

# СЕТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРАНСПОРТА ВОДОРОДНЫМ ТОПЛИВОМ: МОДЕЛИ СТРУКТУР И АЛГОРИТМЫ СОВЕРШЕНСТВАНИЯ

**Безродный А.А.**

*Белорусский государственный университет,  
Беларусь, г. Минск, ул. Ак. Курчатова, д. 5*

Bezrodnyaa@yandex.ru,

**Цвиркун А.Д., Резчиков А.Ф., Дранко О.И., Степановская И.А.**

*Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,  
Россия, г. Москва, ул. Профсоюзная, д.65*

tsvirkun@ipu.rssi.ru, rw4cy@mail.ru, olegdranko@gmail.com, irstepan2016@yandex.ru

**Кушников В.А., Иващенко В.А.**

*Институт проблем точной механики и управления РАН  
Россия, г. Саратов, ул.Рабочая, д.24*

kushnikoff@yandex.ru, ivaiptmu@ya.ru

*Аннотация: Среди всех источников энергии, известных на сегодняшний день, именно водород является наилучшим, однако и наименее практически разработанным. Его масштабное применение сдерживается результатами развития транспорта на ископаемом топливе – нефти, газе, угле – и соответствующей инфраструктуры за последние 100-150 лет, а также наличием иных альтернативных вариантов – электроэнергия, солнечная, приливная, ветро- и т.п. генерация, био-топливо и рациональное использование отходов и т.д. Данное обстоятельство вызывает необходимость эффективного управления созданием и развитием водородных транспортных систем, в том числе и в отношении формирования сетей обеспечения водородом как моторным топливом, чему в развитие предыдущих исследований авторов и посвящена настоящая работа.*

Ключевые слова: водородное топливо, сложная человеко-машинная система, управление.

## Введение

Развитие водородной транспортной системы (ВТС), по-видимому, станет актуальнейшей задачей уже в 2040-50-х гг в связи с высокой энерго-эффективностью данного вещества, его «бесконечными» запасами и нулевым воздействием на окружающую среду. Кроме того, пока только водород может «создаваться» человеком, что позволяет использовать его для хранения энергии, получаемой из иных (в т.ч. альтернативных и возобновляемых) источников. Наконец, по сравнению с традиционными (ископаемыми) видами моторных топлив он характеризуется минимальными энерго-потерями на всех этапах его жизненного цикла: создания (добычи), производства (переработки), транспортировки (распределения) и сбыта (потребления) [1].

Краткая сравнительная характеристика доступности технологий традиционных и альтернативных источников энергии представлена в табл. 1.

Таблица 1. Степень развития производственных процессов ТЭК в разрезе источников энергии

Вид топлива	Создание	Доставка	Генерация	Первичная логистика	Вторичная логистика	POS	Клиент
АБ, ДТ	Добыча нефти	Сеть МНП	Переработка на НПЗ	МНПП и ЖДЦ на НБ и СХГ	АЦ (ЖМТ)	АЗС	АТС
СУГ					АЦ (газ)	АГЗС	Переоб. АТС
Био-этанол	Рост с/х культур (тип I, III), сбор отходов (II)	ЖД, авто- или водная поставка с/х продукции отходов	Установки на с/х предприятиях или НХК	АЦ, ЖДЦ на НБ	АЦ (бензовозы)	АЗС	< 10 % - обычные АТС,
Био-дизель							>10 % - Flex Fuel
Био-газ							АЦ, ГПП
ПГ	Добыча	Сеть МГПП	ГПЗ	МГПП, ГРС	АЦ (ПГ)		
Эл. Энергия	Не имеет смысла		ТЭЦ, ГЭС, АЭС	Распредел. Сети	Районные сети	ЗС на УДС	Гибриды, спец. ТС

Вид топлива	Создание	Доставка	Генерация	Первичная логистика	Вторичная логистика	POS	Клиент
H <sub>2</sub>			Установки генерации на НХК	МГПП (МВТ), ВПП, ВНБ, ВЖДЦ,	ВАЦ (при 25 Мпа - до 1 т)		ТС(МВТ) FCV или спец. ТС
Степень Развития	Развито	Должно и может быть развито		Апробация, ОПЭ	НЕТ		

В табл. 1 и далее АБ – автобензины, АГНКС – Автогазонаполнительные Компрессорные Станции, АТС – автотранспортное средство, ВАЦ – Водородная автоцистерна (ВЖДЦ - ЖД-цистерна, ВПП – продуктопровод), вторичная логистика – доставка от НБ до ЗС, ГРС - Газораспределительные Сети, ДВС – двигатель внутреннего сгорания, ДТ – Дизельное топливо, МАЗС – многотопливная АЗС, МВТ (С) – метано-водородное топливо (Смесь), МНПП - Магистральный нефтепродуктопровод (МГПП – газо-продуктопровод, МНП – нефтепровод), НБ - нефтебазы, НХК – нефтехимический комплекс, НПЗ – нефтеперерабатывающий завод, ПГ – природный газ, переоб. ТС – ТС, переоборудование которых целесообразно, первичная логистика – доставка от НПЗ до НБ, ПХГ – подземное хранилище газа, СХГ - склад хранения газа, спец. ТС – ТС заводского изготовления, УДС – Улично-дорожная сеть, FCV – Fuel Cell Vehicle (ТС на топливных ячейках), POS – Point of Sales (точки продаж).

Из анализа табл. 1 следует, что на сегодняшний день ВТС развита недостаточно, в том числе:

- производство водорода локализовано на крупных предприятиях (гидроочистки при переработке нефти, синтез аммиака, металлургия и т.п.) или не обладает должной производительностью;
- специализированных средств доставки мало, сети водородных ЗС крайне ограничены;
- число водородных ТС (водородомобилей) минимально, их содержание в два раза дороже АТС.

В этой связи для эволюционного развития водородной транспортной системы, что необходимо во избежание нерационального отказа от развитой инфраструктуры производства и обеспечения функционирования и парка АТС с ДВС, целесообразно использовать компоненты действующих энергетических и транспортных систем с постепенным переходом к водороду путем применения смесевых топлив, переоборудования существующего парка транспортных средств, развития средств доставки и сети ЗС в составе функционирующих автозаправочных станций и т.п. При этом необходимо учитывать высокую степень опасности водорода (диапазон взрывоопасных концентраций 4-70 % гораздо выше, чем, например, для СУГ – 2-10 %, АБ – 1-6 % или ДТ – 2-3 %), значительные потери при хранении сжиженного водорода на борту ТС (1,5 % в сутки и выше) и т.д.

Исследования по энергетическому использованию водорода проводились с начала его практического применения - трубопроводы со «светильным газом» для освещения улиц с начала XIX века в европейских столицах, автомобильное топливо на основе отработанного заполнителя азростатов заграждения в годы Великой Отечественной войны, заправка ракет с доставкой водорода криогенными АЦ и потерями до 10 % и более (перекрывалось высокой энергоэффективностью и особыми требованиями сферы применения) и т.п. Современные работы, например [2,3.4] посвящены, главным образом, технологическим аспектам или экономическому анализу ВТС, исходя из аналогии с иными источниками энергии и соответствующим представлением динамики экономических показателей производственных систем. Авторами уже была сделана попытка построения структуры системы управления водородной транспортной системой [9], что нуждается в развитии в виде моделей структур и алгоритмов совершенствования сетей водородных ЗС как части «водородной кибернетики».

Исходя из одной из целей любой транспортной системы – снабжение энергией (моторным топливом) ТС – подходы к построению сетей ВЗС на первом этапе могут быть схожими с применяемыми в нефтепродуктообеспечении (НПО), ГРС и альтернативных и возобновляемых источниках энергии (АВИЭ), что и используется в работе далее.

## 1 Содержательное описание подхода к построению сети водородных ЗС

Потребители моторных топлив любого вида как правило распределены на УДС неравномерно, что требует размещения объектов транспортной инфраструктуры (в том числе и рассматриваемой ВТС) в местах максимальной плотности потока транспортных средств с учетом параметров УДС и воздействий и ограничений подсистем  $G_{uv}$  ( $u=1..U$ , 1 – «Потребители», 2 - «Поставщики», 3 - «Конкуренты», 4 - «Макроэкономическое окружение»,  $v=1..V$  – декомпозиция факторов [5].

При отмеченной выше современной недостаточности источников и подсистем хранения и перевалки водорода, ВЗС первоначально могут создаваться в непосредственной близости или даже на территории объектов его генерации (например, крупных нефтехимических производствах), что поможет снизить возможные потери, позволит использовать высококвалифицированный заводской персонал, обеспечивая должный уровень промышленной безопасности, и делает проект более реализуемым с точки зрения бюджета, так как стоимости ЗС по сравнению с установками его генерации крайне мала. Следующим этапом будет являться постепенное расширение системы по мере роста числа водородо-мобилей - от внутри-объектового транспорта через парк предприятий НКХ и смежных обслуживающих организаций к заправке всех эксплуатируемых на данном виде топлива ТС в окрестности, концентрически расширяющейся. Наконец указанное приводит к появлению новых и совершенствованию действующих производств рассматриваемого источника энергии. С учетом упомянутой ранее постепенности перехода от ископаемых источников энергии к ВТС через иные АВИЭ речь в контексте логистики, в том числе, целесообразно вести и с точки зрения существующих газораспределительных сетей и АГНКС, которые сегодня развиваются в целом ряде стран как в связи с недостатком энергоресурсов (Армения, Индия, Иран, Китай, Нидерланды, Пакистан, Узбекистан, Чехия и др.), так и из-за стремления к широкомасштабному развитию альтернативных и возобновляемых источников энергии (Германия, Италия, Швеция и др.).

Достаточно давно известно [4,6], что возможна доставка водорода совместно с метаном с последующим потреблением смесового топлива, хотя и существует вопрос сепарирования  $CH_4$  и  $H_2$  между потребителями и точности учета. Первые трубопроводы, содержащие упомянутый «светильный газ» (смесь 50-55 %  $H_2$ , 30-35 %  $CH_4$ ,  $CO$  и др.), использовались для освещения ряда городов с начала XIX столетия, при этом именно он применялся как топливо для ДВС Жана Этьена Ленуара (1860 г.).

В Российской Федерации начатые еще в СССР программы перевода грузового и общественного транспорта на природный газ с середины 2010-х гг получили существенное развитие, в частности добавились железнодорожные локомотивы, морские суда и даже авиа-транспорт с выходом в 2020 г. на темпы ежегодного роста числа объектов снабжения и объемов реализации 10% и более. С учетом сказанного выше о смесевых топливах в рамках метода исследования case-study (см. работы по Китаю [2] и Великобритании [7]) подобным образом может быть рассмотрена возможность развития ВТС на базе существующих или перспективных ГРС и АНГКС и в РФ, что и рассматривается в работе далее.

## 2 Информационно-логическая схема управления развитием сетей водородных ЗС

Задача управления развитием сетей ЗС (в том числе и водородных) состоит в последовательном повышении значений показателя эффективности  $K_{Сеть}$  с использованием ранее созданных моделей и уточнения результатов по мере развития системы и получения новой информации о ней [5]:

$$(1) K_{Сеть}(q_{ТС}, G_{uv}, r, V_{i \leftrightarrow АЗС}, E_{j \leftrightarrow АЗС}) \rightarrow \max, K_{Сеть}^* > K_{Сеть},$$

$$K_{Сеть_{ЗС}}^* > K_{Сеть_{ЗС}}, \exists G_{uv}^*, V_{i \leftrightarrow ЗС}^*, E_{j \leftrightarrow ЗС}^*, K_{Сеть} = \sum_{k=1}^K a_k r^k, \exists \partial^k K / \partial r^k, k > 2;$$

$$V_{i,гр} \in \{V_i\}, E_{j,гр} \in \{E_j\}; \forall \varepsilon > 0 \exists \delta_1 > 0, \Delta r < \delta, \Delta K < \varepsilon$$

где \* – объекты проектируемой сети ЗС,  $r$  – число ЗС сети,  $V_i$  ( $i=1..I$ ) – узлы сети (перекрестки),  $E_j$  ( $j=1..J$ ) – ребра (улицы и дороги),  $q_{ТС}$  – интенсивность.

В процессе моделирования на УДС региона, представляемую в виде графа  $\Gamma_{УДС}$ , накладывается граф источников водорода или НКХ  $\Gamma_{НКХ}$ , ГРС как средств доставки ( $\Gamma_{ГРС}$ ) и подключенных к ним сетей АГНКС ( $\Gamma_{АГНКС}$ ), а также существующих сетей обеспечения моторным топливом  $\Gamma_{АЗС}$  как альтернативы и/или мест первоначального расположения объектов будущей ВТС. Информационно-логическая схема решения задачи представлена на рис. 1.

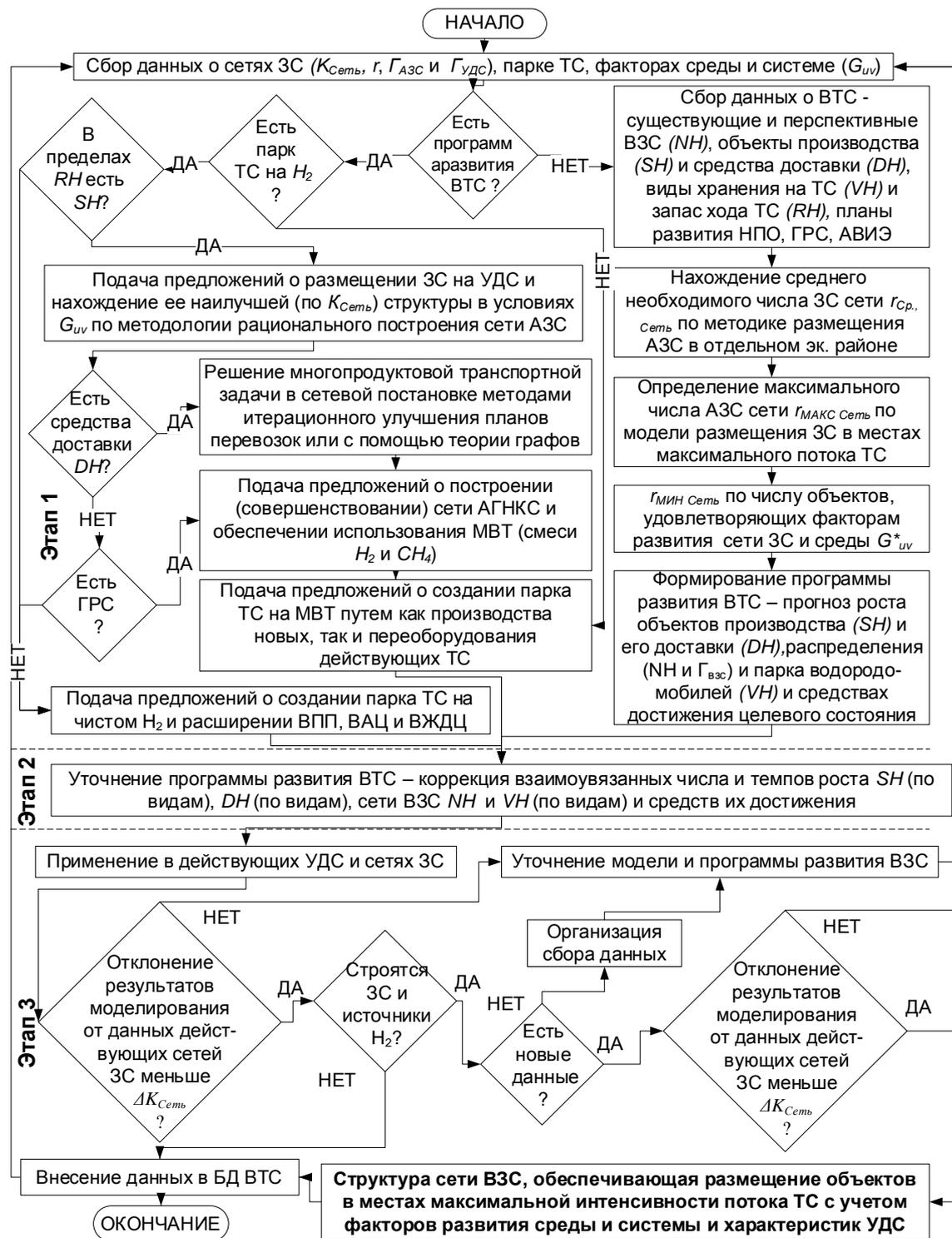


Рис.1. Информационно-логическая схема управления развитием сетей ВЗС как части ВТС

На рис. 1 учтено, что сети ВЗС с точки зрения запаса хода транспортных средств и средств вторичной логистики могут состоять либо из ЗС для FCV [3, 6], либо для ТС на МВТ (МВС) и быть первоначально частью действующей сети АЗС и АГНКС;

- применение моделей и алгоритмов совершенствования внутренней структуры ВЗС целесообразно при достижении значительной (10 %) доли водородо-мобилей в общем парке ТС;
- используются ранее созданные модели размещения АЗС в местах максимальной интенсивности потоков АТС с учетом параметров объектов и характеристик УДС, для которых ведется аппроксимация зависимости  $K_{Сеть}$  от числа объектов  $r$  и определение оптимального или наилучшего по критерию  $K_{Сеть}$  числа АЗС, соответствующего особой точке  $r^*$  зависимости  $K_{Сеть}(r)$ ;

- *SH* (Source of Hydrogen) – объекты-источники производства водорода,  $SH_{sh} \in 1..5$  (1 – паровой риформинг  $CH_4$ , 2 – газификация кокса, 3 – электролиз, 4 – биохимическое разложение отходов и т.п.);
- *DH* (Deliverance of Hydrogen) – средства доставки,  $DH_{dh} \in 1..5$  (1 – криогенные ВАЦ, 2 – тубецистерны, перевозящие водород под давлением, 3 – транспортировка посредством МГПП и ГРС совместно с метаном, 4 – доставка заполненных топливных ячеек, содержащих обратимые гидриды металлов [3,6]) с их последующей блочно-модульной заменой ЗС, 5 – иные способы);
- *NH* (Net of Hydrogen stations) – сети ВЗС, содержат компоненты графа  $\Gamma_{ЗС}$  или  $\Gamma_{Сеть}$  в виде узлов видов  $NH_{nh} \in 1..6$  (1 – сжатие водорода, 2 – электролиз непосредственно на ЗС, 3 – заправка МВТ, 4 – сжижение водорода, 5 – замена FC или Fuel Cell, топливный ячейки);
- *VH* (Vehicle with Hydrogen),  $VH_{vh} \in 1..5$  (1 – топливные ячейки, 2 – сжатый водород для FCV 3 – смесь водорода и метана, т.н. *hythane* (10 % по массе), 4 – сжиженный водород, 5 – тоже в смеси с метаном);
- БД ВТС – база данных (знаний) по водородно-транспортной системе.

На I этапе проводится сбор данных о системе, среде, существующих ЗС и УДС.

- 1.1. Сбор данных об УДС и сетях ЗС, исходя из данных натуральных наблюдений, результатов предыдущих исследований, планах развития и информации из систем управления.
- 1.2. Задание допустимого отклонения  $\Delta K_{Сеть}$  для оценки результатов применения модели.
- 1.3. Если программа развития ВТС существует – переход к п. 1.9.
- 1.4. Сбор данных о существующих и перспективных сетях ВЗС (*NH*), объектах производства (*SH*) и доставки (*DH*), видах (*VH*) и запасе хода водородо-мобилей (*RH*), программах развития НПО, ГРС и АВИАЭ.
- 1.5. Нахождение среднего числа ЗС, необходимого для перехвата наперед заданного потока ТС для УДС данного вида, по методике определения потребности и размещения АЗС в отдельном экономическом районе [6] с использованием экспертных оценок.
- 1.6. Определение верхней границы требуемого числа ЗС сети и площадок под их строительство по модели размещения объектов в места максимальной интенсивности потока АТС, нижней границы - по числу объектов (участков под строительство), удовлетворяющих заданным факторам [1], [2].
- 1.7. Решение задачи размещения сети ЗС на УДС и нахождение ее структуры, наилучшей или оптимальной по  $K_{Сеть}$  по методологии рационального построения структуры сетей АЗС [7].
- 1.8. Разработка программы развития ВТС - формирование прогноза динамики взаимоувязанных показателей *SH*, *DH*, *NH*,  $\Gamma_{ЗС}$  и *VH*, определение необходимых сроков, исполнителей и ресурсов.
- 1.9. В зависимости от характеристик парка водородо-мобилей и средств доставки (ВАЦ, FC, ГРС):
  - либо методами итерационного улучшения плана перевозок (опорного плана, северо-западного угла, наименьшего элемента и т.п.) или с помощью теории графов в сетевой постановке решается много-продуктовая транспортная задача открытого несбалансированного вида (типично для ЗС);
  - либо подаются предложения в вышестоящую систему о строительстве ВПП и/или освоении смесевых топлив в контексте как ЗС, так и ТС (при отсутствии парка водородных ТС и/или объектов генерации водорода предложения об их формировании подаются на этапе II).

На II этапе ведется уточнение программы развития ВТС с определением достигнутых значений показателей *SH*, *DH*, структуры и состава сети водородных ЗС и *VH* (по видам) и темпов их роста (изменения), необходимых коррекции и корректирующих воздействий

На III этапе определяется структура и состав сети ЗС, наилучшей по  $K_{Сеть}$ .

3.1. Для мест максимальной интенсивности потока ТС, для которых создание ЗС не уменьшает значение  $K_{Сеть}$  более чем на наперед заданную величину (п. 1.2), принимается решение о создании ЗС с последующей проверкой их исполнения (как и создания новых сооружений по генерации водорода). Иначе - уточнение модели, занесение данных в БД ВТС (База знаний ВТС) и переход к п. 1.1.

3.2. При отсутствии данных организуется их сбор.

3.3. Результаты моделирования заносятся в БД ВТС с переходом на начало алгоритма, что целесообразно вследствие необходимости последовательного совершенствования системы.

### 3 Краткое описание известных моделей и алгоритмов совершенствования НПО

На рис. 1 применен системный причинно-следственный подход к построению и совершенствованию сложных человеко-машинных систем - анализ поведения системы во внешней

среде, моделирование структур, построение алгоритмов управления и развития и синтез вариантов, наилучших в заданном смысле - с использованием полученных для НПО результатов [11,12].

В частности, «методика определения потребности и размещения АЗС в отдельном экономическом районе» [13] используется для «приведения в порядок» действующей сети АЗС путем перераспределения числа ТРК и их оптимального размещения, сокращения очередей в пиковые интервалы и формирования перспективной сети ЗС с учетом числа транзакций и АТС с их разбивкой по населенным пунктам в данных условиях. Потребность в моторных топливах устанавливается в зависимости от размера парка АТС (по видам) и объема грузо- и пассажирооборота в условиях стационарности потоков заявок, неизвестные параметры и характеристики (показатели) заменяются плановыми, задаваемыми вышестоящей системой для развития. При непрерывной аппроксимации значений величин решение задачи осуществляется путем удовлетворения необходимому условию экстремума функций многих переменных, использования метода неопределенных множителей Лагранжа, отсева решений с числом транзакций, меньшим, чем заданное, и размещением ЗС в т.н. экономически оправданных местах. Результатом является система постановок задач научного совершенствования сетей заправочных станций, требования к исходным данным, алгоритмы расчетов, нормативные параметры ЗС в пиковые нагрузки, рациональные схемы ТРК и оптимальные расстояния между трассовыми объектами. Недостатки [12] - размещение ЗС в соответствии с административным делением и использование средних показателей для пиковых нагрузок – при создании ВТС не существенны.

Методология рационального построения и непрерывного совершенствования структур сетей АЗС и эффективного автоматизированного управления процессами и объектами в данных системах, разработанная и развиваемая в [5,13,14] базируется на теоретико-множественном представлении сложных систем с использованием причинно-следственных связей. Каждый объект, процесс, событие и явление (далее – объекты) имеют причины, определяющие его возникновение, изменение и связь с иными объектами, процессами, событиями и явлениями. Цели достигаются путем преобразования потоков ресурсов и формирования выходных характеристик в условиях среды функционирования. Процесс достижения целей как последовательная смена состояний путем решения задач управления представляется цепью причинно-следственных связей. Решение задач в известных ситуациях заключается в задании лицом, принимающим решение (ЛПР), наиболее общей причинно-следственной связи, которая может быть интуитивно понятной, известной или теоретически доказанной и практически апробированной. Далее проводится декомпозиция ее компонент с использованием моделей теории систем и управления вплоть до уровня, где задачи могут решаться известными методами. Наконец, осуществляется проверка качества внедрения результатов моделирования и коррекция и/или корректирующие воздействия при необходимости. При наступлении признаков ранее неизвестных ситуаций или недостаточности данных задача решается для участков с наиболее достоверной информацией с их сращиванием посредством интерполяции и экстраполяции и последовательным уточнением по мере получения новых данных и развития системы. Так как водородная транспортная система также состоит из объектов различной природы, данная методология на первом этапе также может быть с успехом применена и для решения рассматриваемой задачи.

#### **4 Вариант построения ВТС для РФ (case study)**

Ввиду сложности ВТС, которая в будущем должна представлять собой отрасль хозяйствования с вовлечением подсистем производства, транспорта, распределения и реализации, предложения о развитии в схеме рис. 1 подаются в вышестоящую систему, соответствующую органу государственного управления энергетикой с участием частных компаний, общественных организаций и научного сообщества.

Одним из вариантов транспортировки водорода на начальном этапе является его совместная перекачка с метаном через ГРС [4,6] с последующей реализацией в виде чистого водорода или как смесового топлива на АГНКС. Проекты развития последних известны с 1940-х гг (Днепропетровск и Саратов), «Схемы размещения АГНКС» создавались в СССР и в РФ в 1986, 89, 97 и 02 г, действовала «Целевая комплексная программа по развитию сети АГНКС на 2007-12 годы». В настоящее время реализуется госпрограмма «Энергоэффективность и развитие энергетики», предназначенная для развития АГНКС (100 тыс. жит/ЗС) в городах и на транспортных коридорах (рис. 2, Минэнерго РФ).

В данном «сценарии опережающего развития», представленном на рис. 2, предусматривается:

- снижение топливных затрат на транспорте к 2030 г. >300 млрд р/г (суммарно >1,7 трлн р);
- экологический эффект снижения выбросов к 2030 г. (парниковых газов > 4 млн т, нарастающим итогом > 23 млн т CO<sub>2</sub> эквивалента, SO<sub>2</sub>, сажи, бензапирена) - 5% от выбросов автотранспорта;

- объем реализации- 10,7 млрд м<sup>3</sup> (против 2,6 млрд м<sup>3</sup>. при текущем инерционном сценарии), инфраструктура – 2,3 тыс. (против 554) АГНКС, ТС на КПП >0,7 млн (против 270 тыс.);
- субсидирование строительства АГНКС при реализации >1 млн. м<sup>3</sup>/год (>100 ТС/с/объект);
- 2019 г – 505 АГНКС (2020 – 601 АГНКС с общей реализацией более 1 млрд. м<sup>3</sup>, 70 % независимые АГНКС), планы на 2021 1,3 млрд. м<sup>3</sup>, январь '20/ январь '19 – «+»30 %, развивается и СПГ (трасса М11).

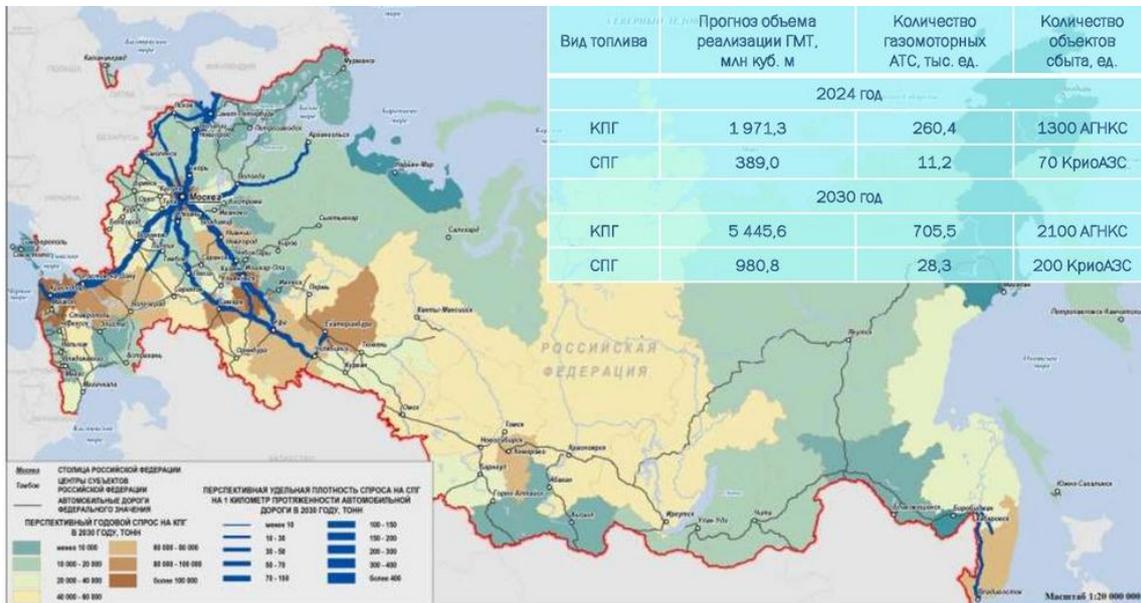


Рис. 2. Схема и оценка прогнозов развития газомоторного топлива в РФ (укрупненный Г<sub>АГНКС</sub> как сети обеспечения водородосодержащим (смесевым) топливом)

При построении ВТС на граф Г<sub>УДС</sub> накладываются графы Г<sub>АГНКС</sub> (как сети реализации смесового топлива) и Г<sub>НХК</sub> (наиболее общий образ последних на рис. 3), с добавлением показателей, описывающих парк ВТС, в качестве основы для которого можно принять ТС, работающие на КПГ и/или СПГ. Контуры ВТС, фактически, задаются Г<sub>АГНКС</sub> с уточнением по мере развития системы и среды и поступления новых данных, причем потоки потребителей, площадки для создания объектов с коммуникациями (в том числе и продуктопроводы ПП) уже будут существовать, а Г<sub>НХК</sub> будет соответствовать Г<sub>SH</sub> или графу источников водорода на первом этапе.



Рис.3. Схема НХК РФ (укрупненный Г<sub>НХК</sub>) как основных современных источников Н<sub>2</sub>

Предложенная структура существующих источников генерации может быть расширена при использовании технологий генерации Н<sub>2</sub> путем газификации кокса (каменного угля), второй по распространенности согласно табл. 2, которые целесообразно размещать в местах его наибольших запасов в непосредственной близости от ГРС или с учетом строительства последних (рис. 4).



Распределение добычи угля по субъектам Российской Федерации., млн т

Рис.4. Схема месторождений угля РФ (укрупненный  $G^*_{SH}$ ) как мест строительства дополнительных источников генерации водорода

Хотя использование кокса как источника водорода при его газификации требует строительства соответствующих установок, однако позволяет задействовать значительные объемы в настоящее время (и в прогнозируемой перспективе) слабо-используемых ресурсов, запасы которого достаточно хорошо разведаны.

## 5 Некоторые технические аспекты развития ВТС в РФ

Известные способы получения водорода, требования к которым описываются в ГОСТ ISO 16110-2-2016 «Генераторы водородные на основе технологий переработки топлива», представлены в табл. 2, основными (по объемам производства), являются паровой риформинг (около 70 %) и газификация угля (около 20 %) с незначительной долей электролиза и биохимического разложения, а также иных, пока скорее лабораторных методов (термическое разложение, гидролиз гидридов, взаимодействие кислот с металлами или щелочей с цинком и алюминием и т.п.). Общим является наличие высоких температур и/или катализаторов.

Типичная схема получения водорода содержит следующие основные этапы [16]:

- подготовка сырья (природный газ, нефтяной газ, СУГ или богатые водородом отходящие газы НПЗ, производств ацетилена, аммиака и метанола, гидрокрекинга и гидроочистки, а также хвостовых газов установок каталитического синтеза углеводородов по процессу Фишера-Тропша);
  - обессеривание путем гидрирования органических серных соединений до сероводорода ( $H_2S$ ) или абсорбцией  $H_2S$  на окиси цинка ( $ZnO$ );
  - предварительный риформинг в адиабатическом реакторе с катализатором на базе никеля при температуре 450-540 °С, когда большинство тяжелых углеводородов преобразуется в  $CH_4$ ,  $CO$  и  $CO_2$ ;
  - паровой риформинг в рядных реакционных трубах с катализатором на базе никеля, причем конверсия углеводородов (метана, 2) и конверсии  $CO$  (3) ярко выражено эндотермические
- (2)  $CH_4 + H_2O \rightleftharpoons CO + 3 H_2$   
(3)  $CO + H_2O \rightleftharpoons CO_2 + H_2$ ;
- охлаждение технологического газа, очистка синтез-газа, выдача готового продукта.

Таблица 2. Краткое описание основных методов производства водорода

Наименование	Реакция	Примечание
Конверсия метана с водяным паром (паровой риформинг)	Вариант 1 $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{CO}\uparrow + 3\text{H}_2$ , Вариант 2 $2\text{CH}_4 + \text{O}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}\uparrow + 4\text{H}_2$	Реакция изменения состава газовой среды при 1000 °С в присутствии катализатора. Т.к. высока эмиссия $\text{CO}_2$ – т.н. "серый водород" ("голубой" при улавливании $\text{CO}_2$ )
Пропускание паров воды над раскаленным коксом (газификация угля)	$\text{H}_2\text{O} + \text{C} \leftrightarrow \text{CO}\uparrow + \text{H}_2\uparrow$	При 1000 °С, в XIX веке так производился светильный газ (Россия), town gas (Англия), Blau gaz (Германия), gaz de houille (Франция) с 50% долей $\text{H}_2$
Электролиз водных растворов солей, гидроксидов активных металлов или воды	$2\text{NaCl} + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NaOH} + \text{Cl}_2\uparrow + \text{H}_2\uparrow$	При использовании в качестве источника электроэнергии ВИЭ - "Зеленый водород"
Каталитическое разложение аммиака	$\text{NH}_3 \rightarrow 1/2\text{N}_2 + 3/2\text{H}_2$	Нормальное атмосферное давление, 600 К, выход 1/6
Пиролиз метана	$\text{CH}_4 \rightarrow \text{C}(\text{s}) + 2\text{H}_2\uparrow$ , где s - твердый	Пропускание кипящего (bubbled) метана через расплав металлического катализатора при 1000+°С (исследования)

Водород можно транспортировать в газообразном или жидком состоянии или с помощью т.н. «носителей», содержащих его в связанном виде - гидриды металлов, наноструктуры углерода, водородные клатраты (включение молекул вещества-«гостя» в кристаллическую решетку «хозяина»), жидкие углеводороды и аммиак (одноразово) и другие богатые водородом соединения – с подгруппой природный газ, этанол, метанол и т.п. как сырье для производства.

Как и указано ранее, собственно водородной инфра-структуры в чистом виде сегодня скорее не существует или она обслуживает территории нефтехимических производств, выделена для апробации и опытно-промышленной эксплуатации объектов и/или специальных применений. Примером могут являться крио- цистерны в авто-, ЖД и, что крайне редко, морском исполнении (хотя и есть опыт применения СПГ-танкеров с температурой фазового перехода «-« 167 °С), с 1960-х гг. использовавшиеся для доставки ракетных топлив, что предполагает сжижение, являющееся (как и для СПГ) сложной технологией с большими потерями – несовершенство вакуумной системы (до 0,5 %), испарение при заливке (до 4 %), «захолаживание» не менее 2-х раз в год, невозможность полной выборки газа и т.п., всего до 15 %.

Первый магистральный водородный трубопровод был введен в действие в 1938 г. в Германии. К 2011 г. в мире построено около 16 тыс. км водородных трубопроводов, эксплуатируются водородные трубопроводы до 300 км под давлением 0,5...3 МПа и выше (наибольший - 400 км, Антверпен-Нормандия). При этом потери газа в них существенно выше, чем у метана – 10 % при 1000 км для  $\text{H}_2$  и 5000 км для  $\text{CH}_4$ , хотя из-за в три раза большей теплоемкости плотность потока энергии схожа [6].

При развитой ГРС – например, единая система газоснабжения «Газпром» состоит из более чем 180 тыс. км. МГПП, 215 линейных компрессорных, 25 ПХГ, 514,2 тыс. км ГРС в 79750 населенных пунктов РФ - и эволюционном переходе к ВТС с использованием смесевых топлив (Hythane) с долей  $\text{H}_2$  10-55 % уместно использование транспорта на КПГ/СПГ, переоборудуемого из АТС, что, фактически, является примером совместной разработки управляющих и управляемых систем [10], целесообразной и для случая ВТС.

Основные вопросы, находящиеся в стадии решения:

- разделение газов на этапах распределения, в т.ч. и из-за разного порядка скоростей при одних и тех же давлениях (плотность водорода  $8,9 \cdot 10^{-2}$ , метана  $6,6 \cdot 10^{-1} \text{ кг/м}^3$  при н.у.);
- безопасность МВС (эксперимент по использованию 20 % Hythane для коммунального хозяйства в Нидерландах 2007-11 гг. удачно завершился без принятия «водородных» мер безопасности, [6]);
- широко-масштабная ОПЭ контура производства водорода (1), его распределения как МВС через ГРС (2), заправки на АГНКС (3) и эксплуатации ТС на КПГ (4);

- из-за больших потерь транспорт МВС на расстояния больше 1000 км пока нецелесообразен, что и определяет радиус ( $rd_{max}$ ) распространения ВТС на первом этапе;
- относительно малые современные мощности по производству водорода:

- мировое производство водорода в 2019 г. 75 млн. т, моторных топлив  $\sim 1,7$  млрд т нефтяного эквивалента, что при использовании лишь пассажирского транспорта примерно в 5 раз меньше необходимого (средний расход АТС 6-7 л/100 км «эквивалентен» 0,8 кг  $H_2$ ), тогда как для большегрузного транспорта речь идет уже о 1,5 порядках;

- практически весь выпускаемый сегодня водород (до 90 %) используется в производственных целях, что говорит о необходимости умножения приведенных выше цифр в 8-10 раз;

- мощность «автономных водородных генераторов» (ГОСТ 54110-2010) 150-400  $нм^3/ч$  или 13,5-36 кг, что недостаточно для прибыльной АЗС (5-10 транзакций/час что не сопоставимо с более чем 1000 в сутки у современной высокодоходной автозаправочной станции и будет лишь усиливаться при пиковых нагрузках), установки НХК (38-115 тыс.  $н.м^3$ ) востребованы для основного производства и нуждаются в заводских сетях.

Водородные заправочные станции делятся на off-site и on-site ЗС. С использованием ГОСТ Р и стандартов ИСО общая структура ВЗС представлена рис. 5, где ВРК – водород-раздаточная колонка.

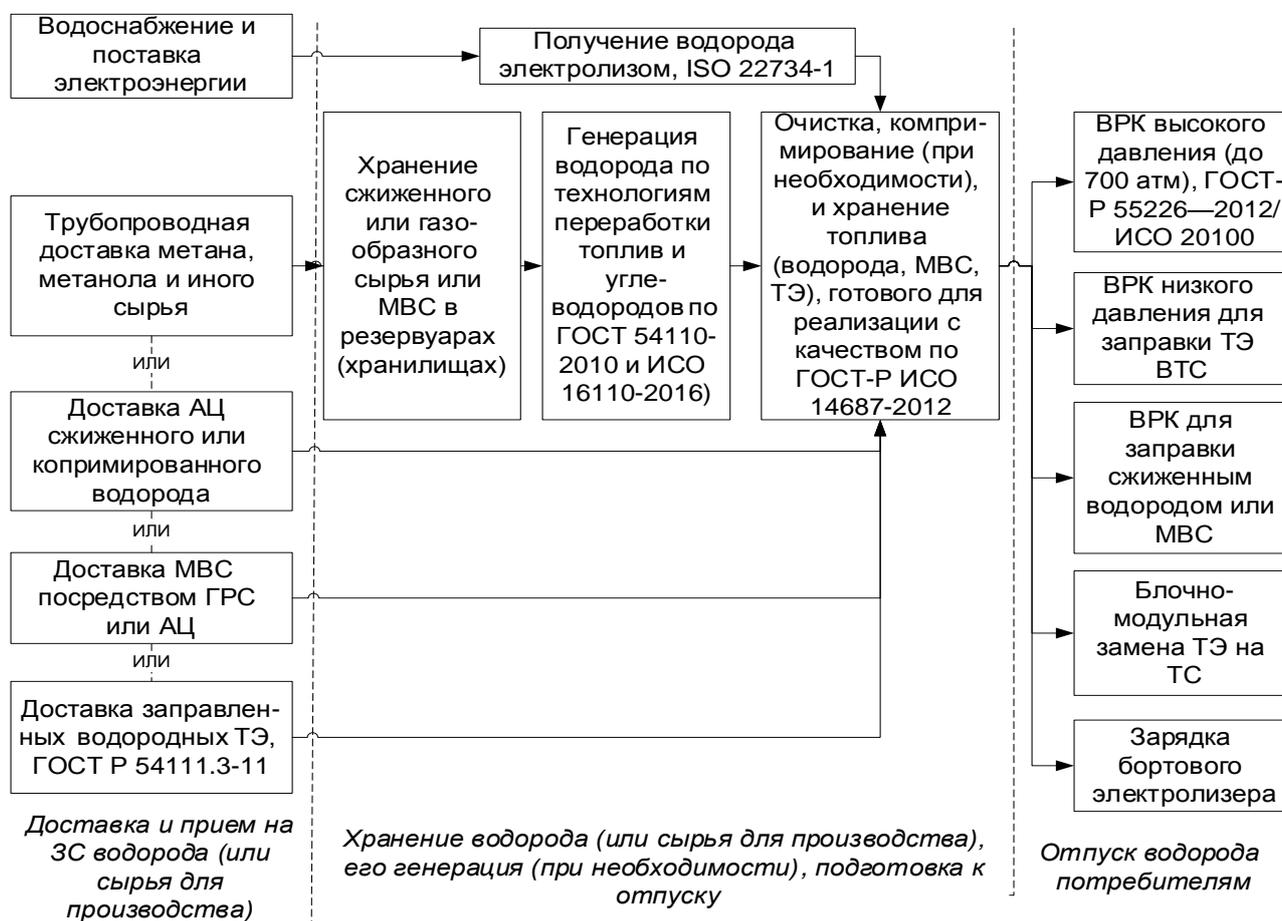


Рис. 5. Общая структура процессов и объектов на ВЗС

Ввиду многообразия способов генерации водорода и форм его хранения и отпуска схема достаточно общая, учитывает все основные процессы ВТС – генерация, распределение и сбыт, в т.ч. размещения источников водорода непосредственно на ЗС - и уточняется в условиях реализации.

ГОСТ-Р ИСО 14687 «Топливо водородное. Технические условия на продукцию» стандартизирует виды водородного топлива, краткая характеристика которых приведена в табл. 3.

Таблица 3. Краткая сравнительная характеристика форм хранения водорода на транспорте

Форма хранения	Характеристики	Потери	Энерго-плотность
Сжатый (компримированный) газообразный водород в баллонах, $\text{CGH}_2$	$P=250-350$ атм ( $t=20$ °С), $P=700$ атм ( $t=-40$ °С)	При 100 атм. минимальны, однако возимый запас недостаточен	7,7 кг/м <sup>3</sup> при $P=100$ атм. (технология для 700 атм требует дальнейшей проработки)
Сжиженный водород в баллонах, $\text{LH}_2$	$P_{\text{max}}=16,5$ атм. ( $t=-253$ °С)	1,5 % (бак ТС) – 0,7 % ВАЦ - 0,06 % (резервуар 20 тыс. м <sup>3</sup> )/день	71 кг/м <sup>3</sup> , однако 30-50 % запасенной энергии затрачивается при сжижении с необходимостью высокоэффективной термоизоляции
Твердое сорбированное состояние			
Физическая абсорбция в материалах с высокой удельной поверхностью (углеродные нанотрубки, фуллерены и т.п.)	Для материалов $S_{\text{уд}}$ 2-3 *10 <sup>3</sup> м <sup>2</sup> /г $P=15-40$ атм и 20-50 °С	Подлежит изучению	30-100 кг/м <sup>3</sup> , однако углеродные нанотехнологии пока слабо воспроизводимы (в т.ч. и в отношении водорода)
Химическая адсорбция (интерметаллические соединения – бинарные, ионные и металлогидриды, ковалентные соединения с неметаллами и т.п.)	$P=1-4$ атм, $t=20-180$ °С	Хранение до 100 дней	150 кг/м <sup>3</sup> (максимально достижимый результат), 40 кг/м <sup>3</sup> (устойчиво работающие образцы)

На практике возможны комбинации форм хранения - криогенные сосуды высокого давления с  $t \ll 100$  °С и т.п., а также т.н. шугообразный водород ( $\text{Slush LH}_2$ ) или смесь жидкого и газообразного водорода в т.н. эвтектической точке равновесного состояния веществ с двумя различными кристаллическими решетками (используется воздушном и космическом транспорте). По-сути, формами хранения могут быть все водородосодержащие соединения (метан, вода, этанол и т.п. с энерго-плотностью до 100 кг/м<sup>3</sup>), однако общая эффективность реакций пока не всегда приемлема для реализации.

Сжатые и сжиженные формы предусматривают дальнейшую ре-газификацию и использование в т.ч. в составе смесевых топлив для ДВС, тогда как топливные элементы (ТЭ) могут содержать водород в твердом сорбированном состоянии с применением мембран для обеспечения выделения энергии и образования воды, т.е. служить как средством хранения водорода, так и формой получения энергии.

Из анализа информации, приведённой в табл. 3 следует, что с точки зрения минимальности потерь и степени проработанности технологии наиболее приемлемым при текущем уровне развития является использование смесевых топлив при развитой системе трубопроводной доставки, позволяющих даже при небольших концентрациях водорода существенно (10-ки %) снизить воздействие на окружающую среду и повысить потребительские характеристики ТС при доступности самого источника энергоресурсов. При этом наличие парка водородных ТС с тем или иным выделенными в табл. 3 способами хранения и применения и определяет среднее расстояние между соседними ЗС ( $rd_{cp}$ ).

Безопасность в связи с высокой летучестью водорода, вызывающей существенные потери, взрывоопасные в пределах 4-70 %, а также сложной технологией для всех форм и агрегатных состояний и наличием нижнего предела времени заправки (1 кг/мин), уменьшение которого приводит к дополнительному нагреву, по ГОСТ Р 55226—2012/ISO/TS 20100:2008 обеспечивается путем:

- расположения объектов и их компонент с минимизацией риска для потребителей и персонала ЗС и находящихся рядом объектов;
- учета всех потенциальных опасностей и рисков в условиях мест расположения и условий эксплуатации ЗС (в том числе и возможные неисправности, неправильное использование оборудования и т.п.);
- для снижения пожаро- и взрывоопасности должны поочередно предприниматься следующие меры - 1) предотвращение образования горючих или взрывоопасных смесей и снижение потенциальной силы взрыва для взрывоопасных сред при потенциальных утечках или выбросах; 2) устранение источников возгорания; 3) проведение мероприятий по уменьшению ущерба в результате пожара или взрыва;

- при проектировании и монтаже сведение к минимуму количества соединений и возможных мест утечки или выбросов атмосфере;
- избегания структур, где существует вероятность образования взрывоопасной среды в замкнутом или ограниченном пространстве (в т.ч. ТРК без навеса или с таковым, исключая скопление водорода в скрытых полостях, наружное расположение компонент оборудования, огнестойкость зданий и сооружений не менее 90 мин. и т.п.);
- для любой нештатной ситуации, которая в том числе может возникнуть при имеющихся средствах противодействия (обнаружения, отключения, вентиляции и т.п.) должны быть определены меры локализации и ликвидации.

Основные современные тенденции (2018 -20 гг) развития сетей ВЗС и задачи, необходимые для решения, могут быть представлены следующим образом:

- стоимость производства 1 кг водорода (запас хода легкового автомобиля 80-90 км) 1,3-2,4 USD, что выше чем для ЖМТ, СУГ и ПГ;
- производительность имеющихся установок (3,5 кг/ч в варианте, «доступном» для домашних хозяйств по массо-габаритным и мощностным характеристикам и 13,5 т/ч для крупного НПЗ) не может обеспечить развитие ВТС без своего качественного да и количественного совершенствования;
- кроме того, известные решения для ВЗС в варианте Light Duty and Passenger cars (заправка сжатым водородом с P=700 атм, [17]) рассчитаны на 20-180 транзакций в день (до полного бака для пробега 300-400 км), что при реализации, эквивалентной НП на уровне современных АЗС (10 т/сутки и более), в 3-8 раз (по числу транзакций в 2-10, в зависимости от вида АЗС и ВЗС) меньше характеристик обычных современных АЗС (больших и малых, 1200-1300 и 150-250 транзакций в сутки) с точки зрения производительности оборудования и выработки водорода;
- стоимость строительства ВЗС выше, чем АЗС и сравнима с АГНКС на КПГ (в 2010 г. ВЗС - 2 млн. ЕВРО, в 2015 производство электролизом непосредственно «на месте» 3,5 кг/ч – 2,8 млн ЕВРО, причем ~ 50 % энергии затрачивается на само производство данного вида газа);
- необходимость построения макро-системы, увязывающей нефтехимическую и транспортную отрасли и включающую сеть ВЗС как часть;
- виду схожести факторов, определяющих функционирование и развитие исследуемой системы, с присущими сетям распределения КПГ (СПГ), на первом этапе целесообразно принять нормативно-планировочные решения для данного вида объектов [17].

## Заключение

1. Водород является наиболее перспективным и, вместе с тем, наименее развитым источником энергии, в том числе и для транспорта, и идеальным целевым состоянием для ТЭЖ в целом.
2. В связи со схожестью основных производственных процессов со сферой переработки и сбыта ископаемых топлив и наличием развитой инфраструктуры производства и применения последних целесообразно их использование с постепенным переходом от АТС с ДВС к водородо-мобилям на смесевых топливах, действующих структур сетей ЗС, взаимосвязанных программ развития различных отраслей промышленности (электро-энергетики, газового хозяйства и т.п.).
3. Виду многообразия форм применения водорода как топлива - жидкое, газо- и шуго-образное и в топливных элементах – и систем его производства и доставки для практического применения требуются модели структур и алгоритмы управления с учетом конкретных условий среды функционирования и факторов развития (парка водородо-домобилей, показателей источников генерации, вида логистических схем и т.п.), которые определяются доступностью технологий на средне- и долгосрочных периодах управления с учетом необходимых масштабы внедрения, совместного построения управляющей и управляемой систем и т.п.
4. Исходя из аналогии с системами обеспечения иными моторными топливами (нефтепродуктообеспечением и газоснабжением), возможно и целесообразно применения ранее созданных моделей и методов, актуализированных на рассматриваемую предметную область.
5. В частности, для РФ, наряду с апробацией иных методов генерации водорода (и в целом всего многообразия альтернативных и возобновляемых источников энергии) одним из вариантов может явиться использования развиваемой в настоящее время сети АГНКС для снабжения потребителей компримированным природным газом, как обладающей большинством

- необходимых условий – доставка метана (как основного сырья для производства водорода на предприятиях нефте-химического комплекса) или смесового топлива, включенность объектов в действующую транспортную систему, наличие достаточных энергетических мощностей и формируемого потока транспортных средств и т.п
6. Возможные периоды достижения целевого состояния (10 % водородо-мобилей и более от общего парка автотранспортных средств) сегодня могут составлять два инвестиционных цикла для окупаемости инфраструктуры ДВС и иных альтернативных и возобновляемых источников энергии.
  7. Представленные информационно-логические схемы носят достаточно общий характер и нуждаются в уточнении по мере апробации и развития системы и среды функционирования и получения новых знаний о них, при этом натурное моделирование и опытно-промышленная эксплуатация элементов водородно-транспортных систем крайне важны уже сейчас.

## Литература

1. Зоря Е.И., Лошенкова О.В, Китаилов Ю.Н. Нефтепродуктообеспечения. Традиционные и альтернативные топлива. - М.: Издательский центр РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина, 2012. – 525 с.
2. Zheng Li and others. Hydrogen infrastructure design and optimization: a case study of China / International journal of Hydrogen energy, 33 (2008), 5275-5286.
3. Водородная экономика: путь к низко-углеродному развитию. М: Сколково, 2020 г.
4. О. Е.Аксютин, А.Г.Ишков, В. Г.Хлопцов, В.А.Казарян, А.Я.Столяревский. Концепция крупномасштабного развития инновационных систем производства и распределения метано-водородного топлива как эффективного альтернативного энергоносителя // World Gas Conference, Kuala Lumpur, 2012/
5. Безродный А.А. Методология построения и совершенствования структур сетей автозаправочных станций. Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. Т. 1. № 1 (52). С. 128-136.
6. О.К. Алексеева, С.И. Козлов, В.Н. Фатеев. Транспортировка водорода/ Транспорт на альтернативном топливе/ № 3 (21) июнь 2011. С. 18-24.
7. Marta Moreno-Benitoa, Paolo Agnoluccib, Lazaros G. Papageorgioua. Towards a sustainable hydrogen economy: Optimisation-based framework for hydrogen infrastructure development// Computers and Chemical Engineering 102 (2017) 110–127
8. Безродный А.А. Размещение автозаправочных станций в малом городе / А.А. Безродный, Ю.Ф. Белов, Р.В. Новиков // Информационно-вычислительные технологии и их приложения: сб. статей IV Рос.-укр. науч.-техн. и метод. симпозиума. – Пенза: РИО ПГСХА, 2006. – С. 10-18.
9. Безродный А.А., Резчиков А.Ф., Цвиркун А.Д. и др. Построение структур систем управления сетями обеспечения транспорта водородным топливом /представлено на MLSD-2021, под общей редакцией С.Н.Васильева, А.Д.Цвиркуна.
10. Цвиркун А.Д. Основы синтеза сложных систем / А.Д. Цвиркун. – М.: Наука, 1975. – 432 с.
11. Резчиков А.Ф. Структуры автоматизированных систем управления энергетикой промышленных предприятий: в 2 т. / А.Ф. Резчиков. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1983.
12. Методика определения потребности и размещения АЗС в отдельном экономическом районе / под ред. Ф.М. Кантора. – М.: Госкомнефтепродукт РСФСР; НПО АЗТ, 1980. – 96 с.
13. А.А. Безродный, А.Ф. Резчиков. Модели структур и алгоритмы управления автозаправочными станциями. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2004. 249 с.
14. Alexey Anatolievitch Bezrodny, Anatoliy Mikchailovitch Korolenok, Aleksandr Fedorovitch Rezchikov. Algorithms of Cause-and-effect Approach to Increase Service Net Efficiency, Engineering and Applied Sciences. Vol. 5, No. 2, 2020, pp. 34-40. doi: 10.11648/j.eas.20200502.11
15. Ключевой элемент ННЗ – водород. Thyssen Krupp Industrial Solutions. С 1-9. [www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com](http://www.thyssenkrupp-industrial-solutions.com)
16. Standard Hydrogen Refuelling Station Datasheet. [www.haskel.com](http://www.haskel.com).
17. Нормативно-планировочные решения АГНКС ВИНК.