочая документация». Однако можно выделить вариант проектирования, когда разработка проектной и рабочей документации ведется параллельно (и тогда можно говорить об одностадийном проектировании), а также вариант, когда разработка рабочей документации ведется уже после утверждения проектной (в этом случае говорят о двухстадийном проектировании).

Схема процесса проектирования зависит от типа объекта, категории его сложности и степени детализации.

Как правило, проекты крупных жилых, общественных и промышленных зданий создаются в две стадии («Проект» и «Рабочая документация»). В этом случае сначала разрабатывается технический проект (стадия «Проект»), затем рабочие чертежи (стадия «Рабочая документация»). Помимо этого, в случаях разработки проектной документации для особо сложных объектов требуется разработка «Предпроектного предложения».

Если объект небольшой и несложный, то проектирование ведется в одну стадию: разработки технического проекта и рабочих чертежей совмещаются; в этом случае разрабатывается так называемый «Рабочий проект». В одну стадию разрабатывают проекты индивидуальных жилых и общественных зданий при условии, что это технически несложные объекты, а также проекты типовых зданий.

Соотношение категории сложности объекта и необходимого количества стадий проектирования можно выразить следующим образом:

одностадийное проектирование («Рабочий проект», включающий утверждаемую часть и рабочую документацию) — для объектов, строящихся по типовым и повторно применяемым проектам;

двухстадийное проектирование («Проект», «Рабочая документация») — для объектов V, IV категорий сложности и для объектов, создающихся по индивидуальным проектам;

двухстадийное проектирование, включающее стадию «Предпроектное предложение» («Предпроектное предложение», «Проект», «Рабочая документация») — для объектов V, IV категорий сложности и для объектов III категории с недостаточным перечнем исходно-разрешительной документации.

Этапы жизненного цикла объектов возобновляемой энергетики. Жизненный цикл объекта возобновляемой энергетики как физического объекта — это последовательность процессов существования объекта недвижимости от замысла до ликвидации (утилизация).

Этапы жизненного цикла объекта возобновляемой энергетики подразделяются так: предпроектный — проектный — строительства — эксплуатации — закрытия (рис. 1) [11]. Внешняя стрелка на рисунке показывает последовательность этапов жизненного цикла объекта ВЭ.

Предпроектный (начальный) этап включает анализ рынка недвижимости, выбор объекта недвижимости, формирование стратегии проекта, инвестиционный анализ, оформление исходно-

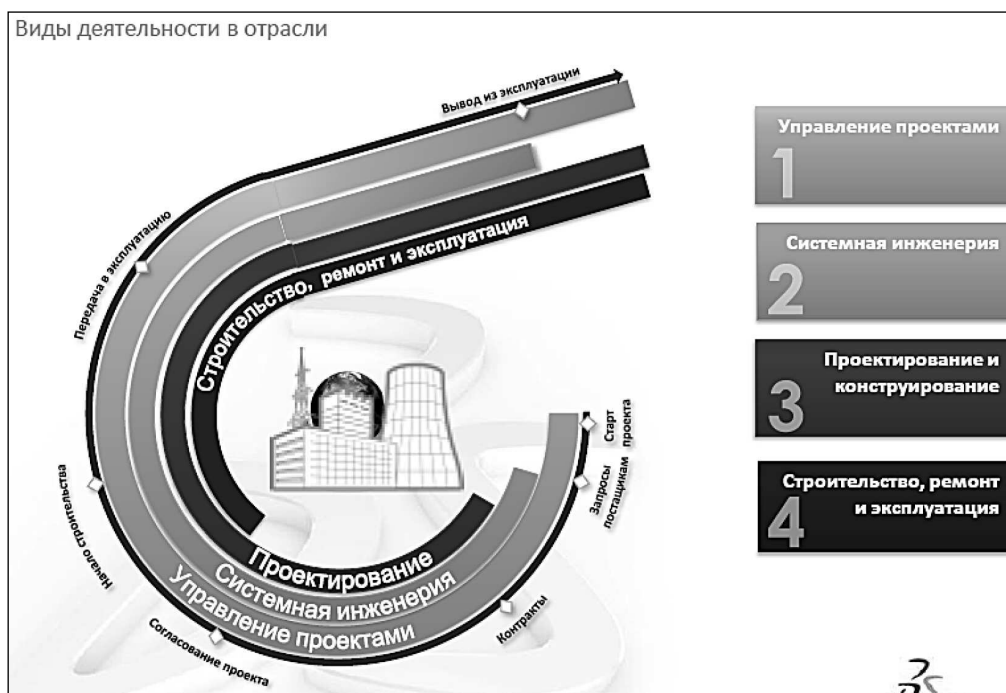


Рис. 1. Этапы жизненного цикла объекта возобновляемой энергетики

разрешительной документации, привлечение кредитных инвестиционных средств.

Этап проектирования включает разработку финансовой схемы, организацию финансирования, выбор архитектурно-инженерной группы, руководство проектированием. Основные задачи этого этапа — повышение потребительских качеств объектов недвижимости и — самое главное — минимизация эксплуатационных затрат на всех этапах жизненного цикла. Очевидно, что на первых двух этапах прибыль не образуется, так как они имеют мотивационный характер.

На этапе строительства выбирается подрядчик, координируется ведение строительных работ и контролируется качество строительства. На данном этапе появляются реальные свидетельства соответствия строящегося объекта требованиям сегмента рынка недвижимости, обусловленные логикой жизненного этапа. В этот период решаются задачи увеличения доли вложений потенциальных потребителей, так как рост объема предложений и прибыли свидетельствует о достаточно широком рыночном признании.

Этап эксплуатации объекта предполагает обслуживание и ремонт сооружений и оборудования, их реконструкцию, материальный учет, противопожарную охрану и технику безопасности, управление коммуникациями, утилизацию и переработку отходов, устранение аварийных ситуаций и охрану объекта.

Этап закрытия объекта — полная ликвидация его первоначальных и приобретенных функций. Результат — либо снос объекта, либо качественно новое его развитие. На этом этапе требуются значительные затраты. Если объект недвижимости получает новое качественное развитие, затраты на его изменение относятся к затратам владения в расчете на его новую функцию.

Предлагаемая инновационная методика параметрического моделирования проектируемых ГЭО

Параметрическое моделирование сооружений и оборудования объектов возобновляемой энергетики. Представленная выше концепция проектирования объектов возобновляемой энергетики предусматривает автоматизацию работы специалистов проектной организации как на этапе создания трехмерных твердотельных моделей

(3D-моделей) объекта, так и на этапе выпуска графических проектных документов — чертежей [13]. Графические системы, ориентированные на такие отрасли, как, например, машиностроение и промышленно-гражданское строительство, имеют библиотеки стандартных компонентов и унифицированных конструкций. Они упрощают процесс создания и многократного использования готовых элементов моделируемого объекта, что дает возможность автоматизировать создание 3D-модели проектируемого объекта. Отсутствие такого информационного обеспечения для проектирования объектов возобновляемой энергетики не позволяет автоматизировать этот наиболее ответственный и трудоемкий этап новой технологии проектирования. Сказанное свидетельствует об актуальности разработки библиотек параметрических моделей компонентов и сооружений установок возобновляемой энергетики.

Идея использования параметрических моделей появилась еще на ранних этапах развития систем автоматизированного проектирования, но долгое время не могла быть реализована по причине недостаточной производительности компьютеров. В настоящее время библиотечные компоненты широко используются при проектировании зданий и сооружений, механического и электротехнического оборудования в графических пакетах ArchiCAD, Inventor, Civil 3D и др.

Параметрическое моделирование существенно отличается от обычного трехмерного моделирования. Конструктор создает модели объектов с параметрами, при изменении которых происходят изменения размеров деталей объектов, их конфигурации и взаиморасположения. Таким образом, ранее разработанные и сохраненные в библиотеке модели конструктивных компонентов объектов возобновляемой энергетики могут многократно использоваться в 3D-моделях новых проектируемых объектов.

В представленном далее материале на примере проекта гидроаккумулирующей электростанции (ГАЭС) предлагается решение следующих вопросов:

выбор программных пакетов для создания параметрических моделей конструктивных компонентов и разработка методики их создания;

разработка математического описания этих моделей;

разработка прикладного программного обеспечения для реализации расчетов базовых и зависимых от них параметров;

создание библиотеки параметрических моделей конструктивных компонентов основного оборудования и сооружений для установок возобновляемой энергетики.

Анализ возможностей используемого сегодня технического и программного обеспечения инженерной компьютерной графики в проектных и научно-исследовательских организациях гидроэнергетического профиля (ОАО «Ленгидропроект», ОАО «СГЭМ», ОАО «РусГидро», ЗАО «МНТО ИНСЭТ») и в учебном процессе показывает, что моделирование объектов возобновляемой энергетики следует выполнять в интегрированной среде AutoCAD Civil 3D + Autodesk Inventor + 3ds Max [13, 14]. Эти графические пакеты освоены и широко используются в перечисленных проектных, научно-исследовательских организациях и учебном процессе подготовки специалистов в высших учебных заведениях.

В качестве среды для создания трехмерных параметрических моделей оборудования и сооружений ГЭО может быть использован графический пакет Autodesk Inventor [14]. Особенность этого графического пакета — использование управляющих размеров, что и определяет возможности его как среды для создания библиотечных параметрических конструктивных компонентов ГЭО. Кроме того, функциональные возможности Autodesk Inventor позволяют производить математические операции (задание размеров в виде формул), а также использовать адаптивную технологию моделирования при помощи наложения зависимостей, что дает возможность упростить не только математическое описание модели, но и управление моделью пользователем.

Одним из преимуществ использования графического пакета Autodesk Inventor является автоматизация выпуска проектной документации. Чертежи в среде Inventor создаются на основе построенных 3D-моделей и представляют собой набор проекций, видов, разрезов, узлов объекта. На рис. 2 приведены примеры проектных документов, полученных на основе сборок ГАЭС шахтного типа и проточного тракта ГАЭС, а также чертежи отдельных деталей.

Создаваемый чертеж отображает текущее состояние модели. При внесении изменений в модель они автоматически отображаются на всех чертежах, полученных на ее основе, что исключает возможность появления несогласованных чертежей.

Создаваемые параметрические модели конструктивных компонентов ГЭО имеют один или несколько базовых параметров (размеров). Остальные параметры определяются с помощью математических зависимостей. Изменение значений базовых параметров приводит к изменению конфигурации и размеров модели.

Ниже приведено математическое описание некоторых конструктивных компонентов оборудования и сооружений ГЭО, используемых для создания трехмерной параметрической модели ГАЭС.

Рабочее колесо обратимой гидротурбины. В качестве базового параметра, управляющего размерами модели рабочего колеса обратимой гидротурбины, был выбран его диаметр D_1 , величина которого может быть определена исходя из приведенных ниже зависимостей [6, 14].

Диаметр рабочего колеса насоса-турбины определяется по формуле

$$D_1 = \frac{n'_{I_{\text{н опт}}} \sqrt{H_{\text{н}}}}{n}. \quad (1)$$

Здесь $n'_{I_{\text{н опт}}}$ — приведенная частота вращения насоса-турбины при максимальном КПД; $H_{\text{н}}$ — средний напор гидротурбины, соответствующий оптимуму универсальной характеристики при работе турбины в насосном режиме; n — нормальная частота вращения гидротурбины в насосном и турбинном режимах, определяемая при помощи выражения

$$n = \frac{n_{SH} H^{3/4}}{3,65 \sqrt{Q_{\text{н}}}},$$

где $Q_{\text{н}}$ — расход воды, соответствующий среднему напору в двигательном режиме работы; n_{SH} — коэффициент быстроходности гидротурбины при ее работе в насосном режиме,

$$n_{SH} = 3,65 \frac{n \sqrt{Q_{\text{н}}}}{H_{\text{н}}^{3/4}} = 3,65 n'_{I_{\text{н опт}}} \sqrt{Q'_{I_{\text{н опт}}}};$$

$Q'_{I_{\text{н опт}}}$ — приведенный расход турбины в насосном режиме, соответствующий максимальному коэффициенту полезного действия (КПД).

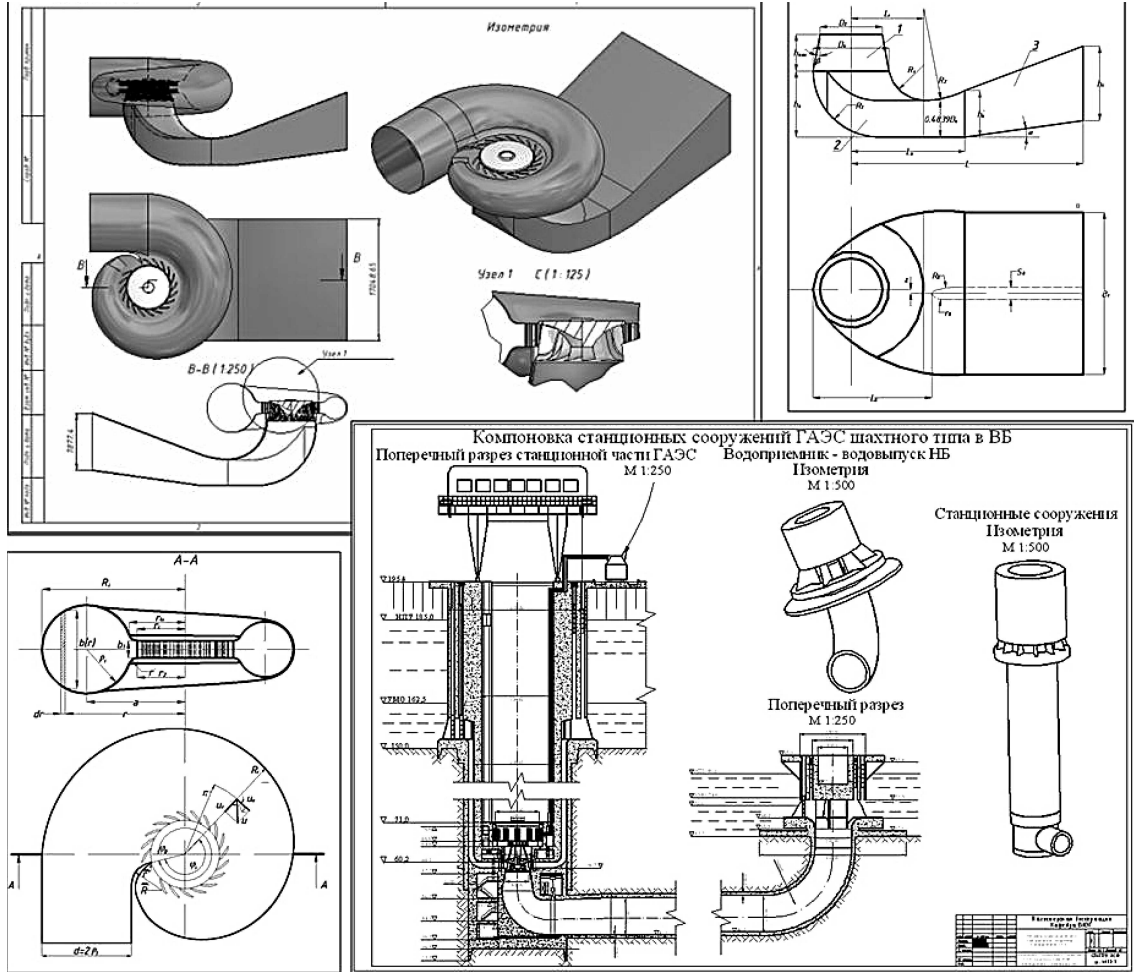


Рис. 2. Примеры оформления проектной документации в виде чертежей и плакатов

Приведенная частота вращения насоса-турбины и расход при максимальном КПД могут быть определены по таблицам систематизированных данных [15].

Конструктивные компоненты гидротурбины: спиральная камера, колонны статора, отсасывающая труба. Создание параметрических моделей таких конструктивных компонентов гидротурбины, как спиральные камеры, колонны статора и отсасывающие трубы, наиболее целесообразно проводить по существующим отраслевым стандартам [16, 17], которые устанавливают относительные размеры очертаний рассматриваемых элементов.

Гидрогенератор. Базовыми параметрами обратимого гидрогенератора являются диаметр его ротора и высота активной стали. Параметры гидрогенератора находятся согласно рекоменда-

циям, представленным в [18]. Диаметр ротора гидрогенератора D_i определяется следующим выражением:

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

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

Высота активной стали вычисляется по формуле

$$l_a = \frac{30C_a S_p}{\pi n_c D_i^2}, \quad (3)$$

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, представлены в табл. 1.

Стальной трубопровод. Базовый параметр модели трубопровода ГЭС и ГАЭС — его диаметр. Экономически наиболее выгодные диаметры трубопровода рассчитываются по зависимостям [9] на участках с небольшими напорами ($H \leq 30$ м) по формуле

$$D_{\text{эк}} = \sqrt[6]{\frac{Q_p^3 T_p S_3 \eta_a \beta}{\delta c_{\text{тр}}}}, \quad (4)$$

а для участков с напорами более 30 м экономически наиболее выгодный диаметр находится по зависимости

$$D_{\text{эк}} = \sqrt[7]{\frac{Q_p^3 T_p S_3 \eta_a \beta R}{10 c_{\text{тр}} H}}, \quad (5)$$

где Q_p — расчетный среднекубический расход, м³/с; T_p — расчетное время работы трубопровода, ч; S_3 — стоимость 1 кВт·ч заменяемой электроэнергии, руб./кВт·ч; η_a — средний КПД гидроагрегата, $\eta_a = 0,85-0,90$; β — коэффициент, учитывающий потери энергии в период паводка из-за снижения напора и, вследствие этого, пропускной способности турбин, $\beta = 1,00-1,15$; R — расчетное сопротивление материала трубопровода, кг/см²; δ — толщина оболочки трубопровода, см; $c_{\text{тр}}$ — стоимость 1 т материала трубопровода, его монтажа и окраски, руб.; H — напор на середине участка с учетом гидравлического удара, м.

Толщина оболочки трубопровода определяется по «котельной» формуле

$$\delta \geq \frac{5HD}{R}, \quad (6)$$

где δ — толщина оболочки трубопровода, см; H — расчетный напор, м; D — диаметр срединной поверхности цилиндрического трубопровода, м; R — расчетное сопротивление материала, кг/см².

Расчет экономически наиболее выгодного диаметра трубопровода должен производиться с учетом повышения давления при гидравлическом ударе, величина которого определяется по «цепным» уравнениям [2]:

для конца первой фазы

$$q_1 \sqrt{1+z_1} = q_0 - \frac{z_1}{\zeta};$$

для конца фазы n

$$q_n \sqrt{1+z_n} = q_0 - \frac{zn}{\zeta} - \frac{2}{\zeta} \sum_{i=1}^{i=n-1} z_i,$$

где q_0 — величина начального относительного приведенного расхода воды; q_1 — величина относительного приведенного расхода в конце первой фазы гидравлического удара; q_n — то же в конце фазы n ; z_1, z_i, z_n — относительные повышения напора соответственно для конца фаз 1, i , n ; ζ — первая характеристика эквивалентного трубопровода.

Относительное повышение давления в конце трубопровода при сбросе малых нагрузок рассчитывается по зависимостям

Таблица 1

Выражения, определяющие размеры гидрогенератора

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

$$z_{пр} = \zeta q_0 \text{ при } 0 \leq q_0 \leq q_{кр};$$

$$z_1 = \frac{2\sigma}{1 + 0,5\zeta q_0 - \sigma} \text{ при } q_{кр} < q_0 < \frac{2}{\zeta};$$

$$z_m = \frac{2\sigma}{2 - \sigma} \text{ при } \frac{2}{\zeta} \leq q_0 \leq 1,$$

где σ — вторая характеристика эквивалентного трубопровода; $q_{кр}$ — критическая величина начального относительного приведенного расхода.

Поскольку основные средства графического пакета Autodesk Inventor не дают возможности проведения расчетов, необходимых для определения диаметра рабочего колеса D_1 и экономически наивыгоднейшего диаметра трубопровода $D_{эк}$, для проведения этих расчетов на базе MS Excel были созданы специальные программы, связанные с графическим пакетом Autodesk Inventor.

Программа расчета диаметра рабочего колеса насоса-турбины. Исходными данными для расчета диаметра рабочего колеса обратимой гидротурбины были выбраны тип, расчетный напор, расчетный расход насоса-турбины. При их задании в автоматическом режиме из таблицы систематизированных данных [6] выбираются соответствующие заданному напору приведен-

ная частота вращения $n'_{н\text{опт}}$ и приведенный расход $Q'_{I\text{н\text{опт}}}$ насоса-турбины при максимальном КПД. По полученным данным рассчитывается коэффициент быстроходности n_{SH} и частота вращения гидротурбины n . Далее автоматически выбирается ближайшая синхронная частота вращения и рассчитывается диаметр рабочего колеса насоса-турбины D_1 .

Завершающий этап автоматического расчета сводится к формированию таблицы параметрических размеров геометрической модели, то есть массива связанных между собой кодов размеров, используемых при создании модели, и их значений, вычисленных в соответствии с заданными коэффициентами. Эта таблица связана с таблицей параметров Autodesk Inventor, данные которой управляют геометрией модели (рис. 3) [14, 19, 20].

На базе охарактеризованного выше математического описания и прикладного программного обеспечения в графической среде Autodesk Inventor были созданы и включены в соответствующие библиотеки геометрические модели основного оборудования и водопроводящего тракта ГЭО (табл. 1, 2). Параметры 3D-моделей оборудования и сооружений определялись по формулам (1)–(6). Обозначения, принятые в таблицах: D_1 — диаметр

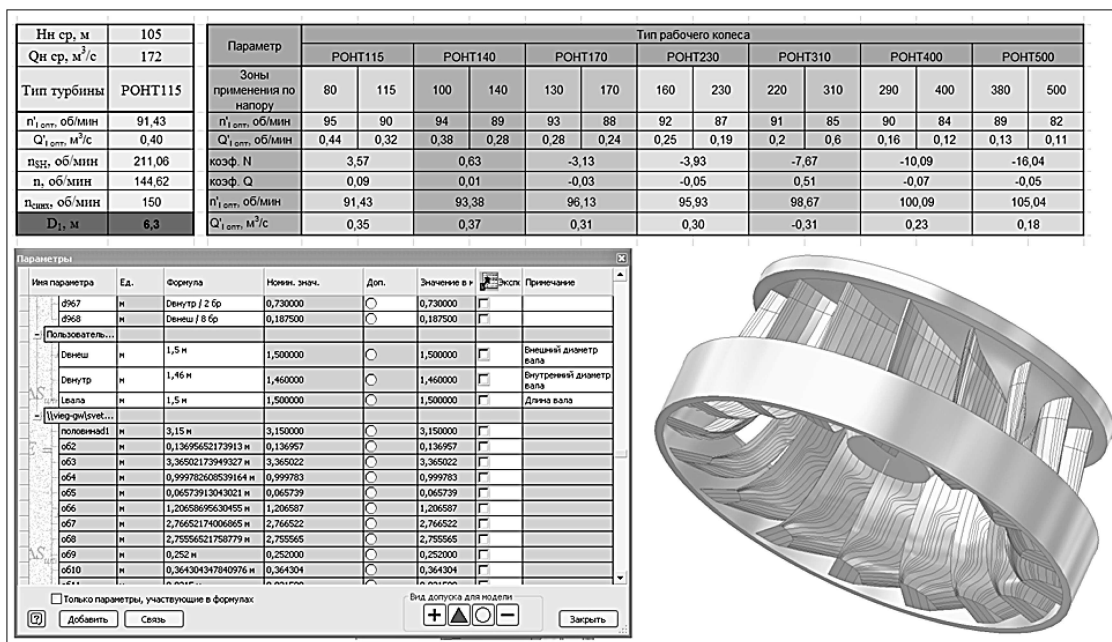

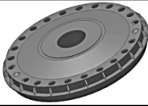
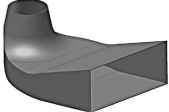






Рис. 3. Внешние таблицы MS Excel, таблица параметров модели и 3D-модель рабочего колеса

Таблица 2

3D-модели оборудования и сооружений ГЭО

Модель	Наименование	Базовые параметры
<i>Рабочие механизмы гидротурбины</i>		
		Рабочее колесо
		РО ПЛ
		D_1
Направляющий аппарат		
		Лопатки Крышка гидротурбины
		D_1
<i>Закладные части гидротурбины</i>		
		Отсасывающая труба
		D_1, β, α
		Спиральная камера
		Металлическая Бетонная
		D_1
		Статор гидротурбины
		D_1
<i>Двигатель-генератор</i>		
		Двигатель-генератор
		D_g, l_a
<i>Сооружения</i>		
		Трубопровод
		$D_{эк}, \delta$
		Водосливная плотина
		h
		Дамба
		h
		Гидроагрегатный блок
		h, b

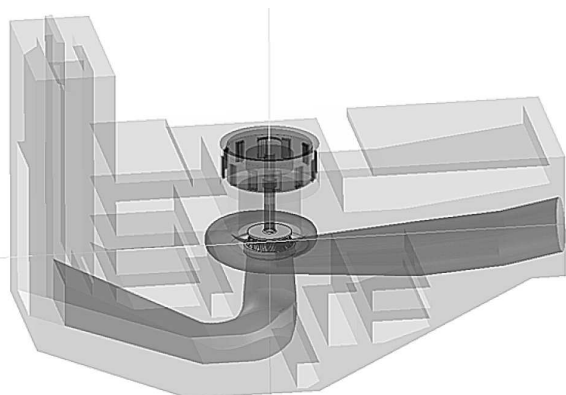


Рис. 4. Размещение основного энергетического оборудования в модели массивной бетонной части ГЭС

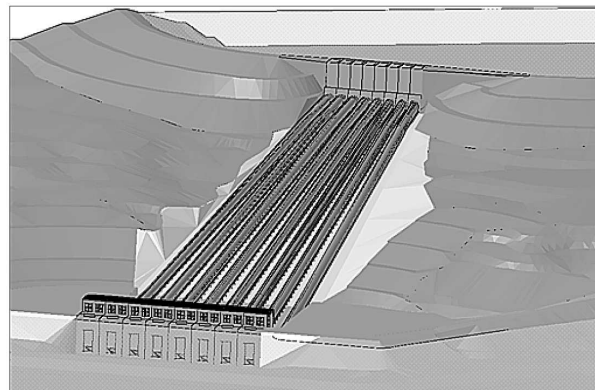


Рис. 5. Модель основных сооружений Ленинградской ГЭС

рабочего колеса; D_i — диаметр ротора генератора; D_k — диаметра входного сечения колена отсасывающей трубы; $D_{эк}$ — экономически наивыгоднейший диаметр трубопровода; $L_{ст}$ — длина профиля колонн статора; l_a — высота активной стали гидрогенератора; ε — эксцентриситет колена отсасывающей трубы; h — высота отсасывающей трубы; α — угол наклона основания выходного диффузора; δ — толщина оболочки трубопровода.

Разработанная методика моделирования была апробирована при проектировании основных сооружений Ленинградской ГЭС, которое производилось с использованием параметрических компонентов, представленных в табл. 2.

Моделирование природных условий и основных гидротехнических сооружений выполнено в графическом пакете AutoCAD Civil 3D.

Полученная трехмерная модель гидроагрегатного блока Ленинградской ГЭС представлена на рис. 4.

Модель основных сооружений природно-технического комплекса Ленинградской ГЭС представлена на рис. 5.

Разработанные способы параметрического моделирования могут быть применены к любым энергетическим объектам на основе возобновляемых источников энергии. Использование управляющих параметров позволяет быстро получать трехмерную модель проектируемого объекта, что дает возможность существенно сократить сроки проектирования и создания проектной документации. Трехмерная модель может быть эффективна при сравнении различных компоновок сооружений, проведении расчетов сметной стоимости строительства (определение объемов бетонных и земляных работ), позволяет повысить качество проекта.

Работа выполняется в рамках ГК 02.740.11.07.50 по ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы». На представленный здесь способ моделирования сооружений и оборудования ГЭС получен патент на изобретение [20].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васильев Ю.С., Кубышкин Л.И., Соколов Б.А. Исследование неустановившихся режимов в отводящей деривации Понойской ГЭС-1 методами математического моделирования // Аннотации законченных в 1968 г. НИР по гидротехнике. М.: Энергия, 1969.

2. Васильев Ю.С., Кубышкин Л.И., Соколов Б.А. Математическое обеспечение ЭВМ Наир-2 для гидротехнических расчетов: Учебно-методическое пособие. Л.: Изд-во ЛПИ, 1975. 87 с.

3. Кубышкин Л.И. Методика обоснования параметров турбинных трубопроводов ГЭС с применением динамического программирования: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Л.: Изд-во ЛПИ, 1980.

4. Васильев Ю.С., Виссарионов В.И., Кубышкин Л.И., Соколов Б.А. Математическое обеспечение ЭВМ для гидротехнических расчетов: Учебно-методическое пособие. Л.: ЛПИ, 1982. 84 с.

5. Васильев Ю.С., Виссарионов В.И., Кубышкин Л.И. Решение гидроэнергетических задач на ЭВМ

(элементы САПР и АСНИ). М.: Энергоатомиздат, 1987. 160 с.

6. **Васильев Ю.С., Кубышкин Л.И.** Компьютерные технологии проектирования гидроэнергетических объектов // Сб. науч. тр. СПбГТУ. Энергетика, гидротехника. 1998. №475. С. 32–42.

7. **Васильев Ю.С., Кубышкин Л.И.** Автоматизация проектирования гидроэнергетических объектов / СПб, ОАО «НПО ЦКТИ» // Турбиностроение: Труды ЦКТИ. 2002. Вып. 290. С. 15–23.

8. **Елистратов В.В., Кубышкин Л.И., Светозарская С.В.** Компьютерные, сетевые и информационные технологии. Расчет турбинных водоводов ГЭС: учеб. пособие. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011. 56 с.

9. **Васильев Ю.С., Кубышкин Л.И., Морозов О.С.** Разработка чертежей зданий ГЭС методом пространственного компьютерного моделирования // Гидротехническое строительство. 1998. №11. С. 7–11.

10. **Кубышкин Л.И.** Автоматизация проектирования объектов возобновляемой энергетики. Ч.1. Разработка проектной графической документации: Учебное пособие. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. 136 с.

11. **Елистратов В.В., Кубышкин Л.И.** Моделирование основных сооружений ГАЭС // Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии: Тезисы докладов научно-техн. конф. СПб.: Изд-во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 2005.

12. **Васильев Ю.С., Елистратов В.В., Кубышкин Л.И.** Моделирование энергетических сооружений ГАЭС // Гидротехническое строительство. 2007. № 5. С. 11–17.

13. **Васильев Ю.С., Кубышкин Л.И., Кудряшева И.Г.** Компьютерные технологии в научных исследова-

ниях и проектировании объектов возобновляемой энергетики: учеб. пособие / Под общ. ред. Ю.С. Васильева. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 262 с.

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

15. Использование водной энергии: Учебник для вузов / Под ред. Ю. С. Васильева. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоиздат, 1995. 608 с.

16. **ОСТ 108.023.14–84.** Профили лопаток направляющего аппарата гидравлических вертикальных поворотно-лопастных и радиально-осевых турбин. Типы и размеры.

17. **ОСТ. 108.023.11–80.** Камеры спиральные металлические гидравлических вертикальных турбин. Очертания проточной части. Размеры.

18. Гидроэнергетическое и вспомогательное оборудование гидроэлектростанций: Справочное пособие. В 2 т. / Под. ред. Ю.С. Васильева, Д.С. Щавелева. М.: Энергоатомиздат, 1988. 400 с.

19. **Баденко В.Л.** Геоинформационные технологии для решения задач природообустройства: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2013. 147 с.

20. **Патент на изобретение № 2473128.** Способ параметрического трехмерного моделирования оборудования и сооружений гидроэнергетических объектов / Васильев Ю.С., Елистратов В.В., Кубышкин Л.И., Светозарская С.В. Патентообладатель: ФБГОУ ВПО Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Зарегистрировано в Государственном реестре изобретений Российской Федерации 20 января 2013 г.

REFERENCES

1. **Vasilyev Yu.S., Kubyshkin L.I., Sokolov B.A.** Issledovaniye neustanovivshikhsya rezhimov v otvodyashchey derivatsii Ponoyskoy GES-1 metodami matematicheskogo modelirovaniya. *Annotatsii zakonchennykh v 1968g. NIR po gidrotekhnike*. М.: Energiya, 1969. (rus.)

2. **Vasilyev Yu.S., Kubyshkin L.I., Sokolov B.A.** Matematicheskoye obespecheniye EVM Nairi-2 dlya gidrotekhnicheskikh raschetov: Uchebno-metodicheskoye posobiye. Leningrad: Izd-vo LPI, 1975. 87 s. (rus.)

3. **Kubyshkin L.I.** Metodika obosnovaniya parametrov turbinnikh truboprovodov GES s primeneniym dinamicheskogo programmirovaniya: Avtoreferat diss ... kand. techn. nauk / LPI, 1980. (rus.)

4. **Vasilyev Yu.S., Vissarionov V.I., Kubyshkin L.I., Sokolov B.A.** Matematicheskoye obespecheniye EVM dlya gidrotekhnicheskikh raschetov: Uchebno-metodicheskoye posobiye. Leningrad: Izd-vo LPI, 1982. 84 s. (rus.)

5. **Vasilyev Yu.S., Vissarionov V.I., Kubyshkin L.I.** Resheniye gidroenergeticheskikh zadach na EVM (ele-

menty SAPR i ASNI). М.: Energoatomizdat, 1987, 160 s. (rus.)

6. **Vasilyev Yu.S., Kubyshkin L.I.** Kompyuternyye tekhnologii proyektirovaniya gidroenergeticheskikh obyektov. *Sbornik nauchnykh trudov SPbGTU. Energetika, gidrotekhnika*. 1998. №475. S. 32–42. (rus.)

7. **Vasilyev Yu.S., Kubyshkin L.I.** Avtomatizatsiya proyektirovaniya gidroenergeticheskikh obyektov. *Turbinostryeniye: Trudy TsKTI*. Вып. 290 / СПб, ОАО «НПО ЦКТИ», 2002. (rus.)

8. **Yelistratov V.V., Kubyshkin L.I., Svetozarskaya S.V.** Kompyuternyye, setevyye i informatsionnyye tekhnologii. Raschet turbinnikh vodovodov GES: ucheb. posobiye. SPb.: Izd-vo Politekh. un-ta. 2011. 56 s. (rus.)

9. **Vasilyev Yu.S., Kubyshkin L.I., Morozov O.S.** Razrabotka chertezhey zdaniy GES metodom prostranstvennogo kompyuternogo modelirovaniya. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo*. 1998. №11. S. 7–11. (rus.)

10. **Kubyshkin L.I.** Avtomatizatsiya proyektirovaniya obyektov vozobnovlyayemoy energetiki. Ch.1. Razrabotka proyektnoy graficheskoy dokumentatsii: Uchebnoye posobiye. Sankt-Peterburg: Izd-vo SPbGPU, 2003. 136 s. (rus.)

11. **Yelistratov V.V., Kubyshkin L.I.** Modelirovaniye osnovnykh sooruzheniy GAES. *Gidroenergetika. Novyye razrabotki i tekhnologii. Tezisy dokladov nauchno-techn. konf.* SPb.: Izd-vo VNIIG im. B.Ye.Vedeneyeva, 2005. (rus.)

12. **Vasilyev Yu.S., Yelistratov V.V., Kubyshkin L.I.** Modelirovaniye energeticheskikh sooruzheniy GAES. *Gidrotekhnicheskoye stroitelstvo*. 2007. № 5. S. 11–17. (rus.)

13. **Vasilyev Yu.S., Kubyshkin L.I., Kudryasheva I.G.** Kompyuternyye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh i proyektirovaniy obyektov vozobnovlyayemoy energetiki: Ucheb. posobiye / Pod obshch. red. Yu.S. Vasilyeva. SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta, 2008. 262 s. (rus.)

14. **Kubyshkin L.I., Svetozarskaya S.V.** Parametricheskoye modelirovaniye obyektov vozobnovlyayemoy energetiki. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU. Ser.: Nauka i obrazovaniye*. 2010. № 4(110). S. 42–50. — SPb.: Izd-vo Politekhn. un-ta. 2010. (rus.)

15. Ispolzovaniye vodnoy energii: Uchebnik dlya vuzov / Pod red. Yu.S. Vasilyeva. 4-ye izd., pererab. i dop. M.: Energoizdat, 1995. 608 s. (rus.)

16. **OST 108.023.14–84.** Profili lopatok napravlyayushchego apparata gidravlicheskikh vertikalnykh povorotno-lopastnykh i radialno-osevykh turbin. Tipy i razmery. (rus.)

17. **OST 108.023.11–80.** Kamery spiralnyye metallicheskiye gidravlicheskikh vertikalnykh turbin. Oчерtaniya protochnoy chasti. Razmery. (rus.)

18. Gidroenergeticheskoye i vspomogatelnoye oborudovaniye gidroelektrostantsiy: Spravochnoye posobiye. V 2 t. / Pod. red. Yu.S. Vasilyeva, D.S. Shchaveleva. M.: Energoatomizdat, 1988. 400 s. (rus.)

19. **Badenko V.L.** Geoinformatsionnyye tekhnologii dlya resheniya zadach prirodoobustroystva: Ucheb. posobiye. SPb.: Izd-vo SPbGPU, 2013. 147 s. (rus.)

20. **Patent RF na izobreteniyе № 2473128.** Sposob parametricheskogo trekhmernogo modelirovaniya oborudovaniya i sooruzheniy gidroenergeticheskikh obyektov / Vasilyev Yu.S., Yelistratov V.V., Kubyshkin L.I., Svetozarskaya S.V. Patentobladatel: FBGOU VPO. Zaregistrirvano v Gosudarstvennom reyestre izobreteniy Rossiyskoy Federatsii 20 yanvarya 2013 g. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

ВАСИЛЬЕВ Юрий Сергеевич — доктор технических наук президент Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, академик РАН; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: president@spbstu.ru

КУБЫШКИН Леонид Иванович — кандидат технических наук профессор водохозяйственного и гидротехнического строительства Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: kubishkin@cef.spbstu.ru

AUTHORS

VASIL'EV Yuriy S. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politechnicheskaya Str. 29, St. Petesburg, Russia; e-mail: president@spbstu.ru

KUBYSHKIN Leonid I. — St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politechnicheskaya Str. 29, St. Petesburg, Russia; e-mail: kubishkin@cef.spbstu.ru