

На правах рукописи

Конищев Михаил Анатольевич

**МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ И РЕЖИМОВ  
РАБОТЫ ЭНЕРГОКОМПЛЕКСОВ ГЭС-ВЭС**

05.14.08 – энергоустановки на основе  
возобновляемых видов энергии

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2010

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Елистратов Виктор Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
Безруких Павел Павлович  
кандидат технических наук,  
Бляшко Яков Иосифович

Ведущая организация: ОАО «НИИЭС»

Защита состоится «23» декабря 2010 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.17 при ГОУ ВПО «Санкт-Петербургском государственном политехническом университете» по адресу 195251, Санкт-Петербург, Политехническая 29, гидрокорпус-2, ауд. 411.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО «Санкт-Петербургского государственного политехнического университета».

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета, д.т.н.  Г.И. Сидоренко

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность проблемы**

Последние десятилетия мировая ветроэнергетика развивается по очень оптимистичному сценарию. В среднем каждые три года установленная мощность ветроэлектростанций (ВЭС) в мире удваивается, а доля ветровой энергии в производстве электроэнергии непрерывно растет.

В 2009 году установленная мощность ВЭС в мире достигла 157,4 ГВт, а выработка электроэнергии составила около 340 ТВт-ч, или около 2% всей произведенной электроэнергии в мире. В ряде стран доля ветровой энергии в производстве электроэнергии весьма велика: Дания – 20 %, Португалия – 15%, Испания – 14%, Германия – 9%. Однако, как показал мировой опыт, рост доли ветровой энергии может приводить к проблемам с ее выдачей и распределением в сети, с качеством электроэнергии и надежностью энергоснабжения, что сказывается на снижении выработки ВЭС в целом и рыночной стоимости продаваемой электроэнергии от ВЭС.

Для решения этих актуальных проблем в рамках международного энергетического агентства (IEA) сформированы программы №24 – «Интеграция ветро- и гидроэнергетических систем» и №25 – «Проектирование и эксплуатация энергосистем с большой долей ВЭС» объединяющие более 25 энергетических компаний и центров в странах с развитой ветроэнергетикой.

На территории России работает 11 ВЭС и ветроэнергетических установок (ВЭУ) суммарной установленной мощностью около 13 МВт. Из них только четыре ВЭС мощностью выше 1 МВт. Тем не менее, интерес к возобновляемой энергетике в России в последнее время возрастает. Согласно принятому распоряжению правительства РФ №1-Р от 09.01.2009 г., доля выработки электроэнергии от возобновляемых источников в общем энергобалансе страны, к 2020 году должна составить 4,5%, в том числе доля ВЭС – около 1%.

Особенностью России является наличие децентрализованных и энергодефицитных районов со слаборазвитой сетевой инфраструктурой, где строительство ВЭС представляется особенно актуальным, однако и в таких

районах существуют проблемы с перераспределением и аккумулярованием энергии ВЭС. Данные проблемы, в централизованных и децентрализованных энергосистемах (ЭС) предлагается решить с помощью создания энергокомплексов ГЭС-ВЭС, которые могут выступать в ЭС как единый энергетический объект с управлением и регулированием нагрузки на внутростанционном уровне.

**Актуальность** темы диссертационной работы определяется необходимостью разработки систем электроснабжения на базе современных ветроэнергетических и гидроэнергетических установок для обеспечения потребителей качественной и доступной электроэнергией, как в централизованных, так и в децентрализованных энергосистемах.

**Целью** диссертационной работы является методика обоснования параметров и режимов работы энергокомплексов (ЭК) на основе ВЭУ и гидроэнергетических установок (ГЭУ) с водохранилищами, обеспечивающих перераспределение и гидравлическое аккумулярование энергии.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Проведен анализ современных систем перераспределения и аккумулярования энергии и обоснование целесообразности использования ГЭУ для аккумулярования ветровой энергии.

2. Разработаны математические модели ВЭС и ГЭС, работающих в составе энергокомплекса, алгоритмы и программный комплекс для оптимизации параметров и режимов совместной работы, с учетом особенностей прихода ветровой энергии, приточности и демпфирования речного стока в водохранилище, обеспечения баланса производства и потребления энергии в различные временные промежутки, общесистемных и внутростанционных ограничений.

3. Разработана методика математического моделирования совместной работы ветровых и гидроэнергетических установок и расчета оптимальных параметров ВЭС.

4. Проведены практические расчеты по оптимизации параметров ВЭС и моделированию режимов работы энергокомплекса ГЭС-ВЭС на примере энергокомплекса «Волжская ГЭС – ветропарк Нижняя Волга».

**Научная новизна** представленной работы заключается в следующем:

1. Уточнена классификация систем аккумулирования электрической энергии в зависимости от их мощности и энергоемкости и определено место систем с гидравлическим аккумулированием энергии.

2. Впервые разработана математическая модель совместной работы ВЭС-ГЭС с учетом особенностей прихода ветровой энергии, приточности и демпфирования речного стока в водохранилище, общесистемных и внутростанционных ограничений и обеспечения баланса производства и потребления энергии в различные временные промежутки.

3. Разработана специализированная методика для обоснования режимов работы энергокомплекса в составе ВЭС и ГЭС с водохранилищем и оптимизации параметров ВЭС.

4. Даны рекомендации по назначению режимов совместной работы энергокомплекса ГЭС-ВЭС и определению гарантированной мощности и выработки энергии на предстоящие краткосрочные и среднесрочные периоды при проведении проектных работ.

**Достоверность полученных результатов** исследований, теоретических и методических обоснований, выводов и рекомендаций подтверждается использованием в разработках научно-обоснованных и проверенных методов различных научных дисциплин, корректным применением адекватного математического аппарата, и хорошим совпадением результатов тестового моделирования с данными натурных наблюдений.

**Практическая ценность результатов** состоит в том, что в результате проведенных исследований:

1. Разработаны новые модели и инженерные методики обоснования параметров и режимов совместной работы гидро- и ветроустановок для проектных задач.

2. Создан расчетно-моделирующий программный комплекс для ЭВМ с графическим интерфейсом, позволяющий решать задачи расчета и обоснования оптимальных параметров и режимов работы энергокомплексов ГЭС-ВЭС.

#### **Научные положения, выносимые на защиту:**

1. Уточненная классификация систем аккумулирования электрической энергии, в части систем большой энергоёмкости и времени заряда-разряда.

2. Математическая модель совместной работы ГЭС-ВЭС в составе ЭК.

3. Методы многоуровневой оптимизации параметров ВЭС и режимов работы энергокомплекса ГЭС-ВЭС.

#### **Область применения результатов**

Результаты данного исследования могут быть использованы при проектировании ВЭС в централизованных и децентрализованных энергосистемах с ГЭС и неразвитой инфраструктурой перераспределения и выдачи электроэнергии, а также для оптимизации режимов работы существующих гидроэлектростанций при реализации рядом проектов крупных ВЭС, и при прогнозировании на предстоящие периоды гарантированной мощности и выработки электроэнергии энергокомплексами на основе возобновляемых источников для её более эффективной продажи на рынках мощности и энергии.

#### **Апробация и внедрение результатов**

Основные положения диссертации доложены на семинарах кафедры «Возобновляющиеся источники энергии и гидроэнергетика» СПбГПУ, на всероссийском форуме студентов, аспирантов и молодых ученых (2007 г.), на неделях науки СПбГПУ (2007-2008 г.). Сделаны доклады на 7ой и 8ой международной конференции специалистов по ветроэнергетике (WWEC2008 – Canada, June 23-25, 2008, WWEC2009 – Jeju, June 23-25, 2009).

По результатам работы опубликовано 11 научных работ. Работы по теме проводились в рамках проектов РФФИ №06-08-00559, №08-022-98803, №08-08-01053, ряда хоздоговоров и контракта с Министерством образования и науки ГК 02.740.11.0750 ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России».

Разработанная методика была апробирована в ОАО «РусГидро» при проектировании ветропарка «Нижняя Волга» установленной мощностью до 1 ГВт рядом с Волжской ГЭС.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, приложений. Она содержит 140 страниц машинописного текста, 50 рисунков, 12 таблиц и список используемой литературы из 99 наименований.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

В автореферате рассматриваются вопросы совместной работы ВЭС и ГЭС с гидравлическим аккумулярованием за счет назначения специальных режимов гидро и ветроагрегатов. Основное внимание уделяется задаче выбора оптимального состава ВЭУ и режима работы ЭК с целью обеспечения гарантированного энергоснабжения. Для этих задач даются математические модели и алгоритмы расчетов, которые доведены до стадии программ для ЭВМ. Методика расчета и оптимизации режимов работы энергокомплекса подкрепляется примером расчета для конкретного гидроузла.

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, приведены положения, выносимые на защиту, дана оценка новизны и практической значимости полученных результатов, а также кратко изложено содержание работы.

**В первой главе** обобщены работы по вопросам преобразования и аккумулярования энергии возобновляемых источников, изложенные в трудах Астахова Ю.Н., Андрианова В.Н., Безруких П.П., Боссела У., Быстрицкого Д.Н., Гатцена К., Денисенко Г.И., Зубарева В.В., Коппина П., Сироткина Н.Н.,

Твайделла Дж., Уэйра А., Хоффмана Л. и др. Вопросами гидроаккумулирования занимались такие организации как, Manitoba Hydro, Hydro-Quebec, Hydro-Tasmania, а также ученые Шефтер Я.И., Елистратов В.В., Бальзанников М.И., Минин В.А., Акер Т., Thorton К., Beckitt А. и др.

Проведен анализ современных систем аккумулирования электрической энергии, показаны основные функции аккумулирующих систем для энергетики, а также перспективность их использования для аккумулирования ветровой энергии. На основе проведенного анализа и выполненного исследования уточнена международная классификация систем аккумулирования электрической энергии по мощности и энергоемкости, разработанная Electricity Storage Association, и определено место систем гидравлического аккумулирования энергии с помощью ГЭС с водохранилищем (ЭК с ГЭС, см. рис.1).

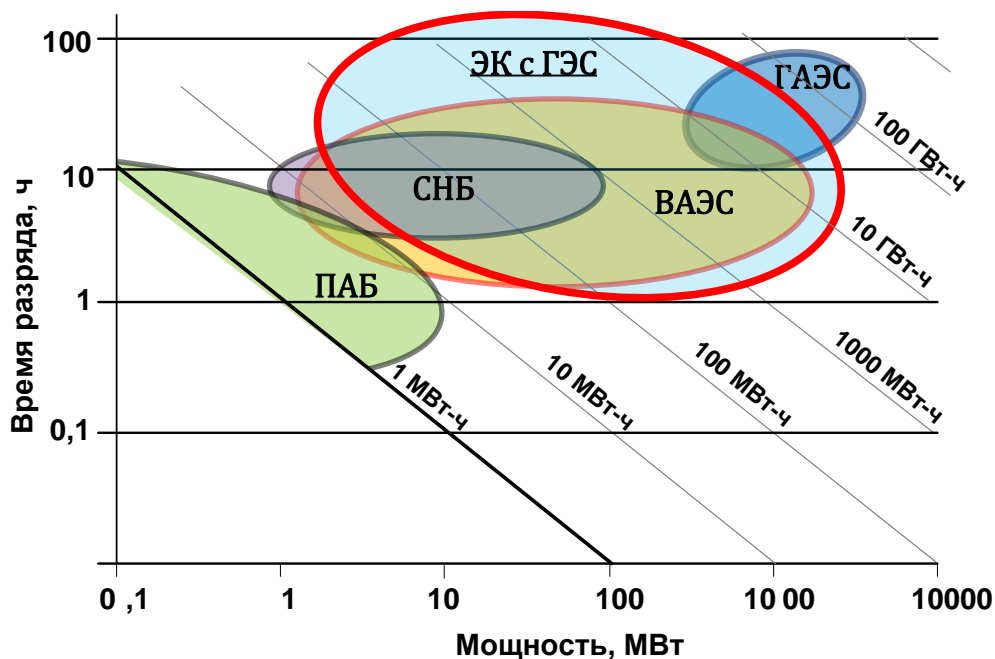


Рис. 1. Классификация систем аккумулирования электрической энергии по мощности и энергоемкости

**Во второй главе** предложена методика расчетов режимов работы ЭК ГЭС-ВЭС на основе разработанных математических моделей элементов ЭК и процессов его работы. Структурная схема модели энергокомплекса ГЭС-ВЭС представлена на рис.2.



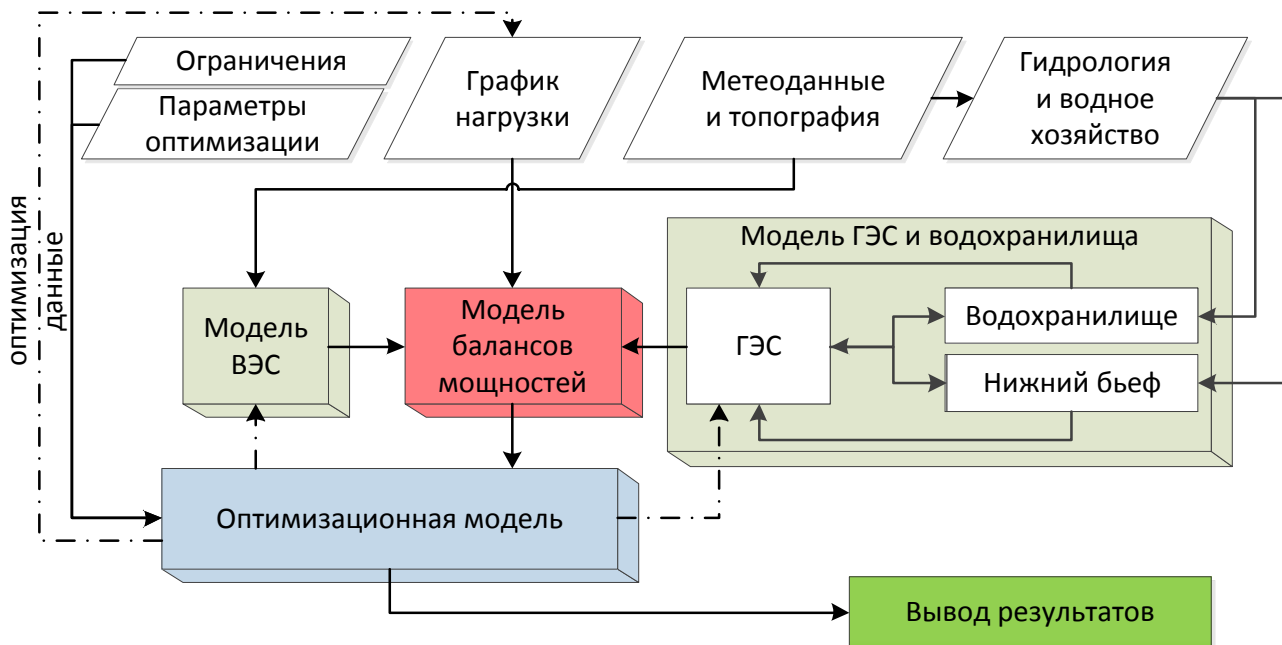


Рис. 2. Структурная схема модели энергокомплекса ГЭС-ВЭС

В соответствии со схемой модель энергокомплекса представляет взаимодействие модели ВЭС, модели ГЭС-Водохранилище, модели балансов мощностей с оптимизационной моделью. В моделях учтены внутростанционные и общесистемные ограничения, особенности климата, рельефа местности, гидрологии, водного хозяйства и режимов водохранилища.

Процессам преобразования ветровой энергии посвящены работы Безруких П.П., Белея В.Ф., Вашкевича К.П., Грибкова С.В., Да Роза А., Елистратова В.В., Маслова Л.А., Николаева В.Г., и др.

Предложенная модель работы ВЭС основывается на определении мощности ВЭС,  $N_{вэст}(m, \varphi, u)$  в каждый момент времени  $t$  с учетом местных факторов, влияющих на формирование ветрового потока, потерь на ориентацию и распределением нагрузки между ВЭУ:

$$N_{вэст}(m, \varphi, u) = \sum_{i=1}^m (f_{P_i}(u_i^r) \cdot \alpha_i \cdot k_{\Pi}(\varphi)) \leq N_{вэст}^p(m, u) \leq N_{вэст}^y, \quad (1)$$

где  $N_{вэст}^p(m, u)$  – располагаемая мощность ВЭС (при  $\sum_{i=1}^m \alpha_i = 1$ );  $m$  – количество

ВЭУ;  $N_{вэст}^y$  – установленная мощность ВЭС;  $u$  – скорость ветрового потока в месте измерения;  $\varphi$  – направление ветрового потока,  $u_i^r = u \cdot k_i^w(\varphi)$  – скорость

ветрового потока перед ротором  $i$ -ой ВЭУ;  $k_i^w(\varphi)$  – коэффициент трансформации ветрового потока, с учетом высотного профиля, орографии, препятствий и затенения ВЭУ друг другом;  $\alpha_i \in \vec{\alpha}$  – коэффициент распределения нагрузки  $i$ -й ВЭУ,  $\vec{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_m)$ ;

$k_{\Pi} = \frac{\cos(\gamma_t)}{2} \cdot \frac{\gamma_t}{\Delta t_{\text{изм}} \cdot T_{\Gamma}}$  – коэффициент учета потерь на ориентацию;

$\gamma_t = \varphi_{t-\Delta t_{\text{изм}}} - |\varphi_t - \pi|$  – угол ветрового потока по отношению к оси ротора ВЭУ;  $\Delta t_{\text{изм}}$  – интервал измерений ветрового режима ( $\Delta t_{\text{изм}} \leq 10 \text{ min}$ );  $T_{\Gamma}$  – скорость ориентации гондолы ВЭУ.

Процессам преобразования гидроэнергии посвящены работы Арсеньева Г.С., Бляшко Я.И., Берлина В.В., Васильева Ю.С., Виссарионова В.И., Карелина В.Я., Муравьева О.А., Малинина Н.К., Федорова М.П., и др. Моделирование работы ГЭС включающей в себя блоки моделей ГЭС, водохранилища и нижнего осуществлено решением системы уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{уравнение эксплуатационной характеристики ГЭС:} \\ [\eta_t^{\text{ГЭС}}, Q_t^{\text{ГЭС}}] = \Phi(N_t^{\text{ГЭС}}, H_t), \\ \text{уравнение статического напора:} \\ H_t = Z_t - z_t, \\ \text{уравнение нижнего бьефа:} \\ z_t = z(Q_{t-\Delta t}) + (z(Q_t) - z(Q_{t-\Delta t})) \cdot K_q + (z_{t-\Delta t} - z(Q_{t-\Delta t})) \cdot R_q, \\ \text{уравнение верхнего бьефа (колебаний уровня водохранилища):} \\ Z_t = Z(V_{t-\Delta t}, i_{\Pi}) + K_V (Z(V_t, i_{\Pi}) - Z(V_{t-\Delta t}, i_{\Pi})) + (Z_{t-\Delta t} - Z(V_{t-\Delta t}, i_{\Pi})) \cdot R_V, \\ \text{уравнение балансов объемов водохранилища:} \\ V_t = V_0 + \sum_0^t (Q_{wt} - Q_t) \cdot \Delta t, \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $Q_t = \sum \bar{Q}_t$  – расход воды через гидроузел ГЭС в момент времени  $t$ ;  
 $\bar{Q}_t = (\bar{Q}_t^{\text{га}}, \bar{Q}_t^{\text{в}}, \bar{Q}_t^{\text{пп}})$ ;  $\bar{Q}_t^{\text{га}} = (Q_1, Q_2 \dots Q_i, Q_{i+1} \dots Q_n)$  – вектор расходов воды через гидроагрегаты;  $n$  – количество гидроагрегатов на ГЭС;  $Q_i$  – расход через  $i$ -й гидроагрегат;  $\bar{Q}_t^{\text{в}} = (Q_t^{\text{дв}}, Q_t^{\text{п.в}})$  – вектор расходов через водопропускные

сооружения;  $Q_t^{д.в}$  – расход через донные водосбросы;  $Q_t^{п.в}$  – расход через поверхностные водосбросы;  $\vec{Q}_t^{пр}$  – прочие расходы через гидроузел (расходы на шлюзование, фильтрационные расходы и т.д.);  $Q_t^{гэс} = \sum_n \vec{Q}_t^{га}$  – расход ГЭС;  $\eta_t^{гэс}$  – к.п.д.;  $N_t^{гэс}$  – мощность ГЭС;  $H_t$  – статический напор на ГЭС;  $z_t$  – уровень в нижнем бьефе;  $\Delta t$  – расчетный интервал;  $T_c = \text{const}$ ;  $K_q = 1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_c}}$  и  $R_q = e^{-\frac{\Delta t}{T_c}}$  – параметры неустановившегося движения воды в нижнем бьефе ГЭС.  $Z_t$  – уровень в верхнем бьефе;  $K_v = 1 - e^{-\frac{\Delta t}{T_{vc}}}$  и  $R_v = e^{-\frac{\Delta t}{T_{vc}}}$  – параметры неустановившегося движения воды в верхнем бьефе ГЭС;  $T_{vc} = \text{const}$ ;  $V_t$  – объем водохранилища;  $V_0$  – начальный объем водохранилища;  $Q_{wt} = \sum \vec{Q}_{wt}$  – приточность воды в водохранилище.

Основные ограничения в модели ЭК:

$Z_{умо} \leq Z \leq Z_{фпу}$  – уровни воды в водохранилище,  $Q_{\min}^{гэс}(H) \leq Q^{гэс} \leq Q_{\max}^{гэс}(H)$  – расход ГЭС,  $N_{\min}^{гэс} \leq N^{гэс} \leq N_{\max}^{гэс}$  – мощность ГЭС,  $Q^{д.в} + Q^{п.в} \leq Q_{\max}^в(H, z)$  – водосбросной расход,  $z_{\min} \leq z \leq z_{\max}$  – уровни в НБ,  $H_{\min} \leq H \leq H_{\max}$  – напор на ГЭС,  $dZ/dt \leq \delta_{\max}$  – скорость изменения уровня в водохранилище, где  $\delta_{\max}$  – максимальная скорость изменения уровня в водохранилище определяемая «Правилами управления водохранилищем ГЭС»

Моделирование баланса мощности ЭК,  $N_t^{ЭК}(n, \vec{Q}_t, m, \vec{a}_t)$ , и гарантируемых на предстоящий период мощностей ГЭС,  $N_{гарт}^{гэс}$ , и ВЭС,  $N_{гарт}^{вэс}$ , осуществляется уравнением:

$$\begin{cases} N_t^{ЭК}(n, \vec{Q}_t, m, \vec{\varphi}_t) = N_t^{гэс}(n, \vec{Q}_t) + N_t^{вэс}(m, \vec{\varphi}_t) = N_{гарт}^{гэс} + N_{гарт}^{вэс}, \\ N_t^{ЭК}(n, \vec{Q}_t, m, \vec{\varphi}_t) + \Delta N_t^{ЭК} = P_t^{нагр} \end{cases}, \quad (3)$$

где  $\Delta N_t^{ЭК}$  – невязка мощности;  $P_t^{нагр}$  – мощность нагрузки потребителя.

Входящая в уравнение (3) гарантированная мощность участия ВЭС в ЭК,  $N_{\text{гар}t}^{\text{ВЭС}}$ , на предстоящие периоды  $T_j$  рассчитывается из условия баланса текущей выработки на ВЭС,  $N_t^{\text{ВЭС}}(m, \bar{\varphi}_t)$ , и, обеспеченной аккумулярованием в водохранилище ГЭС, выработки ВЭС с учетом невязки  $\Delta N_t$ ,

$$\sum_{t=0}^{T_a} N_t^{\text{ВЭС}}(m, \bar{\varphi}_t) + = \sum_{j=1}^a \sum_{t=T_{j-1}}^{T_j} (N_{\text{гар}t}^{\text{ВЭС}} + \Delta N_t), \quad (4)$$

где  $T_j \in \bar{T}$  –  $j$ -й период регулирования нагрузки  $\bar{T} = (T_1, T_2, \dots, T_{j-1}, T_j, T_{j+1}, \dots, T_a)$ ;  $a$  – количество периодов регулирования нагрузки;  $\Delta N_t$  – невязка, вследствие ошибки прогноза или невозможности обеспечить требуемый режим.

**В третьей главе** для расчета параметров и режимов работы ЭК решена задача многокритериальной оптимизации. В качестве главного критерия выбран минимум отклонений режима ЭК от нагрузки потребителя,  $\Delta E^{\text{ЭК}}$ , при соблюдении наложенных ограничений и выдаче гарантированной мощности энергокомплекса с требуемой обеспеченностью.

$$\Delta E^{\text{ЭК}} = \int_0^{T_a} \left( \left| P^{\text{нагр}}(t) - N^{\text{ЭК}}(\bar{\varphi}, \bar{Q}, n, m, t) \right| \right) dt \longrightarrow \min. \quad (5)$$

При дискретном решении уравнение (5) примет вид:

$$\Delta E^{\text{ЭК}} = \sum_{j=1}^a \sum_{i=1}^s \left( \left| P_{i,j}^{\text{нагр}} - N_{i,j}^{\text{ЭК}}(\bar{\varphi}, \bar{Q}, n, m) \right| \right) \longrightarrow \min, \quad (6)$$

где  $s$  – число интервалов времени  $\Delta t$ , внутри периода регулирования  $T_j$ .

Для реализации задачи предложен алгоритм оптимизации по принципу временной иерархии с выделением четырех уровней (рис. 3).

На первом уровне оптимизируются режимы работы ЭК по критерию минимума целевой штрафной функции  $F$ , как суммы штрафных функций по объемам сброса воды  $\Delta V_i$  и уровню к.п.д.  $\eta_i$  в каждый расчетный интервал  $i$ .

$$F_i = f_Y(\Delta V) + f_H(1 - \eta_i) \longrightarrow \min. \quad (7)$$

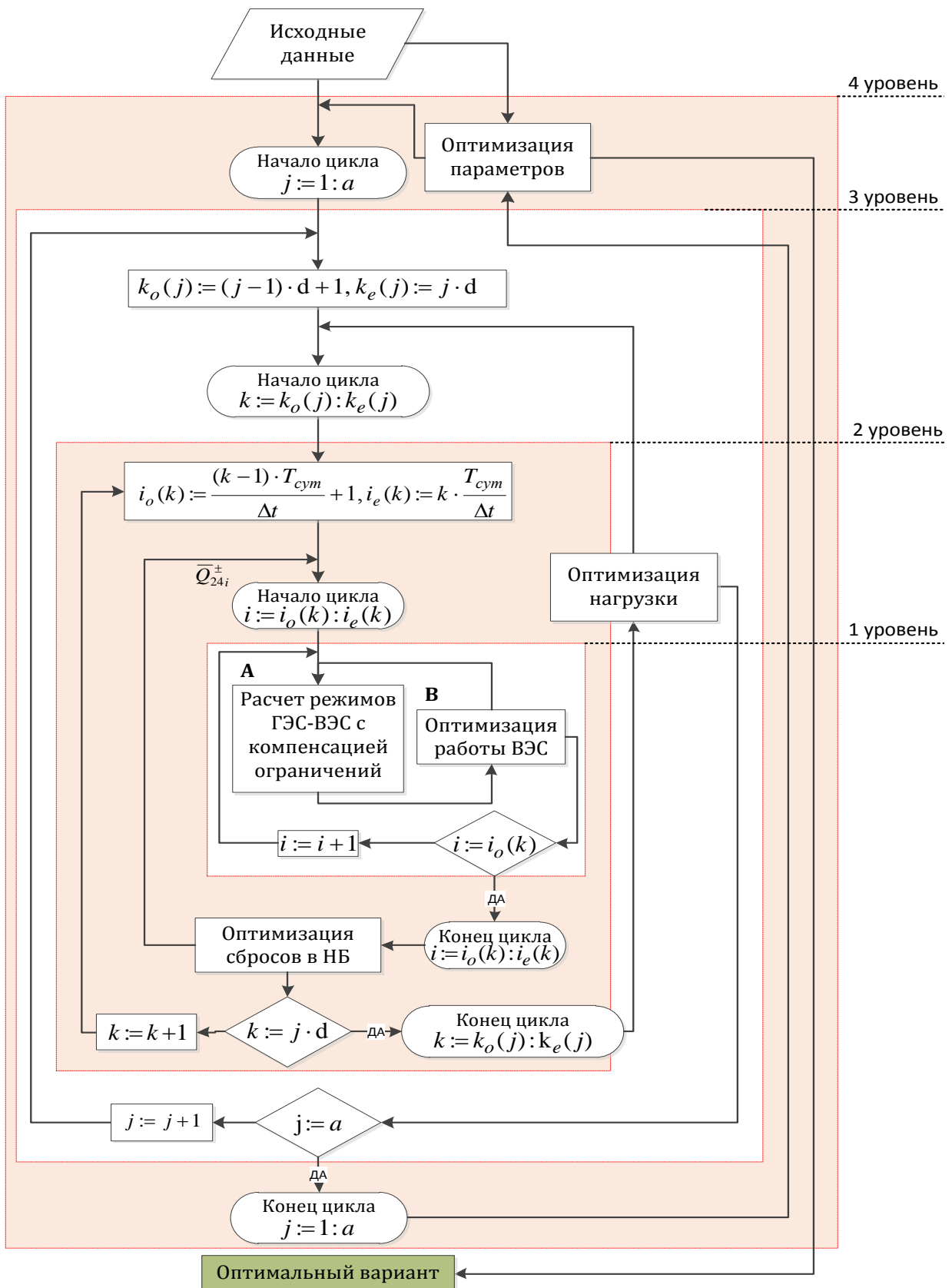


Рис. 3. Обобщенная блок-схема алгоритма оптимизации параметров и режимов работы ЭК ГЭС-ВЭС

На втором уровне оптимизируется режим работы ЭК по критерию минимума сбросов воды за  $k$ -й суточный период,  $W_k$  :

$$W_k = \sum_{i=i_o(k)}^{i_e(k)} (Q_i \cdot T_{сут}) \rightarrow \min , \quad (8)$$

где  $i_o(k)$  и  $i_e(k)$  – начальные и конечные интервалы  $i$  внутри суток  $k$ ,  $T_{сут} = 86400$  сек.

На третьем уровне оптимизируется режим работы ЭК по критерию максимума выработки энергии ЭК на предстоящие  $j$ -е периоды (сутки - месяц):

$$E_j^{\text{ЭК}} = \sum_{k=k_o(j)}^{k_e(j)} \sum_{i=i_o(k)}^{i_e(k)} (N_i^{\text{ГЭС}} + N_i^{\text{ВЭС}}) \rightarrow \max , \quad (9)$$

где  $k_o(j)$  и  $k_e(j)$  – начальные и конечные интервалы суток  $k$ .

На четвертом уровне оптимизируются параметры ЭК по главному критерию (6) за весь расчетный период  $T_a$ .

**В четвертой главе** выполнена апробация на примере предлагаемого к строительству в Волгоградской области ветропарка “Нижняя Волга” установленной мощностью до 1 ГВт, недалеко от Волжской ГЭС. Мощность ГЭС 2530 МВт, полезная емкость водохранилища 31,5 км<sup>3</sup>.

Для условий, маловодного, средневодного и многоводного годов выполнены расчеты по определению гарантированной мощности ВЭС и ее обеспеченности на предстоящие периоды – *сутки, неделю и месяц*. На рис. 4 приведен график совместной работы Волгоградского ЭК в декабре средневодного года, для установленной мощности ВЭС 500 МВт с обеспечением гарантированной мощности ВЭС «на неделю вперед».

Расчеты показали, что выработка и к.п.д. ГЭС в составе ЭК не снизились. В пределах суточных изменений мощности характер участия ЭК в графике нагрузке сохранился аналогично режимам ГЭС до включения ВЭС, при этом увеличился регулировочный диапазон работы ГЭС и число циклов регулирования мощности. Расчеты по другим периодам времен года и водности подтвердили данные тенденции.

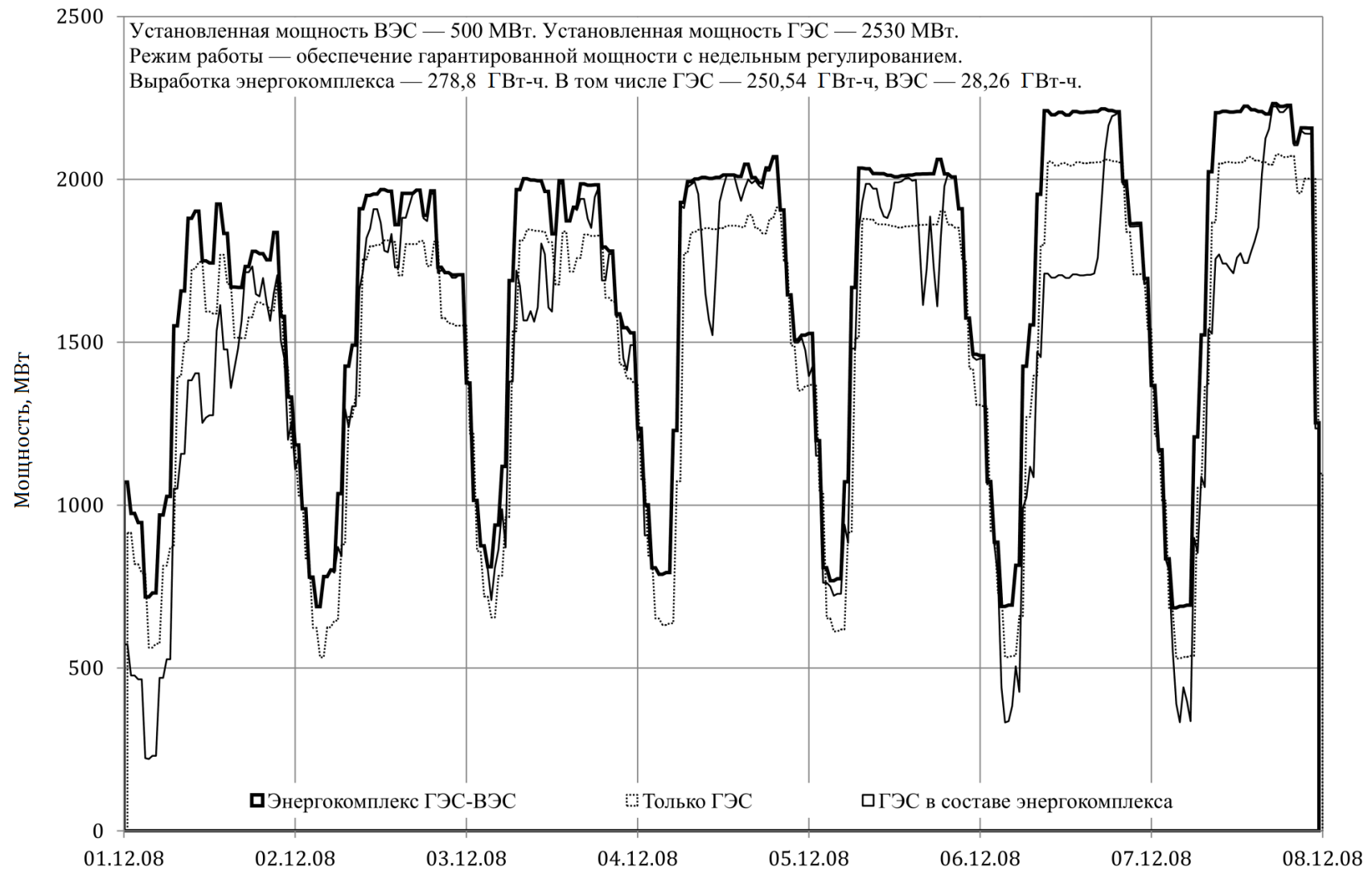


Рис. 4. Выработка Волгоградского ЭК при обеспечении гарантированной (на неделю вперед) мощности ВЭС

По результатам проведенных расчетных исследований, предложена номограмма для выбора установленной мощности ВЭС, исходя из возможностей аккумулирования энергии водохранилищем ГЭС и гарантированной мощности ВЭС с требуемой обеспеченностью (рис.5).

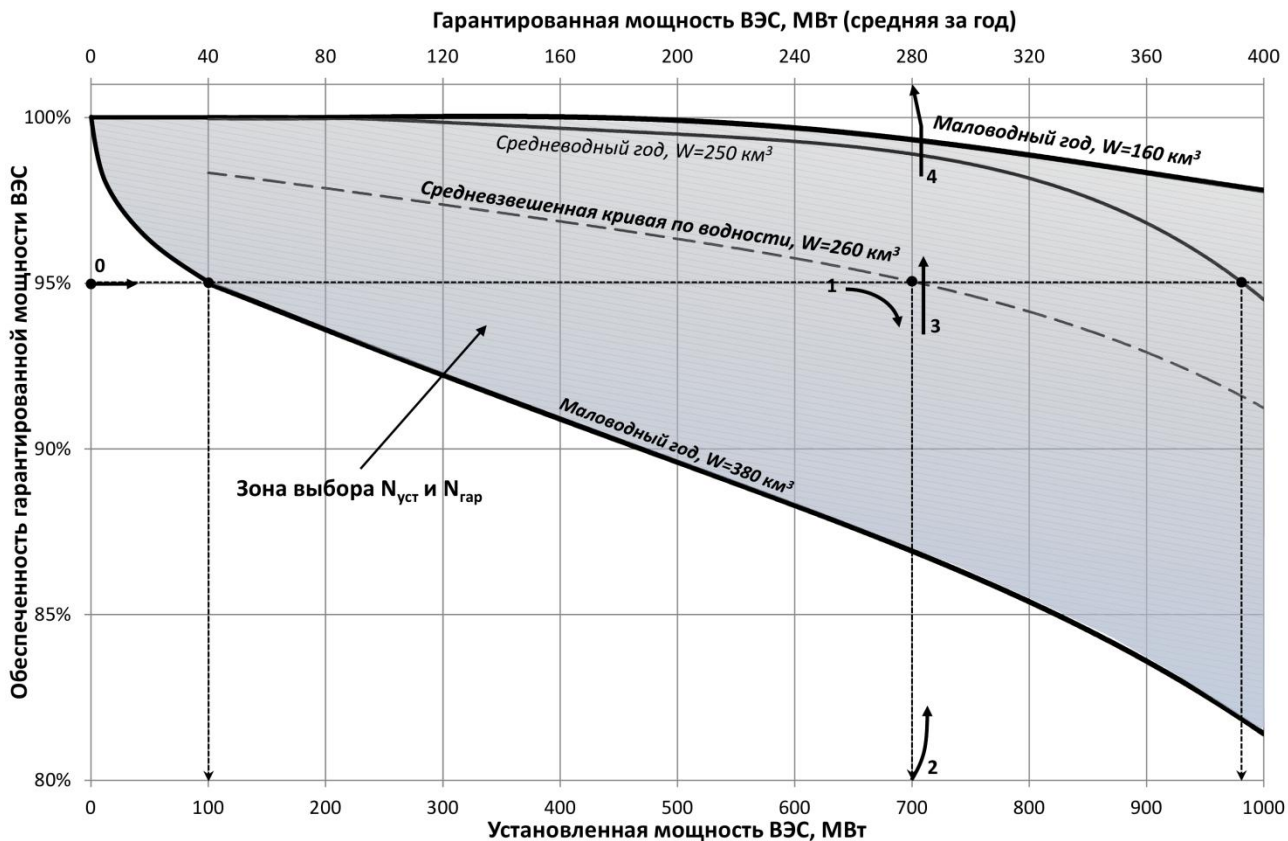


Рис. 5. График выбора установленной мощности ВЭС

На номограмме выделена зона выбора установленной мощности ВЭС и определения ее гарантированной мощности в зависимости от водности и требуемой обеспеченности. Для примера, показан алгоритм (0-1-2-3-4) определения установленной мощности ВЭС 700 МВт по кривой средневзвешенных значений водности при 95% обеспеченности гарантированной мощности ВЭС 280 МВт.

В результате работы сделаны следующие выводы и рекомендации:

1. Гарантированная мощность ВЭС с заданной обеспеченностью определяется водностью года и тем выше, чем меньше водность года.
2. Установленная мощность ВЭС, энергия которой может быть аккумулирована, зависит от энергоемкости водохранилища и тем выше, чем



больше полезный объем водохранилища.

3. При назначении установленной мощности ВЭС также следует руководствоваться наличием доступной резервной мощности ГЭС и частью полезного объема водохранилища (дублирующего объема), которая может быть использована для аккумулирования ветровой энергии.

4. Полезный объем водохранилища ГЭС в составе ЭК в большей степени влияет на вид регулирования стока, а дублирующий объем на предстоящий период регулирования ВЭС.

5. В среднем удельная энергоёмкость водохранилища на 1 МВт установленной мощности ВЭС должна быть не менее:

- 15-20 МВт-ч/1 МВт – при регулировании энергии ВЭС на месяц вперед,
- 10-11 МВт-ч/1 МВт – при регулировании энергии ВЭС на неделю вперед,
- 2-4 МВт-ч/1 МВт – при регулировании энергии ВЭС на сутки вперед.

6. Резервная мощность ГЭС для обеспечения гарантированной мощности ВЭС в составе ЭК ГЭС-ВЭС должна быть не менее:

- 17-25% от установленной мощности ВЭС (минимум),
- 35-50% от установленной мощности ВЭС (рекомендуемая).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы следующие:

1. Уточнена классификация систем аккумулирования электрической энергии в зависимости от их мощности и энергоёмкости и определено место систем с гидравлическим аккумулированием энергии.

2. Разработана специализированная методика расчета режимов работы энергокомплекса с ветровыми и гидроэнергетическими установками и обоснования оптимальных параметров ВЭС.

3. Разработана математическая модель совместной работы ГЭС-ВЭС с учетом особенностей прихода ветровой энергии, приточности и демпфирования речного стока в водохранилище и обеспечение баланса производства и потребления энергии в различные временные промежутки.

4. Разработаны алгоритмы и программный комплекс для моделирования режимов работы энергокомплекса и оптимизации параметров ВЭС с учетом общесистемных и внутростанционных ограничений и многоуровневой временной иерархии оптимизационных расчетов.

5. Предложена номограмма для определения установленной и гарантированной мощностей ВЭС в составе ЭК и сформулированы рекомендации по обоснованию параметров ВЭС и назначению режимов совместной работы энергокомплексов ГЭС-ВЭС при выполнении проектных работ.

#### СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ:

1. Конищев М.А. Разработка программного комплекса для совместной работы ВЭС-ГЭС-ГАЭС. [Текст] / М.А. Конищев, В.В. Елистратов // XXXV неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – С.142-143.

2. Конищев М.А. К вопросу об аккумулировании энергии возобновляемых источников. [Текст] / М.А. Конищев // Наука и инновации в технических университетах: Материалы Всероссийского форума студентов, аспирантов и молодых ученых. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. – С. 114-115.

3. Конищев М.А. Моделирование прихода ветровой энергии в краткосрочные периоды времени. [Текст] / М.А. Конищев, В.В. Елистратов // XXXVII неделя науки СПбГПУ: Материалы Всероссийской межвузовской научно-технической конференции студентов и аспирантов. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – Ч.1. – С. 61-62.

4. Конищев М.А. Повышение эффективности использования ВИЭ при комплексном использовании. [Текст] / В.В. Елистратов, М.А. Конищев // научный общественно-деловой журнал "Энергетическая политика". – М.: ИАЦ "Энергия", 2008. – № 3. – Возобновляемые источники энергии. – С. 47-52.

5. Конищев М.А. Комплексное использование и аккумуляция энергии возобновляемых источников. [Текст] / М.А. Конищев, В.В. Елистратов // Сборник научных трудов международной научно-практической конференции «Экономические механизмы инновационной экономики». – С-Пб.: Изд-во НОУ МИЭП, 2009. – Ч.3. – С. 25 – 31.

6. Konischev M. Hybrid system with wind and hydro power stations for autonomy case. [Text] / M. Konischev, V. Elistratov // Proceedings of the 8th Annual World Wind Energy Conference and Exhibition. – Jeju, KR, 2009. – С.110-111.

7. Konischev M. Energy storage and multiple uses of renewable energy sources. [Text] / V. Elistratov, M. Konischev // Conference proceedings. Energy efficiency and agricultural engineering. – Rousee, Bulgaria, 2009. – С. 113-115.

8. Конищев М.А. Аккумуляция энергии возобновляемых источников. [Текст] / М.А. Конищев, В.В. Елистратов // Использование возобновляемой энергии: учебное пособие. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. – С. 166-210.

9. Конищев М.А. Моделирование энергокомплекса ГЭС-ВЭС с гидравлическим аккумуляцией энергии. [Текст] / М.А. Конищев, В.В. Елистратов // Всероссийская олимпиада студентов и аспирантов вузов «Компьютерное моделирование наноструктур и возобновляемых источников энергии»: сборник работ. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С. 3-7.

10. Конищев М.А. Энергокомплекс ГЭС-ВЭС с гидравлическим аккумуляцией энергии. [Текст] / М.А. Конищев, В.В. Елистратов // Сооружение и экспертиза энергетических объектов на возобновляемых источниках энергии. Краткое содержание дипломных проектов и магистерских диссертаций. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С.112-117.

**11. Конищев М.А. Совместная работа ГЭС и ВЭС в составе энергокомплекса с гидравлическим аккумуляцией энергии. [Текст] / М.А. Конищев // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – № 3. – Наука и образование – С. 45–51.**