

Системный анализ инновационных энергетических технологий

Энергетические, энерготехнологические установки, электроэнергетические и теплоснабжающие системы – это сложные технические системы, в части элементов которых могут использоваться новые (прорывные) инновационные технологии или конструкционные материалы, а в части – традиционные.

Задача системного анализа – определить оптимальные параметры новых технологических процессов и связь между «внутренними» характеристиками этих процессов и интегральными характеристиками установок.

В основе анализа лежат методы математического моделирования и оптимизации.

Математическая формулировка задачи оптимизации параметров энергоустановки

$$\min F(X)$$

при условиях

$$G(X) \geq 0$$

$$\underline{X} \leq X \leq \overline{X}$$

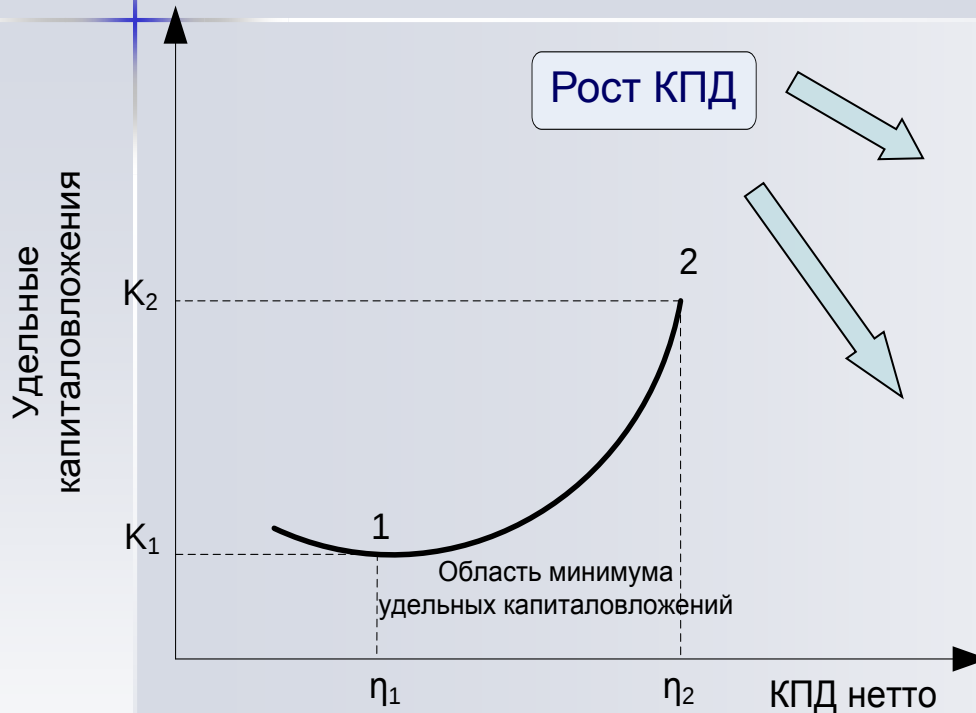
X - вектор оптимизируемых параметров (параметры термодинамического цикла и конструктивные параметры элементов),

$F(X)$ - целевая функция или критерий эффективности,

$G(X)$ - векторная функция ограничений-неравенств,

$\underline{X}, \overline{X}$ - вектора, компоненты которых задают ограничения снизу и сверху на соответствующие компоненты вектора X

Исследования перспективных угольных энергоблоков



Увеличиваются капиталовложения в:

- поверхности нагрева парового котла
- отсеки паровой турбины
- регенеративные подогреватели
- конденсаторы

Уменьшаются капиталовложения в системы:

- топливоподачи
- пылеприготовления
- золоудаления
- очистки и удаления дымовых газов

Зависимость оптимальных удельных капиталовложений в энергоблок от КПД нетто.

**1-точка минимума удельных капиталовложений,
2-точка максимума КПД нетто**

Задача максимизации внутренней нормы возврата капитальных вложений при заданной цене энергоносителей

$$\max_x IRR(C_j, x, s),$$

при условиях

$$G(x, s) \geq 0.$$

Задача минимизации цены электроэнергии при заданной внутренней норме возврата капитальных вложений

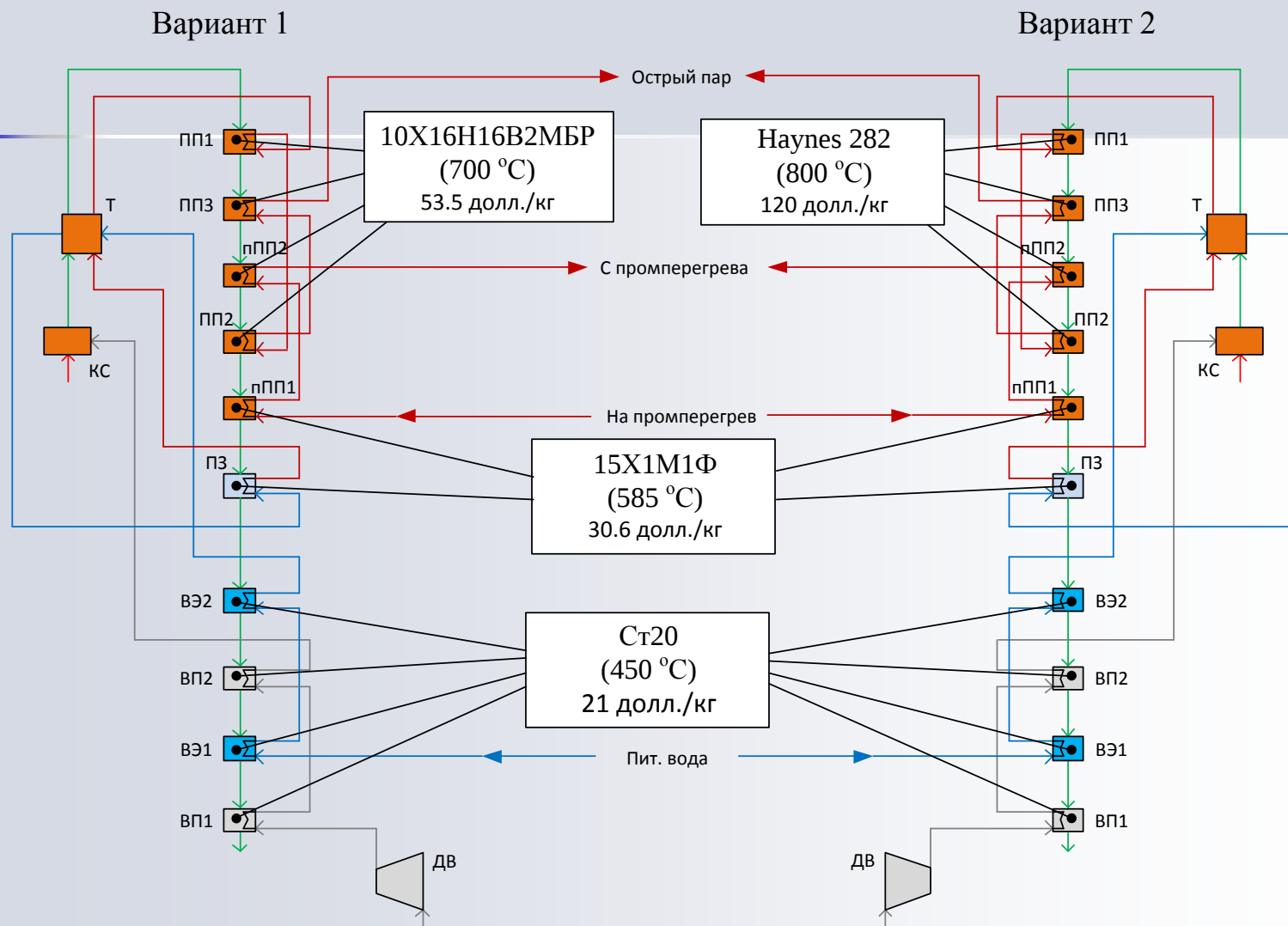
$$\min_x C_j(IRR, x, s),$$

при условиях

$$G(x, s) \geq 0.$$

$$IRR = IRR_Z$$

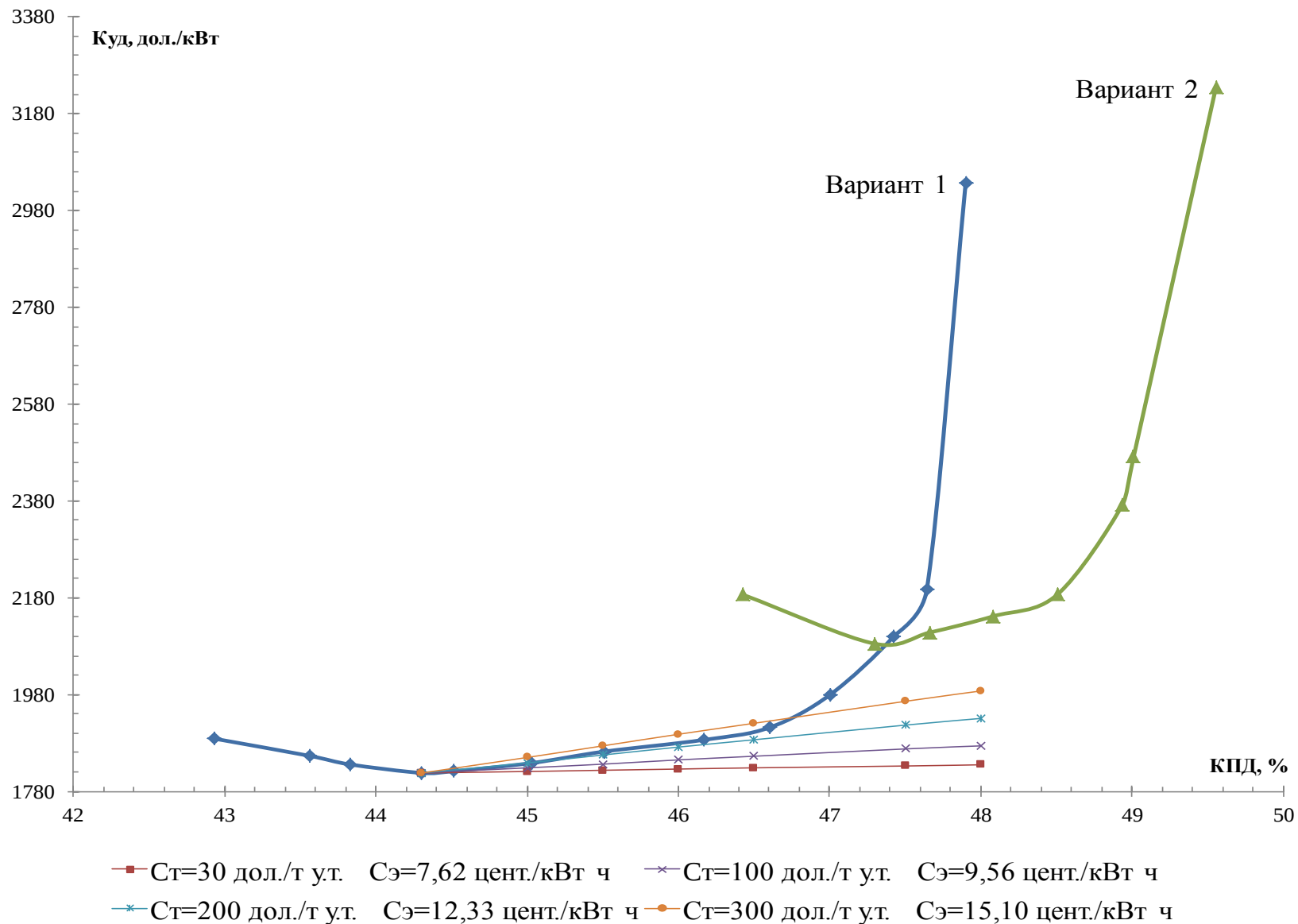
Варианты использования сплавов в котле



Исходная технико-экономическая информация

Показатель	Значение	$t_{\text{lim}}, ^\circ\text{C}$
Удельная стоимость сплава, дол./кг	—	—
-Haynes 282	120	800
-10X16H16B2МБР	53,5	700
-15X1М1Ф	30,6	585
-Ст20	21	450

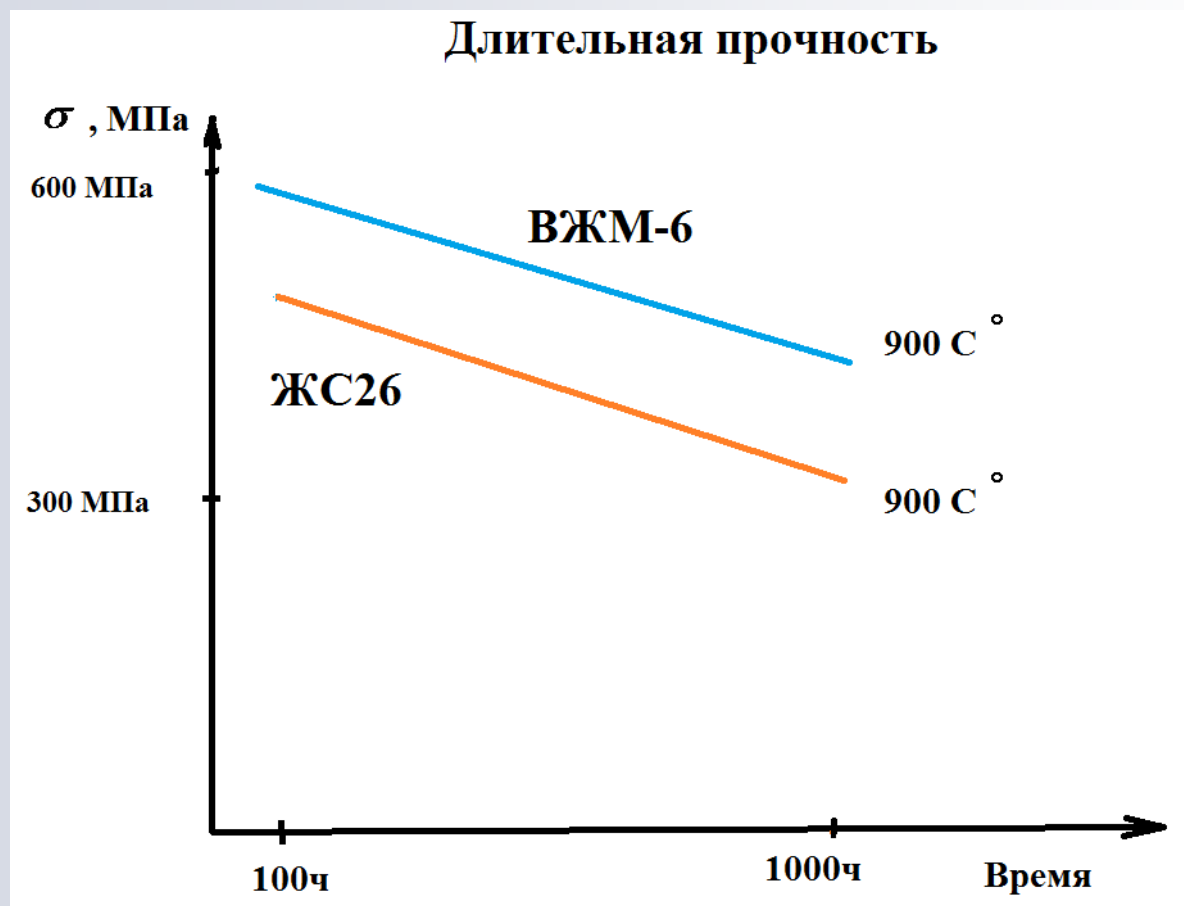
Линии равной экономической эффективности



Влияние выбора лопаточных сплавов на эффективность проектируемых энергоустановок

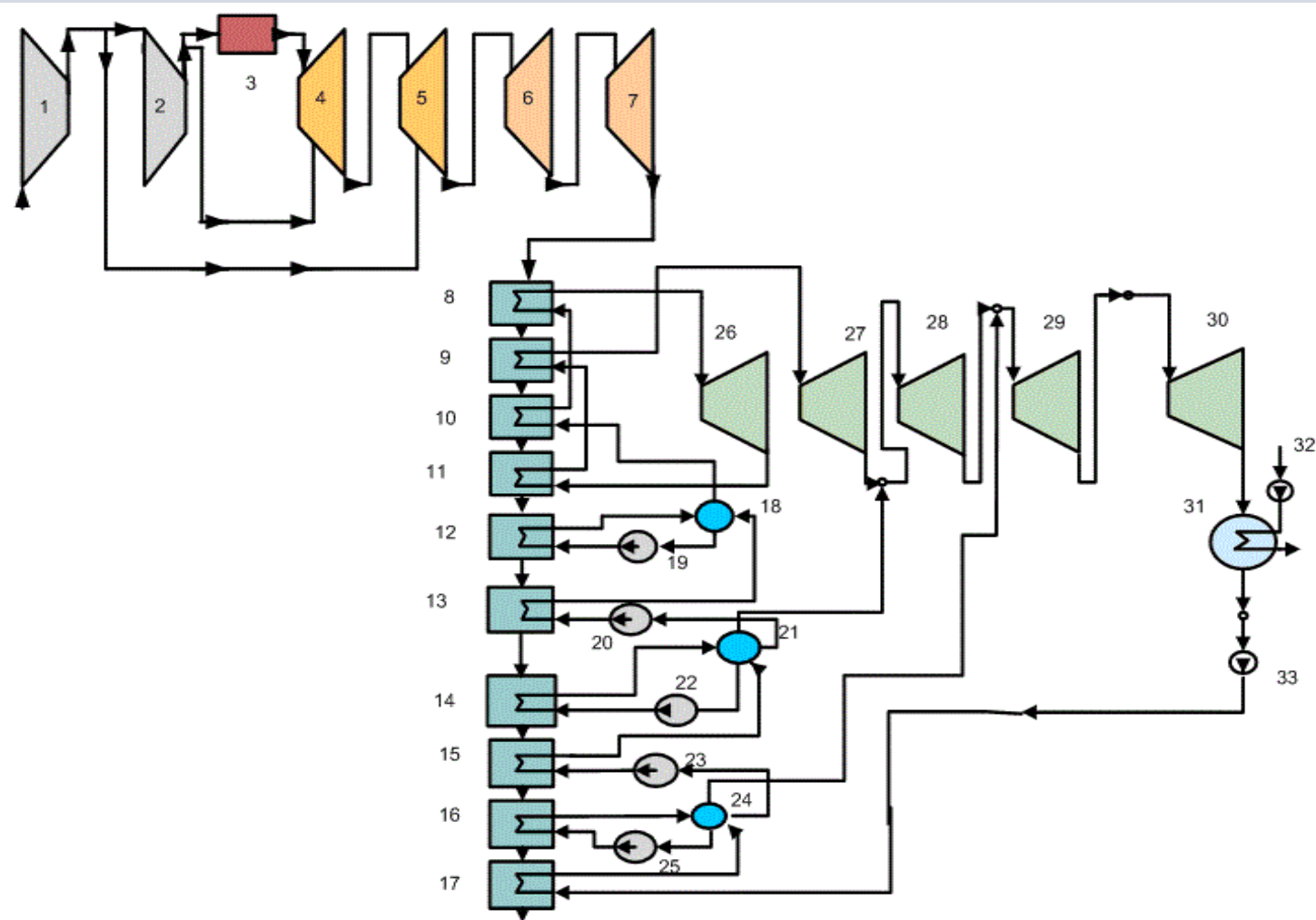
Технические характеристики рассматриваемых сплавов

Сплав	Предельная рабочая температура
ВЖМ-6	1150
ЖС26	1050



Влияние выбора лопаточных сплавов на эффективность проектируемых энергоустановок

Схема установки ПГУ для двух вариантов используемых в газовой турбине сплавов



Влияние выбора лопаточных сплавов на эффективность проектируемых энергоустановок

Достигнутые значения максимального КПД и минимально-возможных удельных капиталовложений

Параметр	Сплав	ПГУ	ГТУ
КПД	ЖС26	61,4	41,3
	ВЖМ-6	63	42,2
Удельные капиталовложения дол./кВт	ЖС26	1648	882
	ВЖМ-6	1531	822

Влияние выбора лопаточных сплавов на эффективность проектируемых энергоустановок

Достигнутые значения цены электроэнергии при разной цене топлива

Цена топлива (долл. за т.у.т)	Сплав	ПГУ (цена электр. Цент/кВт*ч)	ГТУ (цена электр. Цент/кВт*ч)
100	ЖС26	11,2	14,4
200		9,1	11,3
300		6,7	8,1
100	ВЖМ-6	10,9	14
200		9	10,9
300		6,5	7,8

Влияние выбора лопаточных сплавов на эффективность проектируемых энергоустановок

Годовой экономический эффект для ГТУ 300 МВт и ПГУ 500 МВт при переходе со сплава ЖС26 на сплав ВЖМ-6

Показатель	ГТУ	ПГУ
Экономический эффект за год	6 млн. \$	7,5 млн. \$

Годовая экономия топлива для ГТУ 170 МВт и ПГУ 250 МВт при переходе со сплава ЖС26 на сплав ВЖМ-6

Показатель	ГТУ	ПГУ
Экономия тонн условного топлива в год	5300	9600

Постановка задачи оптимизации параметров теплоэнергетической установки с учетом переменных режимов функционирования

$$\min C_{мен}$$

при условиях

$$S_K = F(x_K, N_K^{KC}, \gamma_K),$$

$$B_K^{KC} = f_K^{KC}(x_K, N_K, \gamma_K),$$

$$B_K^{BK} = f_K^{BK}(x_K, N_K, \gamma_K),$$

$$G_K(x_K, B_K^{KC}, B_K^{BK}, \gamma_K) \geq 0,$$

$$\underline{x_K} \leq x_K \leq \overline{x_K},$$

$$G_i(x_i, x_K, N_i, B_K^{BK}, \gamma_i) \geq 0,$$

$$B_i^{KC} = f_i^{KC}(x_i, S_i, N_i, \gamma_i),$$

$$B_i^{BK} = f_i^{BK}(x_i, S_i, N_i, \gamma_i),$$

$$\underline{x_i} \leq x_i \leq \overline{x_i},$$

$$i = 1, \dots, N,$$

$$K_{мэс} = \theta(S_K, d_{y\partial}),$$

$$B_{20\partial} = (B_K^{KC} + B_K^{BK}) \cdot T_K + \sum_{i=1}^N (B_i^{KC} + B_K^{BK}) \cdot T_i,$$

$$Q_K = q_K(x_K, \gamma_K),$$

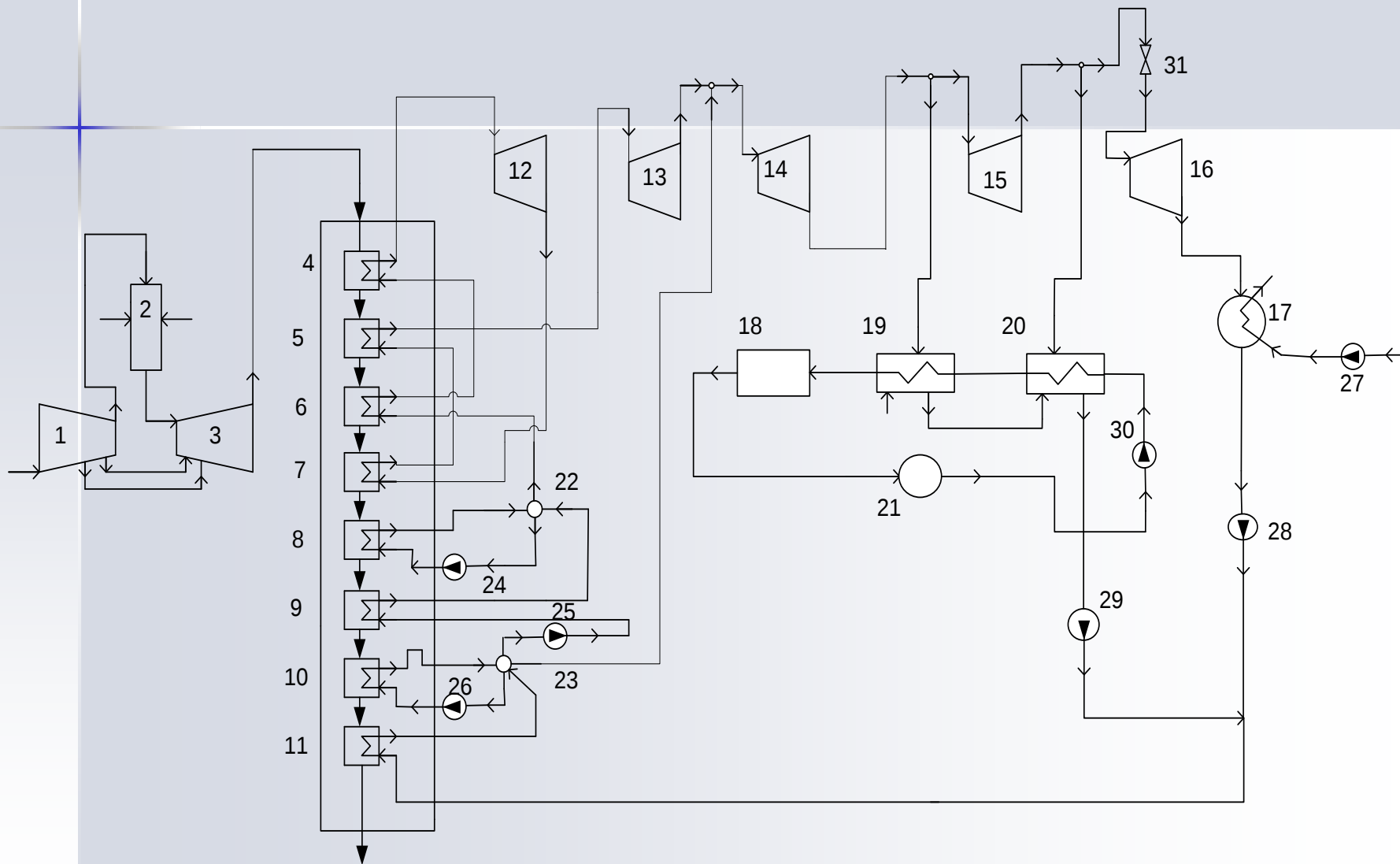
$$Q_i = q_i(x_K, x_i, \gamma_i),$$

$$Q_{20\partial} = Q_K \cdot T_K + \sum_{i=1}^N Q_i \cdot T_i,$$

$$\mathcal{Q}_{20\partial} = N_K \cdot T_K + \sum_{i=1}^N N_i \cdot T_i,$$

$$IRR(B_{20\partial}, Q_{20\partial}, \mathcal{Q}_{20\partial}, C_{мен}, C_{эл}, K_{мэс}, F) = IRR_z$$

Расчётная схема теплофикационной ПГУ



Показатели ПГУ, полученные в результате согласованной оптимизации

Показатель, размерность	Варианты ПГУ		
	B min	C min	K min
Расчётная тепловая нагрузка, ГДж/ч	680,7	1465,8	1452,0
Годовой отпуск тепла, тыс. ГДж	2232,4	4811,4	4765,0
Годовой отпуск электроэнергии, млн. кВт ч	2180,1	2290,1	2249,3
Капиталовложения в установку, млн. дол.	326,1	308,2	299,4
Цена тепловой энергии, дол./ГДж	8,0	4,44	4,87
Температура продуктов сгорания перед ГТ, °С	1300	1300	1300
Температура уходящих газов котла-утилизатора, °С	122,0	142,0	157,0
Расход топлива в камеру сгорания, кг у.т./с	19,1	20,7	20,8
Расход топлива на водогрейные котлы, кг у.т./с	3,8	8,4	8,3
Полезная мощность установки, МВт	311,8	331,0	325,5
Мощность ГТУ, МВт	232,3	250,0	250,0
Мощность ПТУ, МВт	70,6	59,8	54,5
Тепловая нагрузка водогрейных котлов, ГДж/ч	368,4	814,7	805,5
Коэффициент теплофикации	0,456	0,441	0,443
Доля тепла, отпускаемого от водогрейных котлов	0,07	0,35	0,46

УЧЕТ НАДЕЖНОСТИ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ КОМПЛЕКСНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ И НАКОПИТЕЛИ ЭНЕРГИИ

- **Учёт показателей надёжности проводится на основе хронологического моделирования**
- **Расчеты работы ДСЭС проводятся на протяжении всего цикла эксплуатации (175200 часов – 20 лет)**
- **Для каждой итерации формируется массив параметров окружающей среды, с использованием датчика случайных чисел работающего в рамках числа лет метеонаблюдений с шагом 8760 часов**
- **Учитываются выводы основного оборудования в плановые ремонты и технические обслуживания**
- **С использованием датчика случайных чисел определяются аварийные отказы всех элементов ДСЭС, с последующим выводом в аварийный ремонт и простоем на время его устранения**
- **Определяется недоотпуск электроэнергии**

Задача оптимизации переходного процесса энергетической установки

$$b_{y\partial} \rightarrow \min$$

(1)

$$H(u(t), y(t), z(t)) = 0$$

(2)

$$G(u(t), y(t), z(t)) \geq 0$$

(3)

$$z'(t) = \varphi(u(t), y(t), z(t))$$

(4)

$$u^{\min} \leq u \leq u^{\max}$$

(5)

$$u'_{\min} \leq u' \leq u'_{\max}$$

(6)

$$y'_{\min} \leq y' \leq y'_{\max} \quad (7)$$

$$z'_{\min} \leq z' \leq z'_{\max} \quad (8)$$

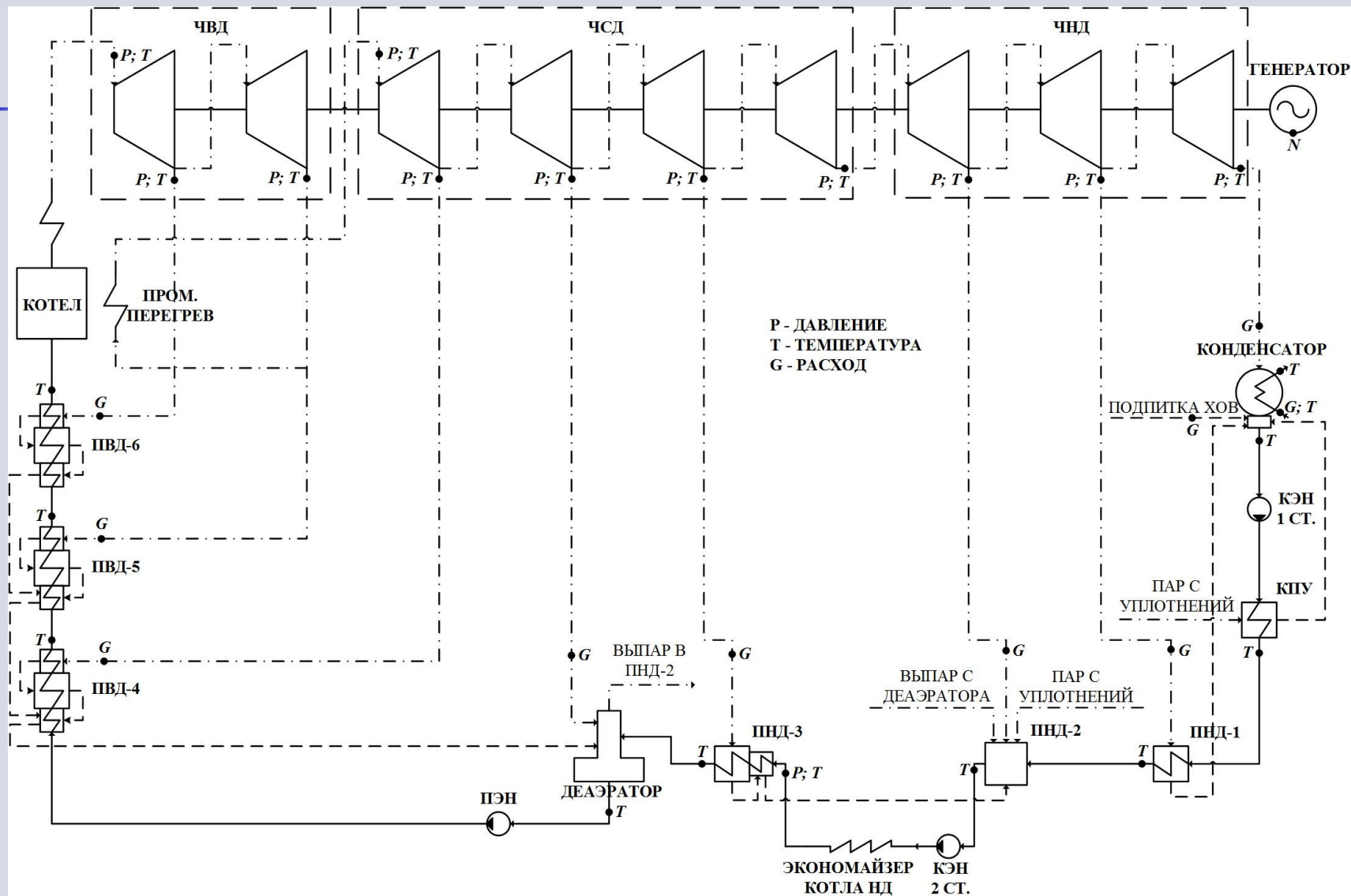
$$-\varepsilon \leq z'(t_s) \leq \varepsilon \quad (9)$$

$$z_p^{\min} \leq z_p(t_s) \leq z_p^{\max}, \quad p \in D \quad (10)$$

$$y_h^{\min} \leq y_h(t_s) \leq y_h^{\max}, \quad h \in V \quad (11)$$

$$z(t_0) = z^0 \quad (12)$$

Точки замеров параметров на турбине К-225-130 3-го энергоблока Харанорской ГРЭС



*Программа III.17.1. «Системный анализ
инновационных энергетических технологий»
Координатор программы: д.т.н., проф. А.М.Клер*

➤ **Научный проект III.17.1.1 «Системный анализ влияния показателей технологических процессов и конструкционных материалов на характеристики перспективных энергетических установок »**

Руководитель проекта: д.т.н., проф. А.М.Клер (зав.лаб.71)

➤ **Научный проект III.17.1.2 «Моделирование процессов термохимической конверсии топлива в энергетических установках для системного сопоставления перспективных технологий»**

Руководитель проекта: к.х.н. В.А.Шаманский (зав.лаб.72)

➤ **Научный проект III.17.1.3 «Исследование переходных процессов в энергоустановках при фазовых превращениях в теплоносителе методами физического эксперимента и математического моделирования »**

Руководитель проекта: к.т.н. А.А.Левин (зав.лаб.73)

➤ **Научный проект III.17.1.4 «Развитие методов интеллектуального научно-технологического прогнозирования в энергетике »**

Руководитель проекта: к.т.н. А.В.Михеев (учёный секретарь)

Спасибо за внимание!

Системный анализ влияния показателей технологических процессов и конструкционных материалов на характеристики перспективных энергетических установок

Объект

Перспективные энергетические установки, критически важные технологические процессы

Научная новизна

Математическое моделирование энергетических установок с детальным описанием **критически важных технологических процессов и свойств** конструкционных материалов.

Разработка методики системного анализа энергетических установок, основанного на решении оригинальных прямой и обратной оптимизационной задач (зависимость между показателями технологического процесса и характеристиками установок и оценка предельной стоимости элементов технологической схемы, в которых протекают критически важные технологические процессы, обеспечивающей конкурентоспособность энергетической установки).

Системный анализ широкого спектра энергетических и энерготехнологических установок, **базирующийся на предлагаемой методике.**

Системный анализ влияния показателей технологических процессов и конструкционных материалов на характеристики перспективных энергетических установок

Предполагаемые основные результаты

Методика системного анализа энергетических установок.

Результаты системного анализа для достаточно широкого набора перспективных энергетических и энерготехнологических установок с определением предельных стоимостей: элементов, реализующих критические важные технологические процессы; конструкционных материалов.

Возможные области применения

Планирование развития инновационных энергетических технологий.

Предпроектные разработки перспективных энергетических установок.

Моделирование процессов термохимической конверсии топлива в энергетических установках для системного сопоставления перспективных технологий

Объект

Источники распределенной генерации энергии на основе установок с термохимической конверсией твердого топлива

Научная новизна

Математическое моделирование и оптимизация топливных процессов

в энергетических установках, отличающиеся детальным учетом кинетического механизма термохимической конверсии топлива и применением перспективных режимов горения (фильтрационного, детонационного и др.).

Разработка математических моделей энергосистем, содержащих одновременно газогенераторные электростанции с термохимической конверсией твердого топлива и возобновляемые источники энергии разных типов, в том числе, работающие в стохастических режимах, аккумуляторы электроэнергии и накопители вторичных энергоносителей.

Исследование влияния внешних факторов, ранжирование технологий конверсии твердого топлива по их экономической и экологической эффективности и оценка влияния регулирования рынка электро- и теплоэнергии на стоимость энергии и цены.

Моделирование процессов термохимической конверсии топлива в энергетических установках для системного сопоставления перспективных технологий

Предполагаемые основные результаты

Модели физико-химических процессов конверсии с учетом

детального кинетического механизма разложения и окисления твердого топлива применительно к системному сопоставлению эффективности технологических процессов при его энергетической переработке.

Математические модели энергосистем, включающих газогенераторные электростанции с термохимической конверсией твердого топлива, а также энергоисточники других типов и аккумуляторы электроэнергии и вторичных энергоносителей.

Результаты сопоставления различных вариантов конверсии по эффективности в зависимости от внешних факторов в рыночных условиях.

Возможные области применения

Создание эффективных энергетических установок для распределенной генерации энергии на основе твердого топлива, в том числе низкосортного. Возможность использования оценок эффективности рынка электроэнергии при разных вариантах его организации в области внедрения источников распределенной генерации энергии и возобновляемых источников энергии.

Исследование переходных процессов в энергоустановках при фазовых превращениях в теплоносителе методами физического эксперимента и математического моделирования

Цель проекта

Решение фундаментальных задач :

- экспериментального изучения и теоретического описания закономерностей термогидравлических процессов при нестационарном тепловыделении в нагревателе, охлаждаемом недогретой жидкостью;
- разработки методики математического моделирования и программной реализации с использованием компонентного представления в вычислительной среде моделей теплоэнергетических установок применительно к решению задач в реальном масштабе времени

Задачи исследования

Построение и интегрирование в общую математическую модель энергоблока **отдельных элементов оборудования в виде моделей с распределенными параметрами.**

Получение карты режимных условий возникновения автоколебательных пульсаций в условиях высокоинтенсивного теплообмена.

Построение предсказательных моделей по результатам экспериментального исследования

Исследование переходных процессов в энергоустановках при фазовых превращениях в теплоносителе методами физического эксперимента и математического моделирования

Основные ожидаемые результаты

Разработка и интегрирование в существующий программный комплекс компонентов математической модели, основанных на пространственно- распределенном описании элементов оборудования ТЭС.

Реализация модели системы автоматического управления энергоблока ТЭС.

Получение и обобщение новых экспериментальных данных по протеканию нестационарного кризиса теплоотдачи в условиях распространения в канале импульсов давления высокой амплитуды.

Получение расчетных зависимостей и карты режимных условий возникновения автоколебательных пульсаций, связанных с высокоинтенсивными теплообменными процессами на поверхности технических нагревателей.

Развитие методов интеллектуального научно-технологического прогнозирования в энергетике

Объект

Технологии энергетики и влияющие на них технологии смежных областей знания

Научная новизна

Интеграция научной обоснованности методологии системного анализа развития энергетических технологий **и новых возможностей интеллектуальных информационных технологий:** семантических технологий, методов информационного поиска, интеллектуального анализа, когнитивной визуализации и других.

Разработка методов количественной оценки инновационного потенциала технологий и возможных инфраструктурных и социально-экономических эффектов от их внедрения.

Возможные области применения

Результаты работы будут востребованы федеральными и региональными органами управления, ведущими компаниями энергетического сектора.

Развитие методов интеллектуального научно-технологического прогнозирования в энергетике

Основные ожидаемые результаты

Создание интеллектуальной информационно-вычислительной системы (ИИВС) научно-технологического прогнозирования и поддержки принятия решений по инновационному развитию энергетики.

Важным прикладным результатом будет способность с помощью современных методов визуализации автоматически формировать актуальную адаптивную картину вероятного технологического будущего энергетики на основе ведущихся в мире научно-исследовательских разработок.