

## **Повышение эффективности и надежности энергоснабжения на базе развития водородной инфраструктуры.**

### **Введение**

Реализация национальных программ развития водородной энергетики большинства развитых стран происходит все возрастающими темпами. Технологической основой производственной базы водородного топливного цикла и перехода к водородной экономике большинством специалистов прогнозируются атомные электростанции (АЭС) с использованием высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов (ВТГР) / 1 /. Их создание и начало промышленного использования планируются в 2015 – 2020 гг.

В число стратегических задач на период перехода к водородной экономике входит создание основных элементов распределительной и потребительской водородной инфраструктуры, опытно – промышленных водородных энергетических комплексов, работающих в составе традиционных систем энергоснабжения. Такие комплексы могут быть сформированы, например, в распределенных системах генерации электрической и тепловой энергии / 2 /, обеспечивая увеличение надежности, поддержание оперативных технологических резервов мощности, регулирование нагрузочных режимов.

Для обеспечения необходимого уровня загрузки одного опытно - промышленного энергоблока ВТГР – АЭС средней мощности, предназначенного для одновременного производства электроэнергии и водорода, параллельно его строительству должна быть создана инфраструктура с потреблением 100 – 500 тыс. тонн водорода в год.

Включение в состав территориальной водородной инфраструктуры средств распределенной генерации электрической и тепловой энергии, регулируемых нагрузочных мощностей и накопителей водорода позволит расширить возможности системы энергоснабжения в части регулирования режимов и резервирования.

Основным источником инвестиций в создание территориальных водородных энергетических комплексов (ТВЭК) должны стать средства федеральной целевой программы развития водородной энергетики. Такая программа, несомненно, должна быть сформирована в России, как в большинстве развитых стран мира. В качестве дополнительных источников инвестиций могут быть использованы средства на покрытие следующих затрат:

- поддержание резервов мощности,
- обеспечение гарантированного энергоснабжения,
- регулирование режимов в распределительной сети,
- инвестиции в проекты по замещению природного газа в топливном балансе,
- инвестиции в развитие возобновляемых источников энергии,
- компенсации за сокращение выбросов парниковых газов.

В статье рассмотрены варианты использования в электросистемах регулирующей энергетической установки (РЭУ) на базе электрохимического генератора (ЭХГ) с твердополимерными топливными элементами (ТЭ) с накопителем водорода и электролизером. Последний используется не только как источник водорода, но и как регулируемая электрическая нагрузка в распределенной системе электроснабжения. ЭХГ и электролизер являются источниками тепла в распределенной системе горячего водоснабжения (ГВС).



1). 5 кВт. установка с ТЭ  
Idemitsu Kosan (Япония)



2). 10 кВт. установка с  
ТЭ, разрабатываемая  
ФГУП «ЦНИИ СЭТ»

**Рисунок 1. Современные энергоустановки на топливных элементах с конвертером природного газа**

### 1. Регулирование режимов в распределительных электрических сетях систем коммунального и промышленного электроснабжения.

Технико-экономические характеристики инвестиционных проектов по строительству объектов энергоснабжения в очень большой степени зависят от режимов потребления, требований к надежности и связанных с ними ограничений.

При создании объектов распределенных систем энергоснабжения источники энергии максимальным образом приближаются к потребителям, что приводит к сокращению затрат на транспортировку, увеличению доли производителя энергоресурсов в общем объеме выручки от реализации энергии, однако это требует дополнительных затрат на создание системных и локальных средств регулирования режимов производства – потребления энергии, оперативных технологических резервов.

В ходе нового строительства и реконструкции территорий комплексной застройки российских мегаполисов в первую очередь развиваются следующие группы энергопотребителей, относящихся к 1 и 2 категориям надежности электроснабжения и имеющих существенно неравномерные режимы потребления:

- жилые комплексы с объектами социальной инфраструктуры,
- офисные, торгово-развлекательные и спортивные центры,
- малые промышленные предприятия с односменным режимом работы.

Параметры присоединенной нагрузки (мощности) этих потребителей  $N_{(1-5)}$ , а именно потребляемые мощности в периоды суточных максимумов и минимумов,  $N_1$  - утреннего,  $N_2$  - первого дневного,  $N_3$  - второго дневного,  $N_4$  - вечернего максимумов,  $N_5$  - ночного минимума, соотносятся с их установленной мощностью  $N_{уст.}$  в соответствии со следующим соотношением:

$$N_{(1-5)} = N_{уст.} \times K_{одн} \times K_{экспл} \times K_{(1-5)} \times K_{нед} \times K_{сез}, \quad (1)$$

где  $K_{одн}$  - коэффициент одновременности включения,  $K_{экспл}$  - коэффициент эксплуатационной готовности,  $K_{(1-5)}$ , соответственно, -  $K_1, K_2, K_3, K_4, K_5$ , - коэффициенты участия в суточных максимумах (минимумах), - утреннем, первом и втором дневных, вечернем максимумах, ночном минимуме,  $K_{нед}$  - коэффициент неравномерности в недельном цикле,  $K_{сез}$  - коэффициент неравномерности в годовом цикле. Значения упомянутых коэффициентов подробно представлены в /3 /.

Для типового 9-этажного жилого здания общей площадью около 16000 м<sup>2</sup>:

$K_1 = 0,6 - 0,7$ ,  $K_2 = 0,4 - 0,5$ ,  $K_3 = 0,5 - 0,6$ ,  $K_4 = 0,9 - 1,0$ ,  $K_5 = 0,10 - 0,15$ ,

$K_{одн} = 0,09 - 0,12$ ;  $K_{эспл} = 0,80 - 0,95$ ,  $K_{нед} = 0,8 - 1,0$ , - в зависимости от дня недели,  
 $K_{сез} = 0,6 - 1,0$ , - в зависимости от месяца.

Из (1) следует, что отношение суточного минимума к суточному максимуму для жилого здания может достигать 0,05 – 0,10, а соотношение между летним ночным минимумом  $N_5$  и зимним вечерним максимумом  $N_4$ , - 0,02 – 0,04. При таких нагрузочных режимах использование многих современных энергоагрегатов неэффективно или невозможно.

Коэффициенты использования установленной мощности (КИУМ), в данном случае, - разрешенной нагрузочной мощности потребителя - в годовом цикле объектов электроснабжения микрорайона из 15 упомянутых типовых жилых зданий составляют:

- присоединенной нагрузки ( к питающей ЛЭП-10 КВ ) – 0,30 - 0,35,

- установленной мощности распределительных подстанций 10/0,4 КВ – 0,15 - 0,20.

При прогнозируемом на период до 2015 года уровне тарифов достаточный уровень рентабельности инвестиций в строительство объектов электроснабжения достигается при КИУМ генерирующих мощностей не менее 0,60. Почти двукратная разница в потребном и фактическом уровнях КИУМ генерирующих и нагрузочных мощностей делает рентабельность инвестиций в создание источников энергоснабжения коммунальных потребителей крайне низкой.

Основная цель включения РЭУ в распределенные системы энергоснабжения – увеличение КИУМ с 0,30 – 0,35 до 0,60 и более, что соответствует срокам окупаемости инвестиций в создание электростанций и объектов электроснабжения 8 – 10 лет.

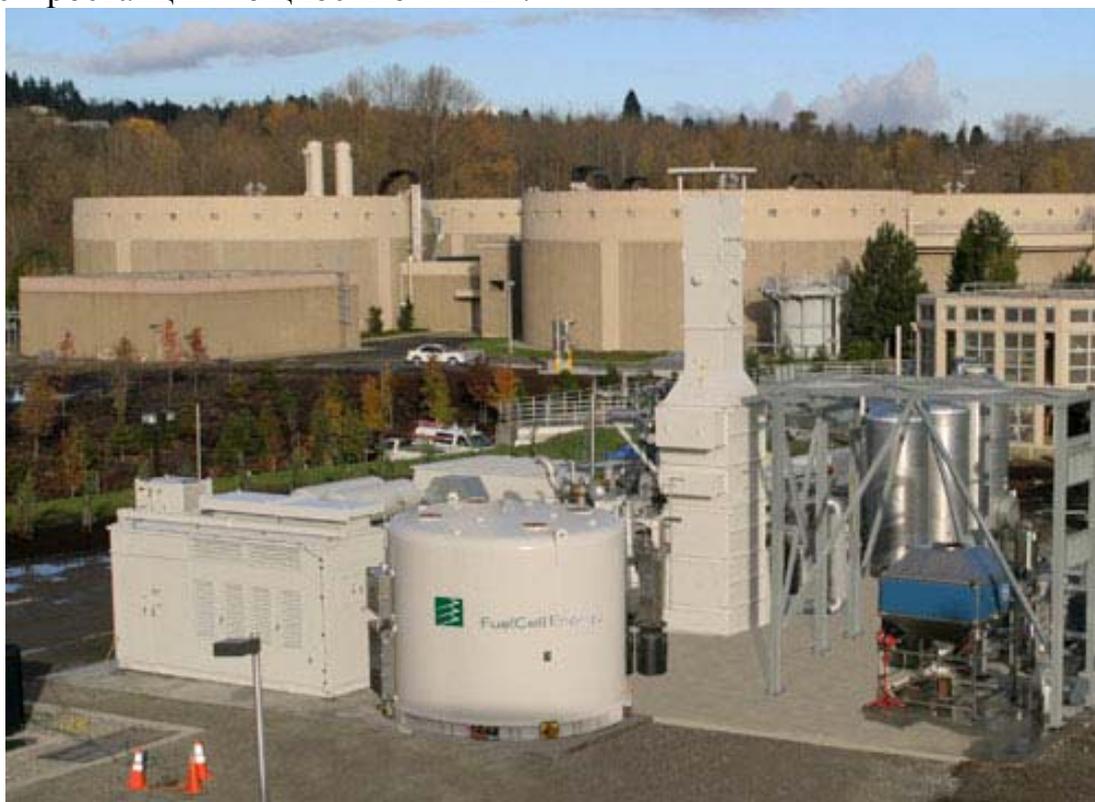
Согласно предварительным оценкам, основные технические характеристики РЭУ, предназначенных для выравнивания суточных нагрузочных режимов и резервного энергоснабжения упомянутого микрорайона в условиях зимнего максимума, и обеспечивающих значение КИУМ внешнего источника электроснабжения не менее 0,6, должны соответствовать следующим требованиям (таблица 1).

**Таблица 1. Основные технические требования к РЭУ, предназначенной для выравнивания суточных нагрузочных режимов и резервного энергоснабжения микрорайона на 10 тысяч жителей.**

Параметр	Размерность	Требование
Генерирующая мощность (ГМ)	МВт	Не менее 3,0
Диапазон регулирования ГМ	%	0 - 100
Нагрузочная мощность (НМ)	МВт	Не менее 0,5
Диапазон регулирования НМ	%	0 - 100
Эффективная емкость накопителя энергии (количество энергии, выдаваемой потребителю)	кВт.ч	Не менее 15 000
Эффективный КПД аккумуляционного цикла		Не менее 0,60 – с учетом тепловой энергии, Не менее 0,25 – по электрической энергии
Время набора 50 и 100% ГМ	секунд	Соответственно 0,2 и 0,3
Время замещения основного источника в режиме системы гарантированного электроснабжения	секунд	Не более 0,1
Время приема 50 и 100% НМ	секунд	Соответственно 0,2 и 0,3

Рабочее напряжение по соединению с внешними источниками и потребителями	КВ	Варианты: 20, 10, 6
Габариты для отдельных блоков	М х м х м	В пределах транспортных габаритов 1СС: 6,058 (длина) х 2,438 (высота) х 2,591 (ширина)
Масса	тонн	Не более 12 тонн
Пожаровзрывобезопасность сооружения	Класс	Не ниже В 11-а
Степень защиты электрооборудования по ГОСТ 1424-80	Класс	Не ниже 1Р54
Автоматизация		Полная
Ресурс, - назначенный, - межремонтный, - межрегламентный	Часов	200 000 40 000 10 000

По большинству технических характеристик разрабатываемая, в настоящее время, ФГУП «ЦНИИ СЭТ» энергоустановка с топливными элементами мощностью 10 кВт удовлетворяет требованиям для РЭУ, изложенным в таблице 1. Требуемая установленная мощность одной РЭУ может быть достигнута включением в состав РЭУ необходимого количества типовых модулей-батареи ТЭ, при этом, первоначально установленная мощность одной РЭУ может составлять 100 - 500 кВт, а для микрорайона необходимо будет формировать блоки из нескольких РЭУ. Последовательно внедряя ЭУ с ТЭ разной мощности, от 10 до 100 и более кВт, к 2010 году возможно начать выпуск энергоустановок установленной мощностью 1,0 - 5,0 МВт. Такие энергоустановки с полным циклом получения, хранения и использования водорода уже строятся за рубежом. На рисунке 2. показана электростанция мощностью 1 МВт.



**Рисунок 2. Электростанция на ТЭ в King County, Вашингтон (1 МВт)**

## 2. Варианты применения РЭУ с ЭХГ в составе действующей электросети и начало формирования территориальных водородных энергетических комплексов.

В таблице 3. представлены некоторые технико-экономические характеристики основных типов промышленных и опытно – промышленных РЭУ и аккумуляторных энергетических установок /4/.

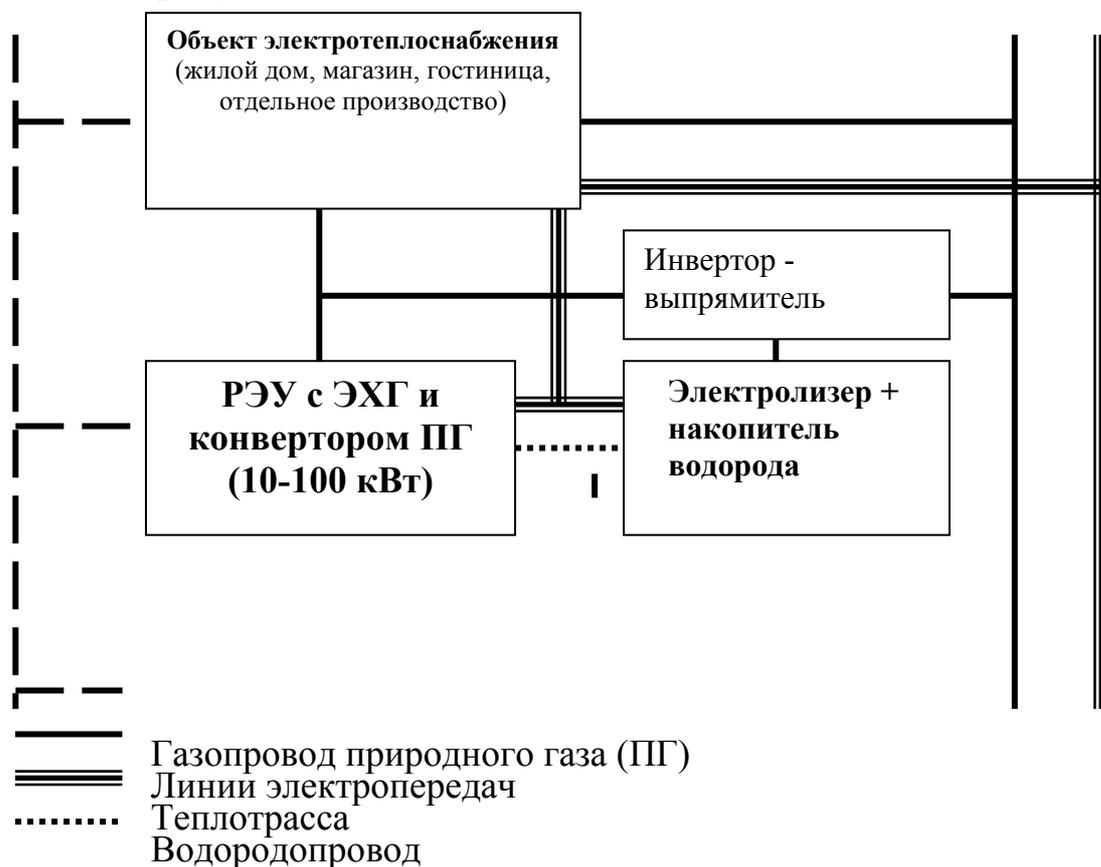
**Таблица 3. Некоторые характеристики основных типов РЭУ.**

Тип РЭУ	Эффективный КПД (коэффициент использования энергии) аккумуляторного цикла	Удельные затраты на создание накопителя электроэнергии емкостью 1 кВт.ч с мощностью 1 кВт
<b>РЭУ с быстродействием до 0,1 секунды</b>		
РЭУ на базе сверхпроводящих индукционных накопителей (СПИН)	около 0,85	свыше 200 000 долл.
РЭУ на базе емкостных накопителей (ЕН)	около 0,85	свыше 10 000 долл.
РЭУ на базе электрохимических аккумуляторных батарей (АБ)	около 0,60	500 – 750 долл.
РЭУ с ЭХГ	0,25 – 0,40 (около 0,75 с утилизацией тепла)	750 – 1500 долл.
РЭУ с реверсивным ЭХГ /5/	0,35 – 0,40 (около 0,80 с утилизацией тепла)	500 – 1000 долл.
<b>Аккумулирующие электростанции и энергоагрегаты с быстродействием свыше 10 секунд</b>		
Гидроаккумулирующие электростанции (ГАЭС)	около 0,75	150 – 200 долл.
Теплоиспользующие аккумулирующие электростанции (ТАЭС)	около 0,40 (около 0,80)	около 500 долл.
Воздушные аккумулирующие энергоагрегаты	около 0,50 (около 0,80)	около 500 долл.
Механические аккумулирующие энергоагрегаты	около 0,60	около 500 долл.
<b>Пиковые энергоагрегаты с быстродействием свыше 10 секунд</b>		
Пиковые энергоагрегаты гидравлических электростанций (ГЭС)	нет	около 300 долл. (условно)
Пиковые энергоагрегаты на базе газотурбинных ЭУ	нет	около 300 долл. (условно)

Из данных, приведенных в таблице 3, видно, что РЭУ с ЭХГ вполне конкуренты в своем классе энергоустановок. РЭУ на базе электрохимических аккумуляторных батарей,

ближайшие конкуренты РЭУ с ЭХГ в классе с быстродействием до 0,1 сек., дешевле, но проигрывают РЭУ с ЭХГ из-за малого ресурса (300-500 циклов) и сложности обеспечения условий в электросети для обеспечения полного цикла заряда-разряда. Удельные затраты на создание РЭУ с ЭХГ могут быть существенно снижены в случае использования реверсивных ЭХГ, устройство которых обеспечивает последовательное выполнение функций генератора или электролизера в единой электрохимической ячейке.

Первоначальная адаптация РЭУ с ЭХГ к условиям работы в составе действующей инфраструктуры электротеплоснабжения коммунального хозяйства и промышленного энергоснабжения не представляет сложности и может быть выполнена по схеме, представленной на рисунке 3.



**Рисунок 3. Принципиальная схема подключения РЭУ с ЭХГ к объекту электротеплоснабжения.**

Включение РЭУ с ЭХГ по такой схеме обеспечивает повышение устойчивости объекта, при отключении его от централизованного электро и теплоснабжения. Установленная мощность такой РЭУ может быть минимальной (в период освоения промышленного производства), исходя из минимальных резервирующих функций для объекта обслуживания. В тоже время, сотни РЭУ с ЭХГ, включенных в общую электросеть в центре мегаполиса, позволят существенно увеличить КИУМ основных генерирующих мощностей без серьезных изменений существующей структуры электропитания и теплоснабжения зданий.

На втором этапе формирования территориальных водородных энергетических комплексов, когда появится необходимость иметь разветвленную сеть водородных автозаправочных станций и, соответственно, избыток водорода на них, когда промышленные технологии производства ТЭ позволят устанавливать мощные и недорогие ЭУ с ТЭ, можно перейти к варианту присоединения РЭУ с ЭХГ по схеме, представленной на рисунке 4.

Такая схема применима при строительстве на неосвоенных территориях. Например, при строительстве военных гарнизонов, новых поселков и отдаленных районов крупных городов.

Эффективность использования РЭУ с ЭХГ в составе ТВЭК значительно повышается при утилизации тепловой энергии, например, для отопления и горячего водоснабжения.

Оценочные расчеты показывают, что в период после завершения реформирования электроэнергетики и жилищно-коммунального хозяйства стоимость теплоснабжения с использованием утилизационного тепла РЭУ с ЭХГ не будет превышать прогнозируемые среднерыночные тарифы на централизованное теплоснабжение в большинстве регионов РФ.

Значительная часть реализуемых программ строительства энергетических установок на базе водородных ТЭ находятся в стадии проведения или завершения опытно – промышленной отработки /6/. Их перспективность в условиях западной экономики доказана практически.

#### 4. Структура, характеристики и порядок формирования ТВЭК на территории комплексной застройки

ТВЭК входит в состав инженерной инфраструктуры территории комплексной застройки, рассчитанной на проживание 50 – 70 тысяч жителей, а также размещение 25 – 30 тысяч рабочих мест в составе промышленных предприятий, коммерческих, социальных, транспортных и коммунальных объектов. Общая площадь подлежащих строительству объектов составляет около 2 млн. м<sup>2</sup>. Площадь территории комплексной застройки - около 350 га, с учетом территорий промышленных зон и зон отчуждения, согласно градостроительным и санитарным нормам.

Условная схема ТВЭК представлена на рисунке 4.

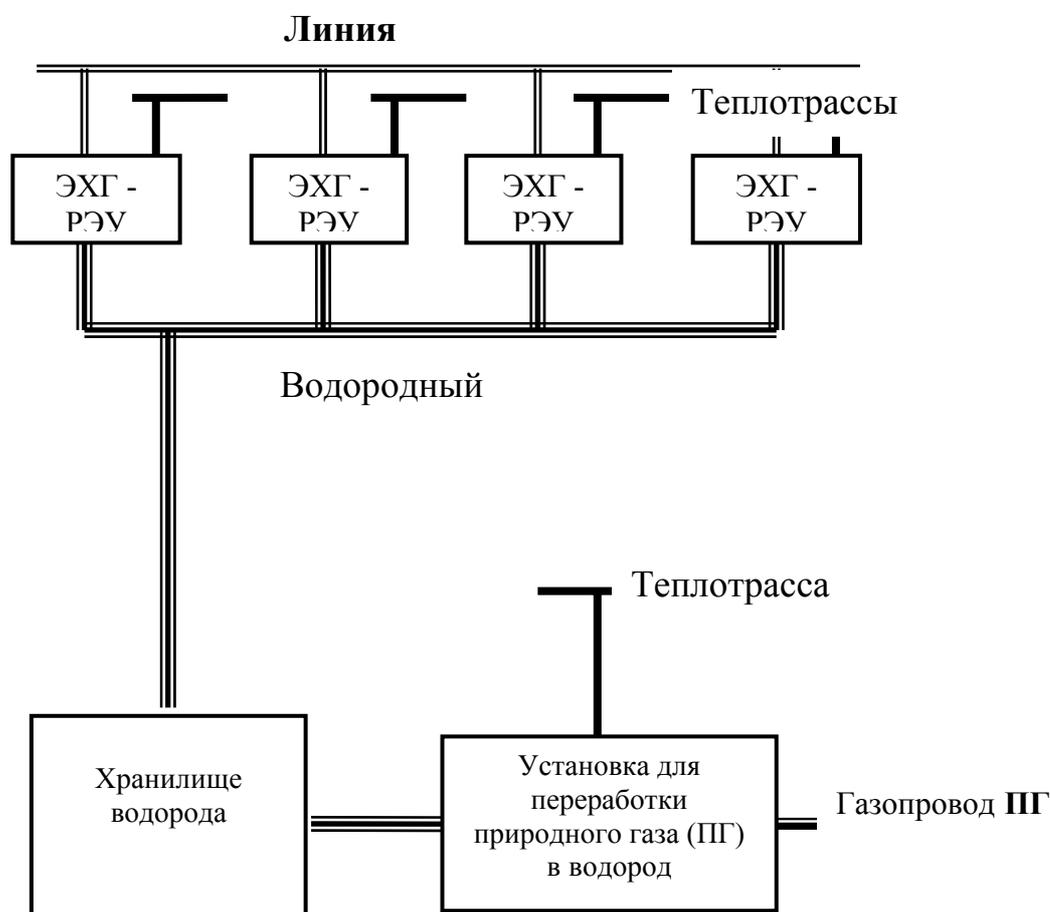


Рисунок 4. Схема территориальной водородной инфраструктуры района

В состав ТВЭК входят:

- 5 – 300 РЭУ с ЭХГ (в зависимости от конкретных условий размещения объектов и их назначения мощность каждой энергоустановки может быть различна и находиться в диапазоне 100 – 5000 кВт),

- установка для централизованного производства водорода (УЦПВ), например, путем конверсии природного газа, угля или любого другого ископаемого или возобновляемого углеводородного топлива мощностью по товарному водороду 0,8 – 1,0 т/час (исходя из конкретных условий привязки, на первом этапе, возможно использование имеющейся газопроводной системы для применения РЭУ с встроенным блоком конверсии природного газа),

- централизованное хранилище водорода (ЦХВ) вместимостью 20 - 25 тонн,

- питающие и резервирующие линии электропередачи напряжением 6 - 20 КВ, объединяющие РЭУ с ЭХГ в единый комплекс, общей протяженностью 20 – 25 км.

- трубопроводы для транспортировки водорода ЦХВ – РЭУ с ЭХГ общей протяженностью около 20 км,

- теплотрассы общей протяженностью 15 – 20 км.

УЦПВ и ЦХВ должны быть удалены на безопасное расстояние от территории жилой застройки (по аналогии с АЗС).

Основные заданные технические характеристики ТВЭК представлены в таблице 4.

Таблица 4. Заданные технические характеристики ТВЭК.

Параметр	Размерность	Характеристика
Генерирующая мощность (ГМ)		
- по электроэнергии, -	МВт	30 - 50
- по тепловой энергии, -	Гкал/час	35 - 50
Нагрузочная мощность (НМ)	МВт	3,0 – 5,0
Емкость накопителя энергии (включая запас водорода в ЦХВ):		
- по электроэнергии	КВт.ч	Около 500 000
- по тепловой энергии	Гкал	Около 300
Производительность УЦПВ по водороду:		
- суточная	Тонн/сутки	Около 10 (16 – РЭУ с ЭХГ)
- почасовая	Тонн/час	Около 1,0
Обслуживающий персонал, количество	Шт.ед./смена	5
Ресурс назначенный	Часов	200 000

Формирование ТВЭК может производиться поэтапно, в составе единого плана развития инженерных сетей территории.

На первом этапе возможна установка отдельных автономных РЭУ с ЭХГ, имеющих взаимные связи по резервирующим линиям электропередач, с соотношением нагрузочной и генерирующей мощности 3:1. При таком соотношении мощностей достигается самообеспечение ЭХГ водородом.

На последующих этапах, по мере создания водородных газопроводов (реконструкции имеющихся газопроводов), централизованных источников водорода и подсоединения к ним нескольких РЭУ с ЭХГ, генерирующие мощности РЭУ будут постепенно наращиваться до оптимального уровня, составляющего около 5 МВт и подлежащего уточнению на стадии проектирования.

Включение ТВЭК в состав системы энергоснабжения территории обеспечит:

- снижение установленных мощностей:

1. основного источника электроснабжения (электростанции), предназначенного для электроснабжения территории, не менее чем в 2 раза, (с 70 – 80 МВт до 35 – 40 МВт),

2. основного источника теплоснабжения – не менее чем в 1,5 раза,

- увеличение КИУМ основного источника электроснабжения с 0,3 до 0,6,

- сокращение вредных выбросов в атмосферу – не менее чем в 2 раза.

- увеличение характеристик надежности системы электро – и теплоснабжения территории не менее чем в 2 раза, в том числе – обеспечение первой категории надежности электроснабжения.

## 5. Затраты на создание ТВЭК и источники инвестиций.

Структура и характеристика затрат на создание ТВЭК в составе системы энергоснабжения территории комплексной застройки, с техническими характеристиками согласно таблице 2, представлены в таблицах 5 и 6. Затраты оценивались с учетом опытно – промышленного характера работ.

Таблица 5. Структура и оценочные характеристики затрат на создание РЭУ с ЭХГ генерирующей мощностью 5 МВт (тыс. долл., без НДС).

Статья затрат	Цена единицы, удельная цена	Количество	Затраты
<b>Стандартное оборудование</b>			
Электролизер	0,8 за 1 КВт нагрузочной мощности	500 КВт	400
АСУТП	150	1	150
Инвертор - выпрямитель	100	1	100
Прочее	150	1	150
<b>Нестандартное оборудование</b>			
ЭХГ с ТПТЭ	0,6 за 1 КВт на генерирующей мощности	5000 КВт	3000
Аккумулятор водорода	1100 на 1 тонну водорода	2 тонны водорода	2200
Система утилизации тепла	500	1	500
Прочее	700	1	700
<b>Строительно – монтажные работы</b>			
Монтаж	300	1	300
ПНР	200	1	200
<b>Проектные работы</b>			
ОКР	300	1	300
Проектирование	600	1	600
<b>ИТОГО:</b>			<b>8600</b>

При внедрении автономных РЭУ с ЭХГ на первом этапе с генерирующей и нагрузочной мощностями около 0,20 и 0,50 МВт соответственно (возможностью дальнейшего увеличения генерирующей мощности до 5 МВт), полные затраты составят около 5 млн. долл.

В случае создания опытно – промышленной серии затраты на создание одной РЭУ с генерирующей мощностью 5 МВт составят около 7,5 млн. долл., что соответствует около 1500 долл. за 1 кВт генерирующей мощности.

Использование в составе РЭУ реверсивных ЭХГ позволит снизить общие затраты до уровня менее 1000 долл. за 1 КВт генерирующей мощности.

Таблица 6. Структура и оценочные характеристики затрат на создание ТВЭК (млн. долл., без НДС).

Статья затрат	Цена единицы	Количество	Затраты
<b>Оборудование</b>			
ЭХГ - РЭУ	7,5	6	45
УЦПВ	5	1	5
ЦХВ	10	1	10
ЛЭП	0,2 за 1 км	25 км	5
Теплотрассы	0,2 за 1 км	20 км	4
Водородные газопроводы	0,4 за 1 км	20 км	8
<b>Строительно-монтажные работы</b>			
Монтаж	6	1	6
ПНР	5	1	5
<b>Проектные работы</b>			
ОКР	2	1	2
Проектирование	6	1	6
<b>ИТОГО:</b>			<b>96</b>

Полные затраты на создание традиционной системы электроснабжения территории комплексной застройки с характеристиками, согласно данным, приведенным в разделе 4, составляют (оценочно) от 150 до 180 млн. долл. или 5 – 7% общего объема капиталовложений в строительство из расчета 1300 – 1400 долл. за 1 КВт присоединенной мощности.

Покрытие затрат на создание инженерной и социальной инфраструктур территорий комплексной застройки обеспечивается, как правило, путем наложения дополнительных условий (обременений) в инвестиционный контракт, либо включением этих затрат в подлежащую оплате стоимость земельного участка. Размер инвестиционных обременений в большинстве российских региональных центров составляет 10 – 30%.

Для полного покрытия расходов на создание ТВЭК необходимо обеспечить целевое финансирование на уровне 50 - 60% объема инвестиций в строительство систем электро - теплоснабжения. При этом полная сумма обременений инвестора не возрастает.

## **2. Заключение и выводы.**

РЭУ с ЭХГ конкурентоспособны при новом строительстве и реконструкции существующих систем электро – и теплоснабжения с круглогодичным гарантированным потреблением тепловой энергии.

Уже сейчас возможно использование РЭУ с ЭХГ в составе автономных систем электроснабжения для регулирования режимов и обеспечения совместимости источника электроснабжения и нагрузки.

Реализация программы создания ТВЭК позволит начать формирование инфраструктуры водородной энергетики и плавно перейти к широкому использованию экологически чистого и энергоемкого водорода в энергетике, промышленности, на транспорте и в быту.

Для осуществления программы потребуются меры государственной поддержки, которые должны, помимо долевого финансирования, включать стратегию развития водородной энергетики как составной части Энергетической стратегии России /7/, создание нормативно – правовой базы водородной энергетики, системы тарифного, налогового и инвестиционного регулирования на федеральном и региональном уровнях.

Литература.

1. Пономарев – Степной Н.Н., Столяревский А.Я., Атомно – водородная энергетика – пути развития, «Энергия», 2004, №1., с. 3 – 9.
2. Интернет – сайт «Распределенные энергетические системы», - <http://bpcenergy.com>,
3. Временная инструкция по расчету электрических нагрузок жилых зданий (РМ – 2696–01), утверждена приказом Москомархитектуры №32 от 31 июля 2001 г.
4. Столяревский А.Я., Аккумуляция вторичной энергии, «Атомно – водородная энергетика и технология». Вып. 4. – М.:Энергоиздат, 1982. – 200 с., стр.60 – 125.
5. «Универсальная реверсивная электрохимическая система». Патент 6811913, США, Реферативный журнал ВИНТИ 05.10.022ф, 14п., вып. 10, 2005г., стр. 2,
6. Интернет - сайт компании UTC – Power, - <http://www.utcpower.com/>.
7. «Энергетическая стратегия России на период до 2020 года», Распоряжение Правительства Российской Федерации от 28 августа 2003 г. N 1234-р.

***Сведения об авторах:***

Столяревский Анатолий Яковлевич, 1951 г.р.

Хуснутдинов Вениамин Алексеевич, 1957 г.р.

Касаткин Михаил Алексеевич, 1957 г.р.