

## **ЭНЕРГЕТИКА ТРАНСПОРТА НА ОСНОВЕ ПРИОРИТЕТОВ ПРИРОДЫ**

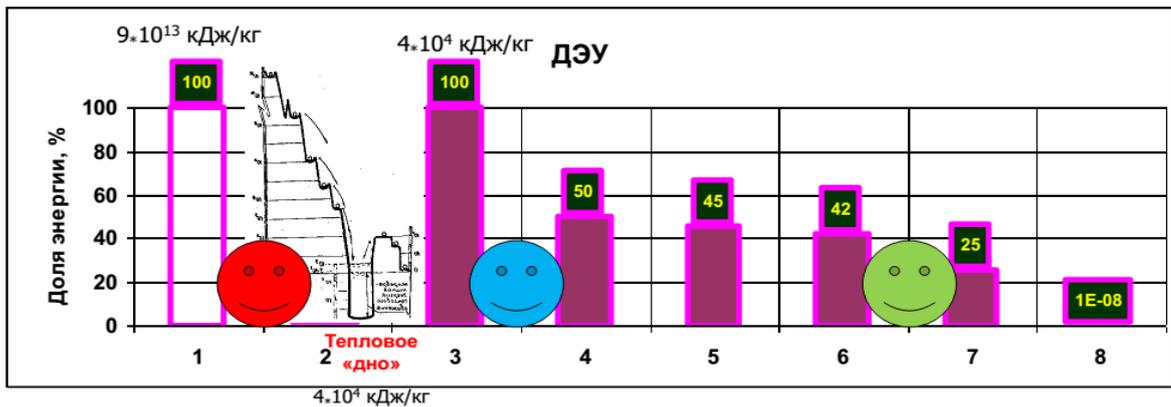
Современная цивилизация переживает острейший кризис, обусловленный, в том числе техногенезом, который при сохранении «статус-кво» неизбежно приведет к крупномасштабным экологическим потрясениям. Осознание этого звучит с самых высоких трибун. Так, на Генеральной Ассамблее ООН по энергетике её (ООН) генеральный секретарь это выразил следующим образом: «Мы (человечество) стоим на перепутье. Одна дорога ведет в пропасть, другая – к созданию более устойчивого, процветающего, стабильного мира. И наш выбор должен быть ясен». Говоря эти слова, генеральный секретарь ООН, прежде всего, имел в виду транспорт, поскольку, как известно, экономика развитых стран на 70% зависит от эффективности транспорта и его энергетики.

Будущее энергетики транспорта неразрывно связано с тенденциями развития мировой энергетической системы. И здесь по-прежнему царствуют нефть, уголь и газ. На транспорте их доля превышает 95%.

Долгосрочные прогнозы мирового энергопотребления свидетельствуют о том, что ископаемых энергоресурсов достаточно, по крайней мере, на текущее столетие. То есть, в обозримой перспективе ресурсный кризис энергетике не грозит, а вот эколого-энергетический кризис вполне реален.

Действительно, человечество, сжигая углеводороды, обрекает себя на гибель, прежде всего от загрязнения окружающей среды (воздуха, воды и почвы), поскольку каждый энергетический объект – это не только генератор энергии, но и источник большого количества различного рода выбросов. Только углекислого газа ежегодно выбрасывается до 30 млрд. тонн. Из них менее половины природой «усваивается», а остальное накапливается. То есть, к настоящему времени природа утратила способность самоочищаться и при сохранении современной парадигмы энергообеспечения рано или поздно накапливаемое количество выбросов приведет к качественным климатическим изменениям и экологической катастрофе планетарного масштаба. Причем доля транспорта в этом непропорционально велика (до 45% (в мегаполисах до 90%) при энергопотреблении около 20%) и связано это в том числе с тем, что в отличие от стационарной энергетики транспортная энергетика имеет дополнительное специфическое звено движитель, где и производится конечное преобразование энергии в перемещение транспортного средства.

На рисунке 1 представлены энергетические цепи двух транспортных энергетических установок: дизельной (ДЭУ) и ядерной (ЯЭУ). Зеленым кружочком обозначен движитель. Обе эти установки, как впрочем, и все остальные традиционные установки, являются установками теплового дна, так как в них преобразование энергии топлива в механическую энергию производится через промежуточное преобразование в энергию наиболее низкого качества – тепловую энергию путем сжигания топлива (красный кружок). Как известно, выделяемая при этом тепловая энергия, например, при сжигании углеводородного топлива составляет миллионные доли процента ( $4 \cdot 10^4$  кДж/кг) энергии его аннигиляции ( $9 \cdot 10^{13}$  кДж/кг). Далее тепловая энергия с помощью теплоносителя (привычнее рабочего тела) в тепловом двигателе (синий кружок) преобразуется обычно во вращательное движение, доля которой от теплоты обычно менее 50%. То есть оба эти процесса архи неэффективны и сопровождаются загрязняющими атмосферу выбросами. На рисунке эти процессы показаны в виде ущелья, на дне которого не вода, а тепловая энергия. Не сложно заметить, что правый берег, символизирующий получаемую вращательную энергию, значительно меньше левого, который символизирует энергию аннигиляции топлива.



1- ТОПЛИВО; 2- СГОРАНИЕ; 3- рабочее тело (теплоноситель); 4- после ТЕПЛООВОГО ДВИГАТЕЛЯ; 5 - электроэнергия; 6 и 7- до и после ДВИЖИТЕЛЯ; 8 - перемещение транспортного средства от энергии аннигиляции топлива.

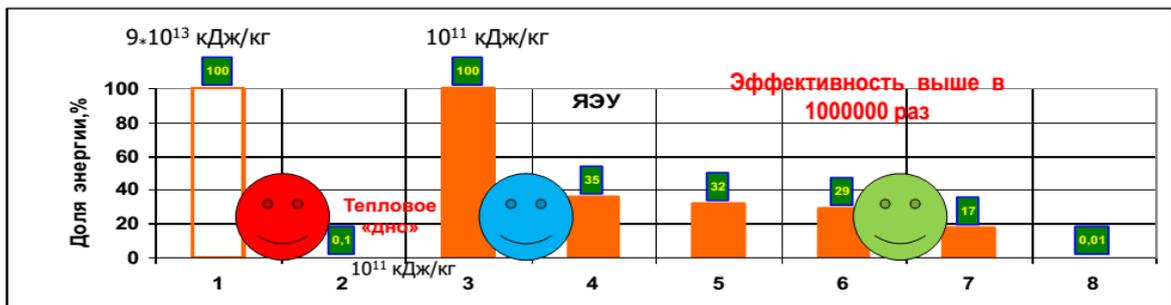


Рисунок 1. Энергопреобразования транспорта

Собственно будущее транспортной энергетики и определяется прогрессом в развитии отмеченных ключевых звеньев (технологий): энергоисточника (привычнее топлива), процесса извлечения энергии и образования теплоносителя (сжигания), преобразования энергии теплоносителя во вращательное движение и конечное преобразование в перемещение транспортного средства.

Что касается энергоисточника и процесса извлечения энергии. Об их значимости свидетельствует тот факт, что замена углеводородов, например, на ядерное топливо, а процесса сжигания на распад урана повышает эффективность транспортной энергетики почти в миллион раз. Казалось бы – вот оно решение! Однако, эксплуатационных проблем у ядерных установок с учетом радиоактивности их отходов (около 20 тонн в год на каждый ГВт мощности) в чем-то даже больше, чем в частности у дизельных.

Основные тактические пути выхода из грядущего эколого-энергетического кризиса – это:

- всемерное энергосбережение, включая повышение эффективности составляющих энергетических установок, использование менее энергоёмких производств и т.д;
- расширение использования более «экологически чистых» источников энергии, в частности газового топлива, электроэнергии (в т.ч. гидроэнергии), биотоплива, дистиллятных топлив и продуктов более глубокой переработки традиционных энерго-ресурсов;
  - стимулирование использования «экологически чистых» источников энергии;
  - ужесточение экологических стандартов, включая Киотские соглашения;
  - расширение использования нетрадиционных энергоресурсов, среди которых наибольшими потенциальными возможностями обладают солнечное излучение и дейтерий (изотоп водорода) для термоядерных реакторов.

Кардинальным же решением эколого-энергетических проблем, как на Западе, так и на Востоке во всех развитых странах (США, Японии, Китая, Европейское Сообщество) на

уровне государственных программ считается использование водорода. И это объяснимо, поскольку своим существованием человечество уже обязано энергии тех процессов, которые происходят с водородом на Солнце, а все традиционные и нетрадиционные (кроме ядерных) источники энергии – это концентрированная энергия Солнца. Неоспоримы преимущества водорода – экологическая чистота, высокая энергоёмкость (1 тонна  $H_2$  энергетически эквивалентна 4,1 тонн условного топлива), наличие неиссякаемого источника водорода - воды.

Ключевым моментом этих программ является то, что использование водорода, особенно в транспортной энергетике предполагается не в качестве топлива (по Д.И. Менделееву, топливо – это вещество (в данном случае водород), намеренно сжигаемое для получения тепловой энергии), а как энергоносителя (в данном случае носителя электронов). И, на мой взгляд, это вполне логично. Собственно так подсказывает сама Природа, особенно живая, где водород используется именно как энергоноситель (в частности человек на 63% состоит из водорода), а «технологической базой» реализации этого в живых организмах является биологический элемент, аналог которого в технике принято называть топливным элементом. Топливный элемент обеспечивают прямое преобразование химической энергии в электроэнергию (по существу в нем происходит выделение энергоносителя (потока электронов) путем диссоциации). Поэтому корректнее его именовать электрохимическим преобразователем (в дальнейшем будем применять и привычное, и более корректное наименование).

Наиболее привлекательными для транспортной энергетике считаются твердополимерные электрохимические преобразователи (ТПЭП). ТПЭП - самые распространенные и освоенные топливные элементы. Достоинствами их также является низкая рабочая температура ( $60-80^{\circ}C$ ), высокая маневренность и эффективность во всем диапазоне нагрузок.

Основные элементы топливных элементов - два электрода (анод и катод), помещенных в электролит (рисунок 2).

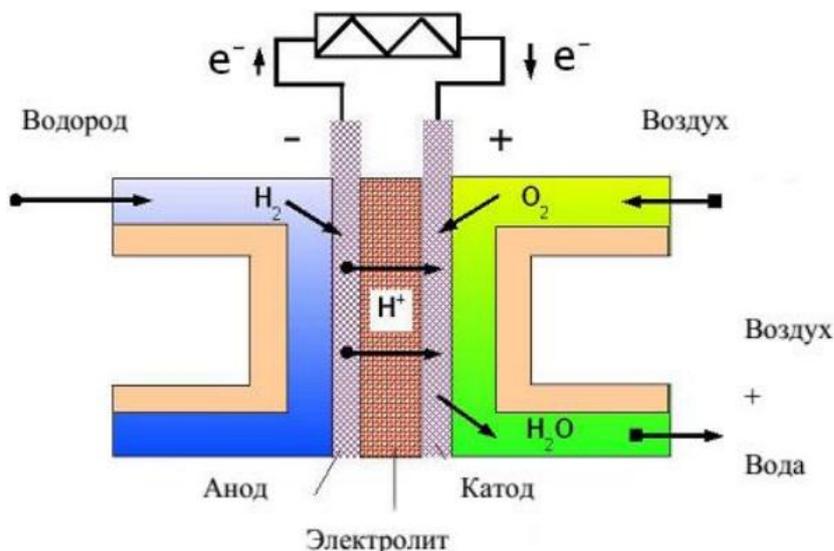


Рисунок 2. Схема водородно-воздушного электрохимического преобразователя

Электролит ТПЭП – полимерная мембрана типа Nafion, а анод и катод – пористая углеродная структура, которая для интенсификации процесса генерации (выделения) энергоносителя (потока электронов) покрывается платиновым катализатором. Электрическая энергия в ТПЭП генерируется до тех пор, пока на анод поступает водород, а на катод – кислородосодержащее вещество (кислород или атмосферный воздух). Топливные элементы не имеют движущихся частей. Их КПД может быть значительно больше, чем у дизеля. «Побочные» продукты реакций в ТПЭП - пресная вода и теплота,

которые могут быть утилизированы на бортовые нужды. В результате получается замкнутая энергосистема «нулевого» выброса, консолидированный КПД которой может достигать 90-95%. На базе топливных элементов (за счет их последовательно-параллельного соединения) создаются модульные электрохимические установки (ЭХУ), которые по экологической чистоте превышают все существующие энергоустановки на два-три порядка.

Слабым местом в транспортной водородной энергетике являются системы бортового обеспечения водородом, которые могут быть двух видов: аккумулирования (хранения) и бортового получения.

Бортовое аккумулирование водорода может быть в трех состояниях: сжатом, сжиженном и связанном. Как известно, в Природе водород существует только в связанном состоянии. В связи с этим более естественны системы бортового обеспечения водородом из связанного состояния, в частности из состава интерметаллидов, например, на основе композиции лантана с никелем ( $\text{LaNi}_5$ ) и наноструктур. Интерметаллидная система считается самой безопасной из систем хранения. Однако массовая водородоёмкость её пока низка (1,8% при приемлемой не менее 6,5%). Наноструктурное хранение считается перспективным, но пока мало изучено.

Из систем бортового получения водорода классический способ – электролиз воды. В настоящее время в частности разработкой компактных электролизеров с твердотелом полимерным электролитом занимается РНЦ «Курчатовский институт» и достиг определенных успехов (удельные затраты энергии снижены с 4 до 1 кВт·ч на кубометр  $\text{H}_2$ ). Однако пока себестоимость электролизного водорода в несколько раз выше, чем водорода из природного газа. В связи с этим основной способ (на 95%) централизованного получения водорода – это конверсия природного газа. Дальнейшее его развитие связывается с разработкой Федеральным ядерным центром менее дорогих и более производительных палладиевых мембранных технологий, обеспечивающих получение водорода с чистотой не ниже трех девяток (99,9%).

Среди других способов бортового получения водорода перспективен гидролиз определенных металлов и особенно их гидридов (ГОСТ Р 54114-2010 "Передвижные устройства и системы для хранения водорода на основе гидридов металлов"). По совокупности свойств (электролит – нейтральный водный раствор, условия работы близки к нормальным, магний в листах не требует особых условий для хранения и т. д.) считается целесообразной система на основе магния с водородоёмкостью 8%. Эта система кроме водорода вырабатывает еще и электроэнергию, используя при этом воду и теплоту, выделяющихся при работе топливных элементов (рисунок 3).

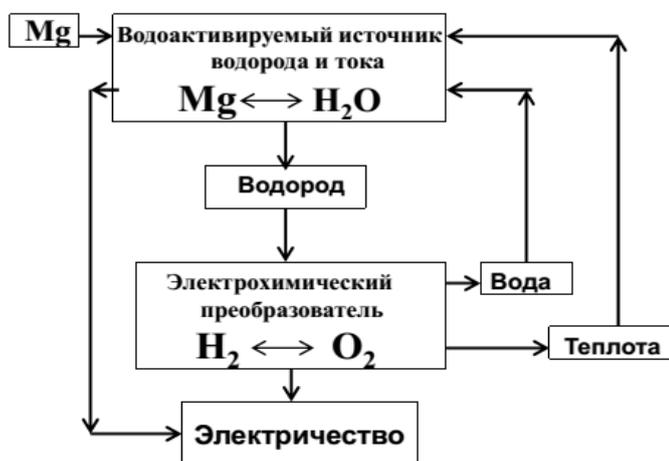


Рисунок 3. Комбинированная электрохимическая установка «нулевого» выброса замкнутого типа

В результате получается комбинированная ЭХУ «нулевого» выброса замкнутого типа, обладающая свойством саморегулирования (выработка водорода пропорциональна электрической нагрузке).

Понятно, что водородная модернизация транспортной энергетики - дело не одного десятилетия (например, программа ЕС рассчитана на 45-50 лет). В современных условиях, когда человечество находится на грани крупномасштабной экологической катастрофы, можно предполагать, что:

во-первых, модернизация энергетики, в частности транспорта неизбежна;

во-вторых, водородная модернизация энергетики транспорта не противоречит приоритетам Природы, которая, несомненно, за миллионы лет довела свои решения, в том числе и в энергетике, до совершенства;

в-третьих, в случае реализации упомянутых выше водородных программ к 2075 году (год двухсотлетия знаменитой фразы Жюль Верна: «Да, я уверен, что наступит день, и вода заменит топливо») традиционная энергетика автомобильного, железнодорожного и водного (речного и каботажного) транспорта на 95% будет заменена водородными технологиями прямого преобразования в виду архи «грязной» и неэффективной традиционной транспортной энергетики на основе тепловых двигателей. Как известно, тепловые двигатели по эффективности имеют предел (ограничения цикла Карно). Не случайно, несмотря на колоссальные усилия человечества КПД дизелей за их более чем 100-летнюю эпоху повысился лишь на 15-17 процентных пунктов. Можно предположить, что и за текущее столетие КПД дизелей будет повышен на эти же цифры. Однако этого недостаточно, так как использовать водород вторичный и по определению дорогой энергоноситель оправдано будет только в энергоустановках с кардинально (в разы) повышенной эффективностью.

Не менее актуальной для транспорта является проблема движителей, поскольку эффективность традиционных движителей порой значительно ниже, чем тепловых двигателей. На рисунке 4 представлена энергетическая диаграмма транспорта, которая характеризует в том числе и влияние эффективности движителя на удельные затраты энергии при транспортировке грузов.

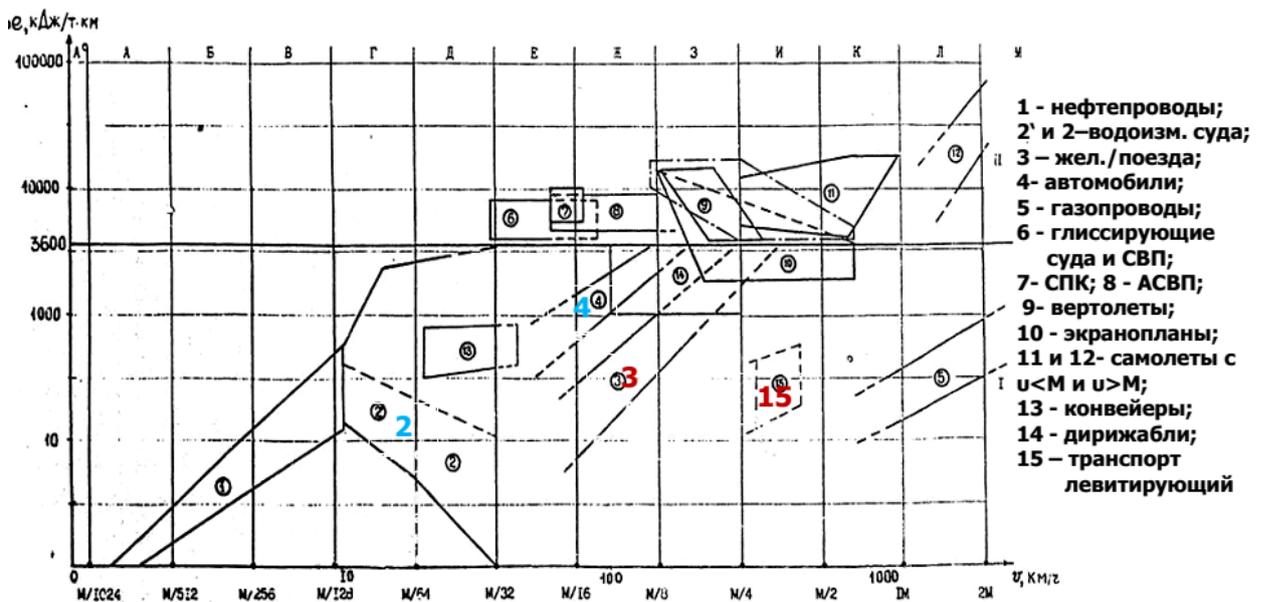


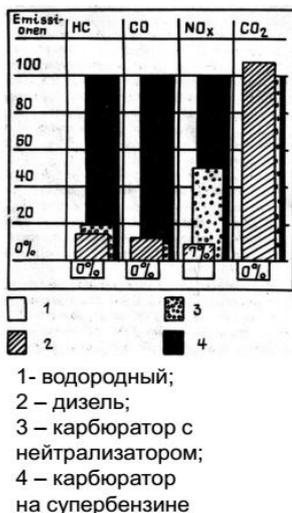
Рисунок 4. Энергетическая диаграмма транспорта

Например, из диаграммы следует, что удельные затраты автомобильного транспорта (он обозначен цифрой 4) почти на два порядка выше, чем у водного транспорта (цифра 2). Это в том числе и от того, что эффективность колеса – движителя автома-

шин (КПД менее 10%) почти на порядок меньше гребного винта – движителя судов. При этом следует сказать, что КПД гребного винта также не столь большой (как правило, менее 60%). То есть практически он «срезает» эффективность энергосистемы также почти наполовину. Не случайно Природа отвергает любые движители ротативного типа (винт, колесо). И в этом смысле весьма показательна замена колесных железнодорожных поездов (цифра 3) на поезда на магнитном подвесе (цифра 15), где движителем является тяговый линейный электродвигатель с развернутым статором. Это экологически чистый движитель и, что важно, прямого преобразования электроэнергии в перемещение транспортного средства. Его использование позволяет практически при тех же удельных затратах энергии (рисунок 4) повысить скорость транспортировки в 2-3 раза (скорость японского магнитного поезда – 580 км/ч, а китайского – 470 км/ч).

Существуют еще движители подобного типа (прямого преобразования) - это магнито-гидродинамический движитель (МГДД) с приоритетом от 1955 года и электродинамический движитель (ЭДД) с приоритетом от 1985 года. Для создания упора они используют силу Лоренца (эффект Флеминга), которая возникает в результате взаимодействия электрического и магнитного полей. МГДД был испытан на моделях в США и полномасштабных судах в Японии. Испытания подтвердили их преимущества перед гребными винтами, но эффективность его пока недостаточна (КПД проценты). Значительно выше эффективность ЭДД (КПД может достигать 80 и более %). Авторы электродинамического движителя утверждают, что ЭДД универсален (может работать в водной и воздушной среде и даже в вакууме), тяга его не зависит от скорости и что, несмотря на определенные технические трудности, электродинамический движитель найдет реальное применение в XXI веке.

Замена традиционной энергосистемы на систему технологий прямого преобразования позволит кардинально сократить количество энергопреобразований и соответственно свести к минимуму потери водородосодержащих ресурсов в транспортных энергоустановках. В результате только в части технического использования транспорта можно ожидать повышения экологической чистоты транспортных средств на несколько порядков, снижения энергоемкости транспортной работы в 2,5-2,7 раза и адекватную экономию углеводородов и воды (рисунок 5), что исключительно важно, поскольку проблема пресной воды на планете, пожалуй, еще более острая, чем энергоресурсов.



### 1. Повышение экологической чистоты на несколько порядков

(NO<sub>x</sub> менее 0,01 г/кВтч; дизель 10-20 г/кВтч)

### 2. В 2,5 - 2,7 раза увеличить эффективность транспортной энергетики

### 3. Экономия углеводородных энергоресурсов и воды

(дизельный (ДЭУ), турбодизельный (ДТЭУ), газотурбинный (ГТУ), паротурбинный (ПТУ), электродвигатель (ЭДУ))

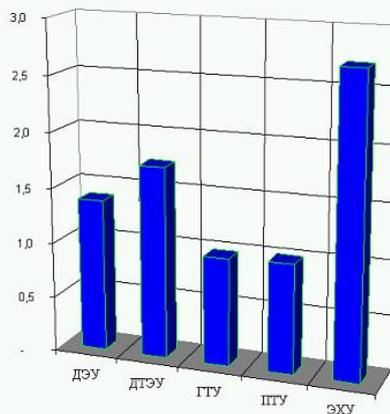


Рисунок 5. Эффективность модернизации энергетики транспорта на основе приоритетов Природы

Рассмотренная модернизация энергетики транспорта на основе приоритетов Природы в комплексе с интеллектуальными технологиями, которые в настоящее время все больше и больше завоёвывают земную цивилизацию, неизбежно приведет к концептуальным изменениям транспорта как такового. И некоторые его будущие черты уже просматриваются – это адаптивный круиз-контроль, беспилотный транспорт, интеллектуальные транспортные системы (уже сейчас в Сингапуре и в Южной Корее эксплуатируются подобные системы) и новые виды транспорта, например скоростной транспорт типа STRAUS.

Для приближения рассмотренного энергетического будущего транспорта рационально:

- максимально использовать имеющиеся достижения и возможности для развития технологий прямого преобразования и модернизации на этой основе энергетики и транспорта – естественных национальных приоритетов России географически и геополитически;
- разработку этих технологий в России рационально поставить на государственный уровень в рамках соответствующих национальных программ с разработкой технических регламентов, с подготовкой и переподготовкой интеллектуальных и управленческих кадров, а также специалистов по проектированию и эксплуатации;
- широко информировать специалистов и общественности об эколого-энергетических проблемах, возможностях и достижениях в их решении;
- постепенно прекратить использовать в крупных пунктах компактного проживания людей (для начала в качестве эксперимента, например, в Сколково) транспорт с двигателями внутреннего сгорания с заменой его на экологически чистые виды транспорта (в том числе и на транспорт на основе технологий прямого преобразования).

#### Литература

1. Баёв А.С. Энергетическая диаграмма транспорта / Материалы Всероссийской научной конференции «Параметры перспективных транспортных систем России». Москва, июнь 1994 г. М.: Институт проблем транспорта РАН, 1994.
2. Баёв А.С. Энергообеспечение речных судов: учебное пособие. С-Пб.: СПбГУВК., 1995.
3. Баёв А.С. Энергетика в XXI веке /Сборник научных трудов СПбГУВК «Судостроение и судоремонт». С-Пб.: ИПЦ СПбГУВК, 1999.
4. Баёв А.С. Судовая энергетика в XXI веке// Морской вестник, 2003, № 2.
5. Баёв А.С. Перспективы судовой энергетики / Материалы научно-технической конференции «Кораблестроительное образование и наука -2005» 25-28 октября 2005 г. СПб.: ИЦ СПбГМТУ, 2005.
6. Баёв А.С. Будущее транспортной энергетики / Материалы научно-технического симпозиума «Актуальные проблемы и перспективы развития Северо-Запада». Санкт-Петербург, 19 декабря 2005 г. СПб.: ИМЦ «НВШ-СПб», 2006.
7. Баёв А.С. Тенденции развития энергетики транспорта в XXI веке / В книге «Интеллектуальные ресурсы интеграции»: материалы российско-белорусского форума. Минск, 15 мая 2006 г. Вып.1/ Под ред. П.А.Витязя и др. Сыктывкар, КРАГСиУ, 2007.
8. Баёв А.С. Энергетика транспорта XXI века / Материалы Международной научной конференции «Актуальные проблемы науки и образования». Москва, Российская Академия Наук, 21.05.2015 г. URL: <http://econf.rae.ru/article/9700>.
9. Баёв А.С. Транспортная энергетика в XXI веке / Материалы Международной научной конференции «Энергетика: проблемы, решения». Москва, РАЕ, 14.11.2016. URL: <http://econf.rae.ru/article/10273>.
10. Баёв А.С. Интеллектуальные технологии судовой энергетики / Материалы Всероссийского межотраслевого научно-технического форума «Корабельная энергетика: из прошлого в будущее». Санкт-Петербург, СПбГМТУ, 16-17.02. 2017 г.
11. Баёв А.С. Будущее энергетики транспорта / Материалы доклада на семинаре по энергетике. Санкт-Петербург, Дом ученых им. М.Горького Российской Академии Наук, 23 мая 2017 г. URL: <http://bas49.ucoz.ru/load/0-0-0-65-20>
12. Скоростной транспорт STRAUS. [www.straus.group](http://www.straus.group).

02 июня 2017 г.