

Пупасов-Максимов Андрей Михайлович

ЗАО «Сибкон»

Главный специалист, кандидат физико-математических наук

Pupasov-Maksimov Andrey M.

JSC «Sibcon», Moscow

E-Mail: pupasov@sibcon.ru

Орлов Андрей Валерьевич

ЗАО «Сибкон»

Главный специалист

Orlov Andrey V.

JSC «Sibcon», Moscow

E-Mail: orlov@sibcon.ru

Федосеев Андрей Владимирович

ООО «Эксперт Энерго»

Заместитель директора

Fedoseev Andrey V.

Expert Energo Ltd

E-Mail: Andrey.Fedoseev@eenergo.ru

05.00.00 - Технические науки

**Задача оптимизации местоположения и структуры малой ГЭС на стадии
обоснования инвестиций**

Optimization of structure and site selection of small hydro power plant under an
investment feasibility study

Аннотация: Разрабатывается математическая модель, учитывающая многокритериальный характер оптимизации проекта малой ГЭС. Математическая модель учитывает местоположение створа и близость инфраструктуры с использованием цифровой модели рельефа. Экологические и экономические факторы проекта учитываются оценочно. Рассматриваются различные схемы создания напора (плотинная, деривационная, смешанная, безнапорная).

Abstract: Multicriterial optimization problem of a small hydro power plant project has been formulated. Site selection is performed within a digital relief model. Ecological impact and economic factors are taken into account. Different HPP types (dam scheme, derivation scheme, mixed scheme) are implemented.

Ключевые слова: Малая гидроэнергетика; оптимизация; ГИС-системы.

Keywords: Hydro power plants; optimization; GIS systems.

При проектировании малых *гидроэлектростанций (ГЭС)*, естественным образом возникает задача выбора оптимальных параметров проекта (основные требования к проекту малой ГЭС содержатся в [9], раздел 5.1.3 «Научное обоснование гидроэнергетических объектов на стадии обоснования инвестиций»):

- 1) выбор места (створа) размещения гидроэнергетического объекта;
- 2) определение энергетических параметров объекта (напор, мощность с учетом работы в энергосистеме, предварительные параметры водохранилища);
- 3) предварительное обоснование компоновочных решений элементов гидроузла с учетом гидроэнергетических параметров и экологических последствий;
- 4) обоснование типа и количества гидроэнергетического оборудования.

Создание ГЭС на малых реках требует учета рельефа, водного режима реки, ландшафтных особенностей территории. Анализ возможности использования объектов малой гидроэнергетики на конкретной территории требует учета большого числа физико-географических и социально-экономических факторов [5]. Сам характер задачи определяет основные средства ее решения – *геоинформационные системы (ГИС)*, дополненные модулями, автоматизирующими необходимые расчеты. Действительно, в настоящее время доступна подробная (глобальная) картографическая информация, например, цифровые модели рельефа, построенные по данным космического зондирования Земли, и климатические базы данных. Эта информация постоянно обновляется и уточняется. Обработка таких карт и баз данных осуществляется с использованием ГИС-систем. С помощью цифровой модели рельефа и климатической информации можно выполнять гидрологические расчеты, пробовать различные варианты размещения ГЭС. Цель данной работы - объединить предпроектную аналитику в одной *автоматизированной системе (АС)* расчета и оптимизации параметров проекта малой ГЭС.

Различные аспекты использования ГИС-технологий при проектировании малых ГЭС рассматривалось многими авторами [2]-[5]. В работе [8] при оптимизации проекта малой ГЭС учитывались близость инфраструктуры, экологическое воздействие водохранилища. В [1] с помощью ГИС исследовалось влияние глобальных изменений на гидроэнергетику Лаплатской низменности. Экономические, инженерные и социальные факторы, влияющие на размещение малых ГЭС, рассматривались в [3].

В данной работе, разрабатывается математическая модель, учитывающая многокритериальный характер оптимизации проекта малой ГЭС. По сравнению с предыдущими работами, указанными выше, новизна предложенной математической модели заключается в учете различных схем создания напора (плотинная, деривационная, смешанная, безнапорная). В целом, математическая модель учитывает местоположение створа, близость инфраструктуры, инженерные аспекты (с учетом различных схем напора). Экологические и экономические факторы проекта учитываются оценочно, что допустимо на стадии обоснования инвестиций: «Допускается применение полученных из опыта укрупненных показателей, привязанных к региону строительства гидроэнергетического объекта, в том числе: стоимость 1 кВт установленной мощности, стоимость 1 кВт.ч выработанной электроэнергии в среднем по водности году, стоимость 1 м³ уложенного бетона, стоимость 1 т смонтированного оборудования, стоимость переселения 1 человека, стоимость 1 га отчуждаемых земель» [9]. Детальное описание математической модели, которая используется в данной работе дано в [7].

Для проверки разработанной математической модели был создан экспериментальный образец программного обеспечения, получивший рабочее название «НРР-model».

Алгоритм оптимизации проекта малой ГЭС

На рисунке 1 изображена схема алгоритма оптимизации проекта малой ГЭС. Алгоритм разделен на 6 основных блоков. Блоки 2, 3, 4 повторяются итеративно для большого числа

створов, и в каждом створе рассматриваются различные отметки нормального подпорного уровня (НПУ).

Итерации алгоритма осуществляются следующим образом. Используя ограничения на близость инфраструктуры (максимальное расстояние до потребителя электроэнергии) определяется рассматриваемый участок реки. Этот участок разбивается на N_s створов, нумеруемых целочисленным параметром $count_s \in (1, N_s)$. Для каждого $count_s$ последовательно перебираются малые ГЭС с различными схемами создания напора, которые нумеруются параметром $type_h$. Для каждого $type_h$ рассматривается ряд значений напора $H \in (H_{min}, H_{max})$ с шагом ΔH . Минимальный (максимальный) напор соответствует минимальной (максимальной) допустимой мощности малой ГЭС. Таким образом, перебор всех вариантов размещения и компоновки малой ГЭС осуществляется в трех вложенных циклах.

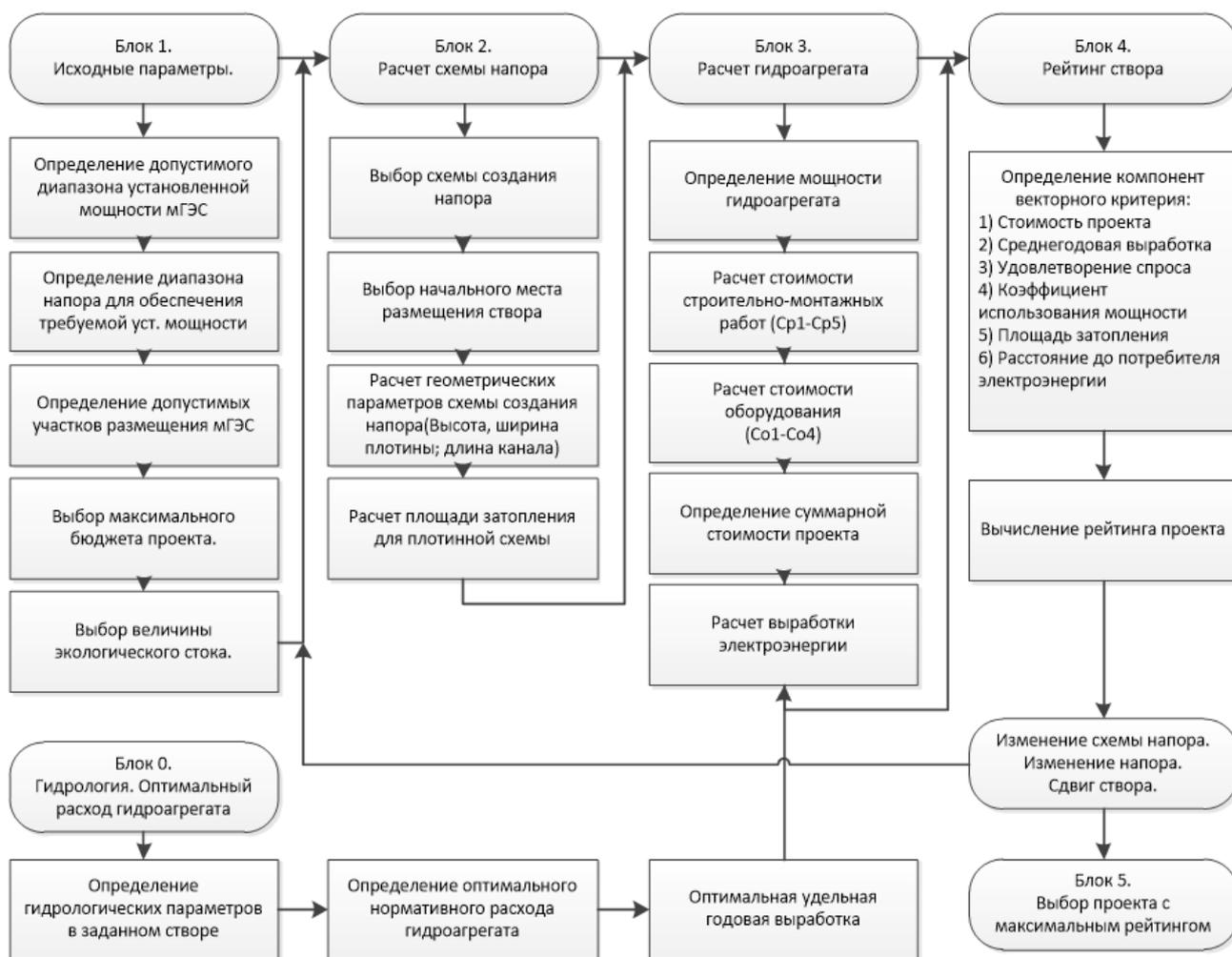


Рис. 1. Схематическое изображение алгоритма оптимизации проекта малой ГЭС

Наиболее существенная часть алгоритма оптимизации связана с присвоением каждому проекту малой ГЭС числа – рейтинга проекта (значение целевой функции). Рейтинг проекта вычисляется в цикле по значению напора.

В данной работе мы исходили из следующих параметров проекта малой ГЭС, определяющих отношение предпочтения:

- 1) Удовлетворение спроса на электроэнергию, df . Проект малой ГЭС является целесообразным и результативным, если данная малая ГЭС позволяет удовлетворить спрос на электроэнергию. В том случае, если ни один из

вариантов проекта не позволяет выработать необходимое количество электроэнергии, проект не результативен, хотя может и быть эффективным, вырабатывая часть требуемой электроэнергии по низкой цене.

- 2) Коэффициент использования мощности малой ГЭС, kP , или отношение средней мощности малой ГЭС, которая достигается в ходе эксплуатации, к номинальной мощности гидроагрегата. Более предпочтителен проект малой ГЭС с большим коэффициентом использования мощности.
- 3) Общие капитальные затраты, Pc (см. например [2, 4]). Из нескольких вариантов малой ГЭС предпочтительным является вариант с наименьшими капитальными затратами, которые ограничены сверху максимальным возможным бюджетом проекта (Pc_{max}).
- 4) Площадь отчуждаемых земель, Fa (см. например алгоритм в [6]). Из двух проектов, удовлетворяющих спрос на электроэнергию, предпочтительным является проект с меньшей площадью отчуждаемых земель. На рассматриваемом участке реки существует проект с максимальной величиной площади отчуждаемых земель Fa_{max} .
- 5) Длина деривационного канала, Ld . Проект малой ГЭС с меньшей длиной деривационного канала является предпочтительным. Длина деривационного канала ограничена сверху максимальной длиной Ld_{max} .
- 6) Расстояние от створа малой ГЭС до потребителя электроэнергии, Rd . Необходимо минимизировать расстояние от (здания) малой ГЭС до потребителя электроэнергии. Данное расстояние ограничено сверху (Rd_{max}), что определяет рассматриваемый участок реки.

Алгоритмы вычисления представленных критериев приведены в [7]. В данной статье мы более детально опишем способ объединения рассмотренных критериев в рамках единой многокритериальной задачи. Для построения многокритериального отношения предпочтения задаются веса $w(i)$, позволяющие учесть важность каждого критерия (см. Таблицу 1.). Веса – произвольные положительные вещественные числа, более важному критерию соответствует больший вес. Рейтинг проекта определяется следующей безразмерной функцией весов и критериев

$$rank = nw \left(wkP * kP + wdf * df - wRd \frac{Rd}{Rd_{max}} - wLd \frac{Ld}{MaxLd} - wFa \frac{Fa}{Fa_{max}} - wPc \frac{Pc}{Pc_{max}} \right),$$

где

$$nw = (wkP^2 + wdf^2 + wRd^2 + wLd^2 + wFa^2 + wPc^2)^{-\frac{1}{2}}$$

является нормировочным множителем.

Рейтинг проекта образует массив $rank(count_s, type_h, H)$. Проект малой ГЭС с максимальным рейтингом является оптимальным (для отношения предпочтения, которое задано лицом принимающим решение, посредством весов критериев).

Таблица 1

Факторы, которые учитываются моделью и их связь с весами критериев

Вес критерия	Учитываемые факторы
Вес коэффициента использования мощности, wkP	Расход воды в реке (минимальный, максимальный, средний, экологический сток и их изменчивость), эффективность гидроагрегата

Вес удовлетворения спроса, wdf	График потребления электроэнергии, выработка электроэнергии
Вес расстояния до потребителя, wRd	Близость объектов инфраструктуры
Вес длины деривационного канала, wLd	Рельеф, стоимость сооружения деривационного канала, схема создания напора
Вес площади затопляемых земель, wFa	Рельеф, экологическое воздействие, стоимость сооружения водохранилища, схема создания напора
Вес стоимости проекта, wPc	Экономические факторы

Экспериментальный образец программного обеспечения

Для тестирования разработанной математической модели малой ГЭС и алгоритма оптимизации был создан ЭО ПО «НРР-model». ПО реализовано на языке Java и включает исполняемый файл НРР-model.jar, вспомогательные файлы start.bat, start.sh и набор следующих библиотек: slf4j-api-1.7.5.jar, logback-core-1.0.13.jar, logback-classic-1.0.13.jar. В состав ПО НРР-model входит один программный модуль «Оптимизация малой ГЭС».

ПО НРР-model реализует выполнение следующих функциональных требований:

- 1) поиск оптимального состава (конструкции) малой ГЭС мощностью до 10 МВт;
- 2) поиск оптимального места размещения малой ГЭС;
- 3) определение характеристик работы энергосистемы.

ПО НРР-model обеспечивает:

- 1) возможность учитывать основные способы размещения малой ГЭС: плотинная схема, деривационная схема с водохранилищем, без водохранилища, безнапорная схема;
- 2) реализацию требований по обеспечению экологически допустимого стока для малых рек;
- 3) возможность учитывать особенности рельефа и русла реки при поиске оптимального места расположения малой ГЭС;
- 4) возможность оценочно учитывать капитальные затраты на строительные работы по сооружению малой ГЭС;
- 5) возможность учитывать параметры графика нагрузки потребителя, тенденции изменения климатических условий, которые оказывают влияние на среднегодовой сток;
- 6) визуализацию расчетов по оптимизации малой ГЭС.

Для удобства выполнения расчетов исходные данные могут быть собраны в один xml-файл. Внешний вид интерфейса «НРР-model» представлен на рисунке 2.

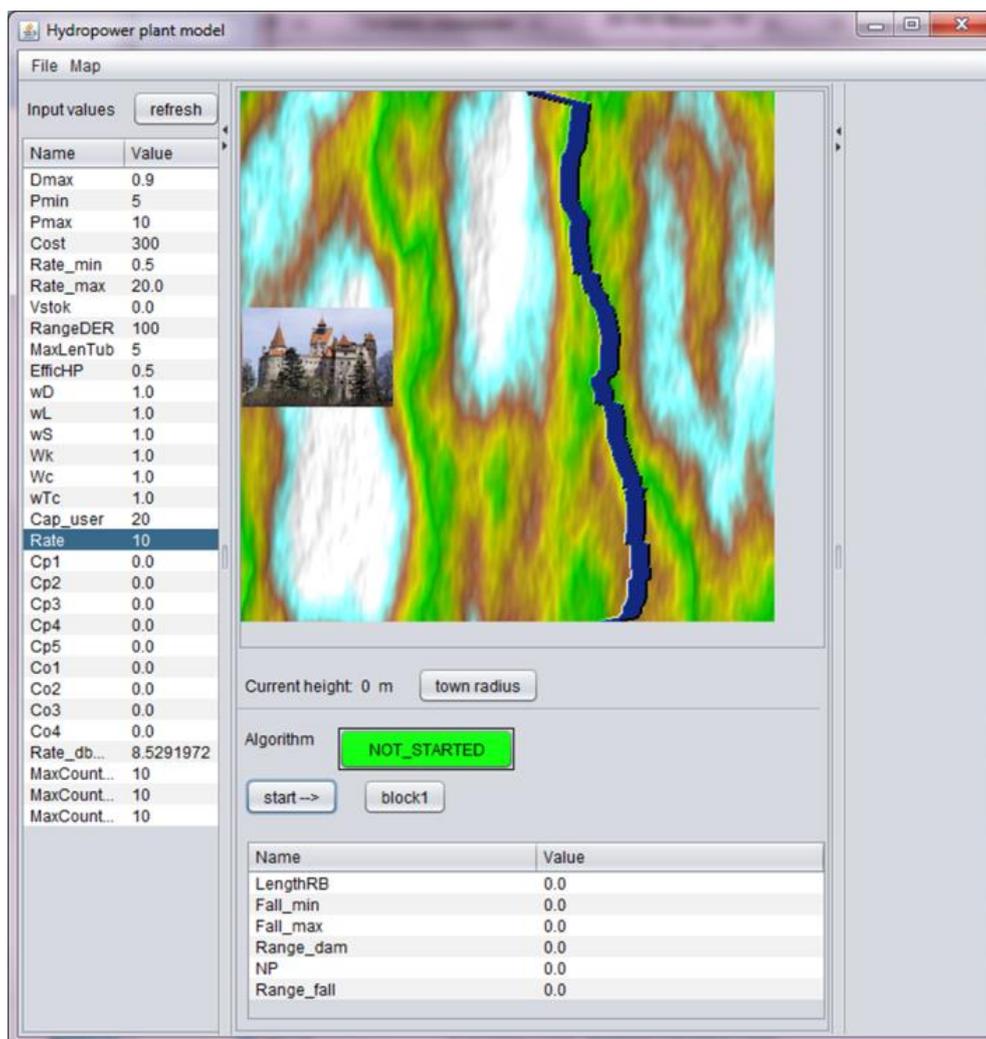


Рис. 1. Внешний вид интерфейса HPP-model

Заключение

Основное направление научных работ, исследующих и моделирующих работу малых гидроэлектростанций, связано с оптимизацией отдельных узлов малых ГЭС (турбины, генераторы, гидротехнические сооружения), с исследованием гидропотенциала отдельных территорий, с разработкой и тестированием методов расчета гидрологических параметров для неизученных водотоков. В данной работе, поставлена схожая задача, объединяющая эти направления исследования: рассмотрены способы постановки и решения задачи оптимизации структуры малой ГЭС и места ее размещения, предложена математическая модель проекта малой ГЭС и дано описание алгоритма многокритериальной оптимизации. Для построения математической модели зафиксирована наиболее общая структура малой ГЭС, модель представлена в виде таблицы [7]. Сформулирована концепция математической модели и разработан алгоритм поиска оптимального проекта малой ГЭС, который реализован в виде ЭО ПО «HPP-model». По сравнению с работой [8] разработанная модель допускает рассмотрение нескольких вариантов создания напора, таким образом, увеличивая реалистичность задачи оптимизации.

Исследование выполнено в рамках НИР «Разработка научно-методических основ и программного обеспечения в области решения задач оптимизации проектирования объектов малой гидроэнергетики в условиях изменения климата и переменной антропогенной нагрузки» (номер гос. контракта № 14.516.11.0073), при финансовой поддержке Минобрнауки РФ.

ЛИТЕРАТУРА

1. A GIS-based assessment of maximum potential hydropower production in La Plata basin under global changes [Статья] / авт. С. Daly, G. Palomino [и др.] // Renewable Energy. - 2013 г.. - Т. 50. - стр. 103-114.
2. Analysis for cost estimation of low head run-of-river small hydropower schemes [Статья] / авт. S.K. Singal, R.P. Saini и C.S. Raghuvanshi // Energy for Sustainable Development. - 2010 г.. - Т. 14. - стр. 117–126.
3. Application of geographical information system to site selection of small run-of-river hydropower project by considering engineering/economic/ environmental criteria and social impact [Статья] / авт. R. Pannathat, С. Taweep и В. Thawilwadee // Renewable and Sustainable Energy Reviews. - 2009 г.. - Т. 13. - стр. 2336–2348.
4. Cost analysis of low-head dam-toe small hydropower plants based on number of generating units [Статья] / авт. S. K. Singal и R. P. Saini // Energy for Sustainable Development. - 2008 г.. - 3 : Т. 12. - стр. 55-60.
5. Decision support system for micro-hydro power plants in the Amazon region under a sustainable development perspective [Статья] / авт. С. J. Blanco, Y. Secretan и A. L. Amarante Mesquita // Energy for Sustainable Development Journal. - 2008 г.. - Т. 12. - стр. 25–33.
6. GraphiCon [Конференция] / авт. Н. С. Мирза // Геометрический подход для решения задачи расчёта зон затопления. - Москва : [б.н.], 2007.
7. Актуальные проблемы современной науки [Конференция] / авт. А. М. Пупасов-Максимов, А. В. Орлов и С. А. Журавлев // Задача оптимизации местоположения и структуры малой ГЭС на стадии обоснования инвестиций. - Самара : [б.н.], 2013.
8. Геоинформационные методы поиска перспективных створов для строительства ГЭС [Журнал] / авт. Т. С. Иванов, Н. В. Баденко и В. А. Олешко // Инженерно-строительный журнал. - 2013 г.. - Т. 4. - стр. 70-123.
9. Нормы и требования / авт. НП «Гидроэнергетика России»; ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» // Гидроэлектростанции. Научное обоснование создания гидроэнергетических объектов. - Москва : [б.н.], 2009 г.. - СТО 70238424.27.140.037-2009.

Рецензент: Чернов Алексей Владимирович, доцент, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник Географического факультета МГУ им. М. В. Ломоносова.