

Обоснование возможности использования водорода в качестве хладагента в гиперскоростных транспортных средствах

УДК 62-6

Юницкий А.Э.^{1,2},
доктор философии транспорта

Гаранин В.Н.^{2,3},
кандидат технических наук

Янчук В.В.^{2,4}

¹ ООО «Астроинженерные технологии»,
г. Минск, Беларусь

² ЗАО «Струнные технологии»,
г. Минск, Беларусь

³ Белорусский государственный технологический университет,
г. Минск, Беларусь

⁴ Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Беларусь





Уделено внимание способу аккумулирования тепла при работе гиперскоростных транспортных средств (ГТС) в разреженной среде и вакууме. Представлено обоснование создания установки активной тепловой защиты (утилизатор тепла) и выбора хладагента по критерию массы и его удельной стоимости. Приведена методика расчёта стоимости задействования различных видов хладагентов в зависимости от режимов функционирования ГТС. Проанализировано использование водорода в качестве хладагента. Обозначено направление совершенствования конструктивного исполнения водородного утилизатора тепла и возможности его применения на ГТС.

Ключевые слова: вакуум, водород, гиперскоростное транспортное средство (ГТС), масса, оценочная единица, транспорт, утилизатор тепла, хладагент.



Введение

С развитием технологий все процессы в современном мире становятся более стремительными. Не является исключением и перемещение людей и грузов. Мировые транспортные компании регулярно предлагают новые разработки с улучшенными характеристиками, которые решают проблему скорости и экономичности передвижения [1, 2], а следовательно, повышают уровень и качество жизни, способствуют экономическому развитию. В настоящее время вопрос увеличения скорости транспортных средств (ТС) рассматривается как в рамках городских транспортных систем [3], так и в междугородных и межрегиональных железнодорожных и автомобильных сообщениях [1, 4, 5].

Одно из решений для повышения скорости наземного транспорта – создание гиперскоростных транспортных комплексов, предусматривающих движение ТС в разреженной среде в герметичных тоннелях. Такой подход позволяет снизить сопротивление среды движению и сократить используемые мощности двигателей, а также затраты энергии на движение в целом.

Классические системы охлаждения ТС основаны на переносе тепловой энергии от источника тепла (двигатель, электрооборудование, человек и др.) к радиатору для её рассеивания за счёт обдува набегающим потоком воздуха. В условиях отсутствия достаточного количества набегающего воздуха (например, при движении ТС в газовой среде с высоким разрежением) процесс передачи тепла конвективным способом во внешнюю среду представляется затруднительным. При движении ТС в полном вакууме (в частности, в космосе) данный процесс становится невозможным. Сложная зависимость количества отведённой энергии от параметров окружающей среды и скорости движения ТС не позволяет с высокой степенью точности оценить работоспособность конвективной системы охлаждения машин, эксплуатируемых на разных скоростях на Земле и в космосе. В таких непривычных условиях на скоростях выше 1000 км/ч функционирует и гиперскоростное транспортное средство (ГТС). Следовательно, использование конвективных систем охлаждения неэффективно; здесь необходимо рассматривать другие способы отвода тепла (например, за счёт его излучения или автономного преобразования в другой вид энергии). В качестве варианта охлаждения ТС в разреженной среде предлагается устройство бортовых тепловых преобразователей и возможность их перезарядки на конечных станциях.

Обоснование использования водорода в качестве хладагента

При движении любого ТС выделяется тепло; его количество зависит от коэффициента полезного действия (КПД) используемых систем, а также от сил сопротивления, которые необходимо преодолевать. Повышение КПД и снижение сил сопротивления движению – одно из направлений решения проблемы тепла при функционировании ТС.

В процессе работы наземного ТС значительная доля мощности двигателя расходуется на преодоление аэродинамического сопротивления воздушной среды и сопротивления качению колёс. Уменьшение данных параметров повысит экономичность движения ТС. В ряде случаев для снижения сопротивления движению применяется магнитная левитация [6, 7]. Такой метод позволяет приподнять ТС над дорожным полотном за счёт действия электромагнитного поля. Дополнительным положительным эффектом указанной технологии является низкий уровень шума при движении. Отрицательная сторона – высокие капитальные и эксплуатационные затраты [8, 9], а также недостаточно высокий КПД электромагнитных левитирующих систем (ниже, чем у стального колеса).

Второй способ сокращения затрат энергии и средств на движение – уменьшение лобового сопротивления путём снижения давления среды. Суть концепции: ТС помещается в трубу, из которой откачивается воздух до желаемого значения разрежения. Описанный подход часто сочетают с магнитной левитацией [10]. Кроме того, существуют и другие теории о способе привода в движение транспорта в разреженной среде, например подача воздуха, который собирается перед лобовой частью ТС и после сжатия в компрессоре подаётся под нижнюю часть кузова ТС для его центрирования и исключения касания стенок тоннеля [11].

Изучая данное направление, следует обратить внимание на опыт разработки ГТС, представленного в изобретении [12], где решены указанные проблемы. Под ГТС понимается пассажирское или грузовое колёсное ТС, движущееся по путевой структуре, которая расположена в тоннеле, выполненном в виде герметичной трубы и заполненном водородом под пониженным давлением.

При проектировании ГТС встаёт значительное число вопросов, ранее не рассмотренных в контексте транспортных комплексов. В частности, при движении ТС в разреженной среде неизбежно возникают затруднения с отводом теплоты от двигателя, источника энергии, системы вентиляции

и кондиционирования салона (тепловыделение пассажиров и бортовых систем).

Самый простой и распространённый способ охлаждения технических устройств – самовентиляция. То есть охлаждение происходит за счёт набегающего воздушного потока, интенсивность которого практически не регулируется. Увеличить её можно в результате применения принудительного воздушного охлаждения – путём установки дополнительного вентилятора [13].

В условиях разрежённой среды такой способ неэффективен, так как её плотность снижается пропорционально давлению, соответственно, уменьшается количество воспринимаемой теплоты при тех же параметрах. Хотя тоннель заполнен водородом [12], который имеет значение коэффициента теплопроводности значительно выше, чем воздух, возникает необходимость охлаждения самого тоннеля для предотвращения перегрева среды.

Для уменьшения габаритов системы охлаждения при той же тепловой мощности возможно использование жидкостного охлаждения – традиционной радиаторной системы, теплоту от которой следует также отводить в окружающую среду [14], что при данных условиях неприменимо. Дополнительные требования к системе отвода теплоты для ТС, движущегося в вакууме: минимально возможные масса и объём системы, что влияет на массу и объём самого ТС.

Так как в разрежённой среде нет возможности отводить теплоту в окружающее пространство, предлагается организовать на борту аккумулятор холода с ёмкостью, достаточной для поглощения теплоты, которая выделяется за одну поездку между конечными станциями. Согласно законам термодинамики вещество способно поглощать максимальное количество теплоты в процессе фазового перехода (испарение и плавление). На данное утверждение стоит обратить внимание при разработке систем испарительного или плавительного охлаждения, показывающих наибольшую эффективность при максимальной компактности [15].

Следует также учитывать, что в некоторых системах предварительная подготовка топливной смеси (для улучшения КПД двигателей) связана с аккумулярованием лишней энергии тепла, т. е. полезная энергия берётся из тепла, которое необходимо отводить. Так, существуют грузовые автомобили, использующие в качестве источника энергии сжиженный азот или сжиженный воздух. Указанные вещества, предварительно испаряясь, поглощают определённое количество теплоты, а затем

направляются в поршневой двигатель и обеспечивают движение ТС с улучшенным КПД. Значит, одно и то же вещество применяется не только для приведения ТС в движение, но и для охлаждения двигателя, бортовых систем и рефрижераторного отсека (для специализированных автомобилей) [16, 17].

Кроме того, данный подход описан в концепции охлаждения капсулы, движущейся в тоннеле на магнитной левитации (проект Hyperloop Alpha [18–20]), где используется охлаждённый до $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$ гелий (перевозится на борту в жидком состоянии). По концепции Hyperloop подаваемый под капсулу воздух после сжатия в компрессоре охлаждается водой в фазовом переходе. Полученный водяной пар сохраняется на борту ТС до конца поездки, затем ТС перезаправляется.

Для решения определённых задач получили распространение твёрдые аккумуляторы фазового перехода, а именно льдоаккумуляторы, которые широко применяются в пищевой промышленности, наиболее часто – в молочной [21]. В таких аккумуляторах возможно взаимодействие не только льда, но и других хладагентов: фреонов, водных растворов гликолей, водных растворов солей.

Следует обратить внимание на создание системы охлаждения в летательных аппаратах [22]. В частности, предлагается принудительное охлаждение, так называемые системы активной теплозащиты (САТ). В [22] водород используется сначала в качестве хладагента (водород непосредственно нагревается в рубашке охлаждения или отдельно охлаждает жидкометаллический теплоноситель), а затем в нагретом виде направляется для совершения полезной работы в электротурбогенераторе и ракетном двигателе. Однако в указанном исследовании не обращается внимание на состояние водорода до нагрева. С точки зрения эффективности применения хладагента по массе водород лучше задействовать для нагрева в жидком состоянии. Решение проблем безопасности – второй этап развития данного направления, что может послужить темой следующей работы.

Исходя из вышесказанного, важно рассматривать систему охлаждения ТС не в качестве простого средства аккумулярования холода, а как более сложный процесс утилизации тепла, предполагающий не только аккумулярование тепла, но и его преобразование и дополнительное использование для ГТС.

Источником энергии для движения ГТС по тоннелю может выступать накопитель электрической энергии (аккумуляторы электроэнергии), контактная сеть или водородный

топливный элемент (ТЭ), вырабатывающий необходимую энергию непосредственно на борту ТС [12] (рисунок 1).

При движении в вакууме невозможно осуществить отвод тепла во внешнюю среду, соответственно, на борту ТС нужно иметь накопитель энергии, способный поглотить всю выделяемую в процессе поездки теплоту. В данной работе в качестве хладагентов рассмотрены лёд, сжиженный водород, сжиженный кислород, а также система «сжиженный водород – сжиженный кислород» в соотношении расходов, которые обеспечивают непрерывное функционирование водородного ТЭ, вырабатывающего воду в качестве вторичного продукта. Лёд выбран как достаточно широко и давно используемый в подобных целях хладагент. Водород после испарения и нагрева до рабочей температуры можно сбрасывать в тоннель, где предполагается водородная среда с пониженным давлением; избыток водорода будет непрерывно откачиваться насосами, предназначенными для поддержания требуемого давления. В системе «водород – кислород» два хладагента после испарения и нагрева до рабочей температуры применяются в водородном ТЭ, дополнительным веществом в процессе функционирования которого является вода.

Количество поглощаемой теплоты водородом и кислородом рассматривалось при их нагреве до конечной температуры 37 °С, что позволяет задействовать их в дальнейшем на питание ТЭ. Конечная температура нагрева расплавленного льда составляет 55 °С, так как вода используется только для поглощения теплоты и на борту ТС имеются источники тепловой энергии с температурой около 77 °С. Начальные значения параметров для каждого вещества различные, что определяет также сложность и энергозатраты при получении требуемых показателей хладагента перед загрузкой данного аккумулятора в ТС. Для водорода точка отсчёта – состояние насыщенной жидкости с температурой порядка -253 °С; для кислорода – состояние насыщенной жидкости при температуре -183 °С; для льда – два варианта: натающий

лёд при температуре 0 °С (лёд 0 °С) и переохлаждённый лёд при температуре -100 °С (лёд -100 °С).

Теплота, поглощаемая аккумулятором холода, воспринимается хладагентами в ходе многих процессов, которые стоит также отделять физически – установкой нескольких теплообменных аппаратов. Соответственно, температура рабочего тела системы охлаждения в них будет отличаться, что позволит получать холод различного температурного уровня для любых систем.

При задействовании льда 0 °С теплота расходуется сначала на перевод всей массы в жидкое состояние, затем на нагрев. Аккумулятор с переохлаждённым льдом будет дополнительно включать стадию нагрева льда от -100 °С до температуры плавления. В случае использования сжиженного водорода теплота станет поглощаться при его испарении, а затем при нагреве газообразного водорода до рабочей температуры. Аналогична ситуация и с сжиженным кислородом – потребуется два теплообменника. Наиболее сложной и массивной является система «сжиженный водород – сжиженный кислород», в которой необходимо два отдельных комплекта оборудования для параллельной работы водорода и кислорода, так как в дальнейшем предполагается их применение в ТЭ (рисунок 2).

В настоящей работе для сравнения теплоносителей выбран метод теоретического анализа эффективности использования определённых хладагентов – расчёт количества поглощённой теплоты и обработка полученных данных. Вычисления производились с учётом зависимости теплофизических свойств веществ от температуры на основании [23].

На рисунке 3 представлена зависимость поглощённой каждым хладагентом теплоты от температуры. Количество поглощённой теплоты приведено на 1 кг вещества; в случае системы «сжиженный водород – сжиженный кислород» – на 1 кг получаемой в результате реакции в ТЭ воды.

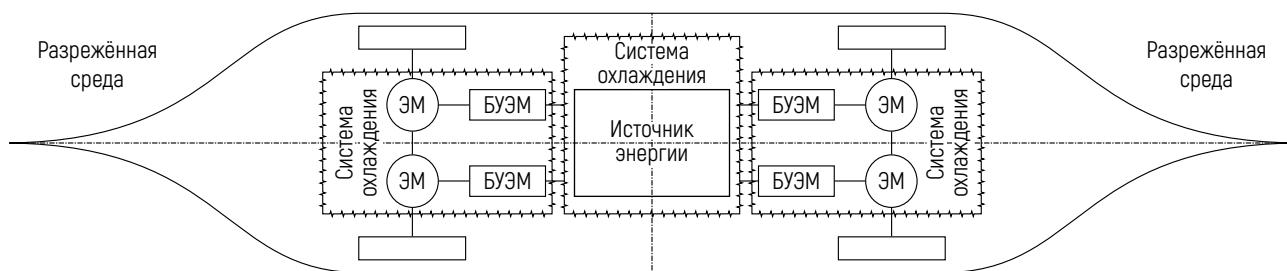


Рисунок 1 – Схема силовой установки ГТС:
ЭМ – электромотор; БУЭМ – блок управления электромоторами

Для заданных конечных температур 1 кг водорода способен поглотить наибольшее количество теплоты – 4150 кДж, чистый кислород (для сравнения) – 415 кДж, система «водород – кислород» – 830 кДж, лёд $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ и лёд $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ поглощают 709 кДж и 570 кДж соответственно (разница количества энергии обусловлена нагреванием льда от $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $0\text{ }^{\circ}\text{C}$) (рисунок 3). То есть одним из наиболее эффективных хладагентов (при их одинаковой массе) является сжиженный водород, который поглощает в пять раз больше теплоты, чем вторая по эффективности система на основе водорода и кислорода. Наименьшее количество теплоты из предложенных вариантов способен поглотить кислород при его испарении и нагревании до $36,85\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Генераторы тепловыделений в ГТС – силовая установка, состоящая из источника энергии и электродвигателя, а также система кондиционирования, мощность которой определяется тепловыделениями пассажиров и бортовой электроники. В качестве источника энергии может использоваться как электрический аккумулятор, так и водородный ТЭ (в соответствии с патентом [12]).

Рассмотрим для примера ГТС, время движения которого между конечными пунктами составляет 0,5 ч. ТС рассчитано на шесть пассажиров, механическая мощность двигателя равна 100 кВт, механический КПД двигателя – 90 %. Электрическая энергия подаётся на двигатель от ТЭ, который имеет электрический КПД 40 %. Мощность тепловыделения

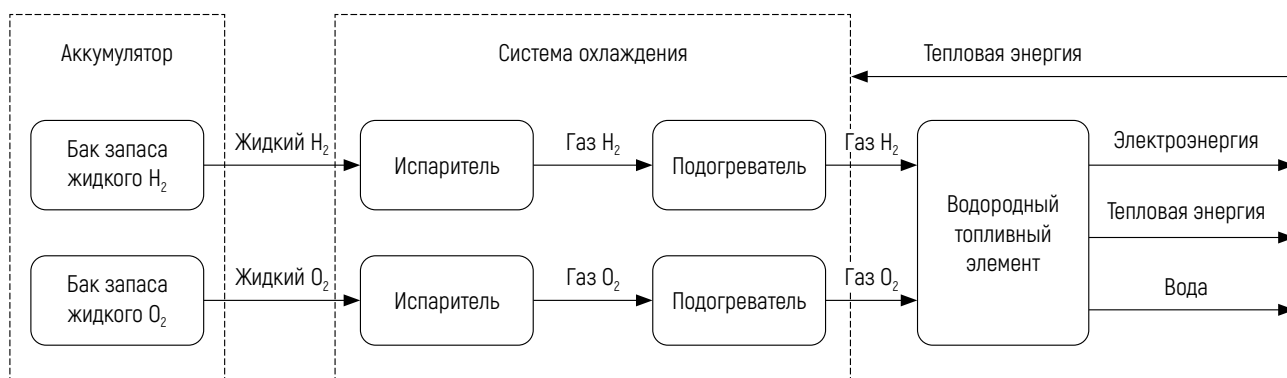


Рисунок 2 – Схема использования водорода и кислорода в качестве хладагента и источников энергии на борту ГТС

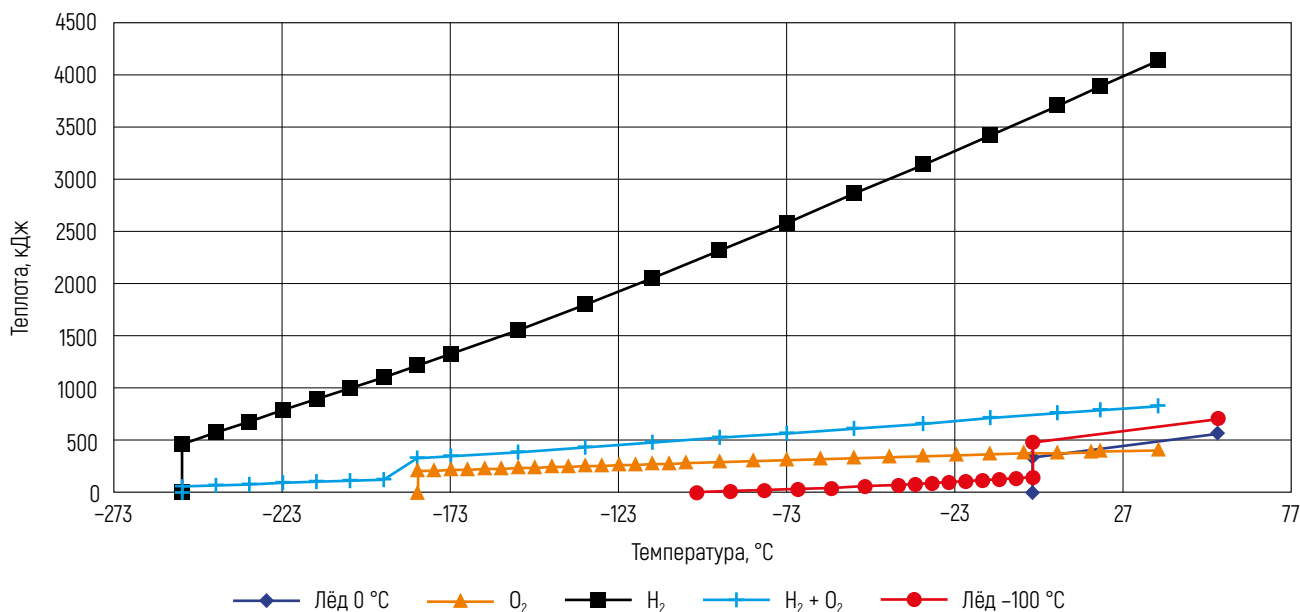


Рисунок 3 – Зависимость поглощаемой хладагентом теплоты от температуры

одним пассажиром в покое – 0,1 кВт. Мощность тепловыделений бортовой электроники – 1% от электрической мощности ТЭ. Схема тепловых потоков ГТС и их расчётные мощности представлены на рисунке 4.

Для рассматриваемого примера мощность теплового потока составляет 179,5 кВт; количество энергии, которую необходимо аккумулировать за время движения ТС: $179,5 \times 1,15 \times 0,5 = 103,2$ кВт·ч, или 371,52 МДж (1,15 – коэффициент, учитывающий запас мощности).

Далее выполним сравнение приведённых хладагентов по критериям массы вещества, а также по стоимости заправки на одну поездку. Масса системы является важным фактором, так как при значительном увеличении массы ТС возрастает мощность двигателя, а соответственно, и тепловыделение.

Система утилизации тепла должна обеспечивать полное поглощение теплоты, выделяемой другими системами. Уравнение теплового баланса можно представить в виде:

$$1,15 Q_{\text{отв}} = Q_{\text{ха}}, \quad (1)$$

где $Q_{\text{отв}}$ – теплота, которую необходимо отводить от силовой установки и системы кондиционирования, кДж;

$Q_{\text{ха}}$ – расчётная теплота для утилизации хладагентом, кДж.

Количество хладагента рассчитывается в зависимости от процесса, в котором последний поглощает теплоту: нагревание или фазовый переход.

При нагревании расход хладагента G (кг/с) обусловлен разностью температур в начале и конце процесса Δt и теплоёмкостью вещества при заданных температурах c_p :

$$G = \frac{Q_{\text{ха}}}{c_p \Delta t}. \quad (2)$$

Если вещество в процессе поглощения теплоты переходит из одного агрегатного состояния в другое, то его количество будет зависеть от теплоты фазового перехода r , которая является индивидуальной характеристикой вещества и определяется давлением:

$$G = \frac{Q_{\text{ха}}}{r}. \quad (3)$$

Для варианта с переохлаждённым льдом, когда вначале происходит его нагревание с изменением температуры на Δt^n , затем плавление и нагревание воды с перепадом температуры $\Delta t^в$, формула будет выглядеть следующим образом:

$$G = \frac{Q_{\text{ха}}}{c_p^n \Delta t^n + r + c_p^в \Delta t^в}, \quad (4)$$

где c_p^n – массовая изобарная теплоёмкость льда, кДж/(кг·°С); $c_p^в$ – массовая изобарная теплоёмкость воды, кДж/(кг·°С).

Из формул видно, что для повышения эффективности системы охлаждения необходимо выбирать хладагент с наибольшей теплоёмкостью.

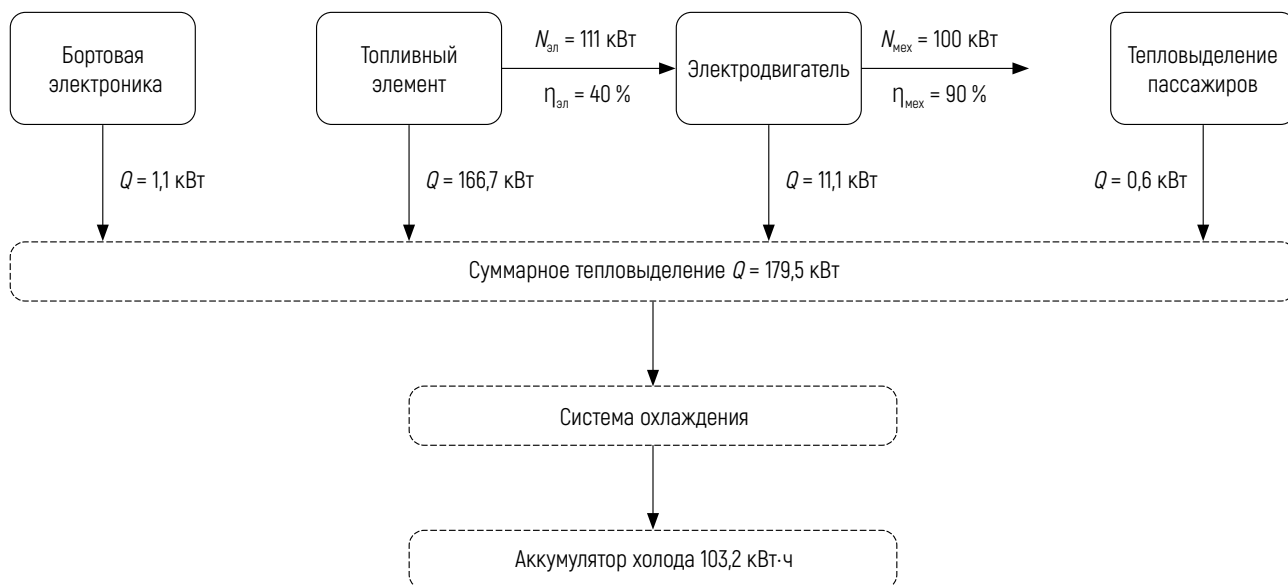


Рисунок 4 – Потоки избыточной тепловой энергии ГТС и их расчётная мощность

Удельная стоимость получения 1 кг хладагента [23–25] приведена в таблице и представлена в оценочной единице (о. е.), которую на первом этапе можно приравнять к одному евро.

Стоимость хладагента на одну поездку ζ (о. е.) для аккумулярования выделяемой энергии будет определяться по следующей зависимости:

$$\zeta = GTC, \quad (5)$$

где T – время поездки, с;

C – удельная стоимость хладагента при требуемых параметрах, о. е./кг.

На рисунке 5 показаны результаты расчётов по зависимости (5) количества хладагента для заправки аккумулятора на одну получасовую поездку и стоимости получения данного количества хладагента при рассматриваемых параметрах.

Наименьшая масса хладагента потребуется при использовании сжиженного водорода, для заданных условий – 90 кг (рисунок 5). В случае применения сжиженного кислорода максимально необходимая масса хладагента в 10 раз больше. По критерию стоимости самый выгодный вариант – лёд 0 °С: 87 о. е. на одну поездку. За ним по увеличению стоимости следует лёд –100 °С – 99 о. е. Наибольшие издержки будут в варианте с сжиженным водородом – 483 о. е.

Для описанных выше параметров ТС количество электрической энергии, затраченной на поездку, составит 55,6 кВт·ч, а количество теплоты, которое нужно аккумулировать (с учётом коэффициента запаса ёмкости), – 103,2 кВт·ч. На рисунке 6 приведена удельная стоимость хладагентов на 1 кВт·ч электрической энергии, затраченной на одну поездку, при использовании водородных ТЭ в качестве источника электрической энергии.

Как показано на рисунке 6, с точки зрения себестоимости наиболее выгодно в качестве хладагента использовать лёд 0 °С, наименее рентабельно применение сжиженного водорода (при соответствующих удельных стоимостях 1,6 и 8,7 о. е./кВт·ч). Однако, если рассматривать системы, где масса хладагента является важным параметром (космические ракеты, ГТС и др.), задействование водорода считается уже самым эффективным способом охлаждения. Тем более стоимость хладагента зависит от многих факторов и может со временем меняться, чего нельзя сказать о его массе.

С целью реализации модели использования жидкого водорода для утилизации теплоты предлагается выбрать схему, представленную на рисунке 7.

Таблица – Удельная стоимость получения хладагентов

Хладагент	Удельная стоимость C , о. е./кг	Примечание
Лёд 0 °С, C_1	0,13	
Сжиженный кислород, C_2	0,5	
Сжиженный водород, C_3	5,4	
Водород + кислород, C_4	1	$C_4 = 0,11C_3 + 0,89C_2$
Лёд –100 °С, C_5	0,19	

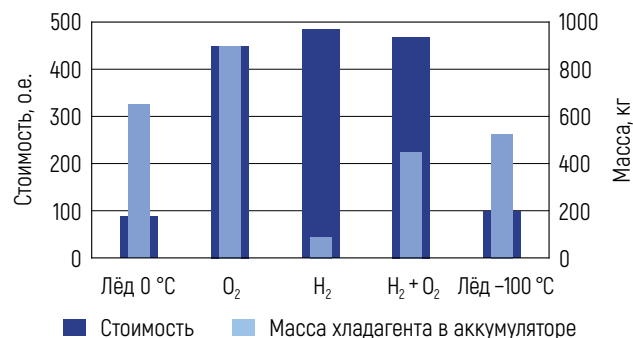


Рисунок 5 – Массовые и стоимостные характеристики хладагентов в аккумуляторе на одну поездку ГТС

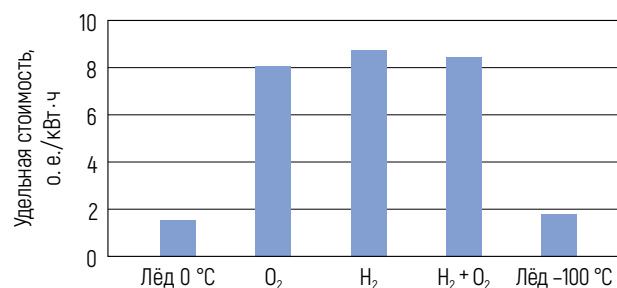


Рисунок 6 – Удельная стоимость хладагентов на 1 кВт·ч электрической энергии, затраченной на одну поездку ГТС

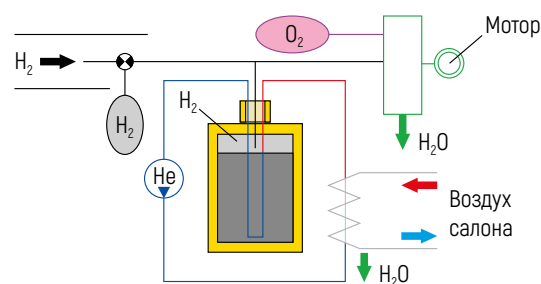


Рисунок 7 – Рабочая схема водородного преобразователя тепла

Процесс кипения водорода происходит непосредственно в сосудах Дьюара, которые нужны для транспортировки жидкого водорода. Такое решение позволит повысить безопасность и оптимизировать трудоёмкость обращения с жидким водородом. Замкнутый контур с хладагентом, имеющим температуру перехода в твёрдую фазу ниже температуры жидкого водорода (в качестве хладагента можно взять гелий), обеспечивает циркуляцию потока и ввод тепла для кипения именно в сосуд Дьюара. Уровень жидкого водорода снижается по мере его кипения, и рабочая часть контура погружения в жидкость уменьшается. Для поддержания требуемого объёма утилизированного тепла предлагается изменить производительность насоса, прокачивающего хладагент по замкнутому контуру.

К данному контуру для теплообмена имеется возможность подключить вторичные контуры с потоками нагретого воздуха или контуры других хладагентов из салона транспорта, от двигателей и иных элементов, нуждающихся в охлаждении. Использование вторичных контуров позволит обеспечить эффективную подготовку циркулирующих в них хладагентов (например, отделять воду, которая содержится в охлаждаемом воздухе и которая может засорить вторичный контур при её замерзании).

Газообразный водород, полученный в результате кипения в сосуде Дьюара, попадает в систему питания водородного ТЭ, имеющую возможность запрашиваться газообразным водородом из отдельного бака или магистрали, предназначенной для ТС. Такое решение способствует выработке электроэнергии независимо от наличия газообразного водорода в среде, где движется ГТС, или от количества выделяемого газа в сосуде Дьюара.

Выводы и дальнейшие направления исследования

Данная работа – первая часть обширного исследования эффективности использования утилизатора тепла на основании рассмотрения теплофизических свойств веществ, применяемых в качестве хладагентов. По критерию минимальной массы хладагента оптимальным веществом является сжиженный водород.

Для полной оценки задействования жидкого водорода в качестве хладагента стоит применять комплексный подход и рассматривать другие аспекты: объём, занимаемый утилизатором тепла; сложность используемого оборудования; стоимость системы при работе с конкретным теплоносителем для обеспечения надёжности и безопасности; трудоёмкость замены оборудования; требования

к безопасности эксплуатации и квалификации обслуживающего персонала. Кроме того, следует отметить такой важный момент, как возможность реализации рассматриваемого метода утилизации холода на существующих ТС. Предложенная в настоящем исследовании схема позволяет это сделать.

При использовании сжиженного водорода также значительно изменяется удельный объём отработанного (газообразного) и загружаемого (жидкого) водорода. Отличительный положительный эффект при применении водорода – уменьшение массы не только хладагента, но и всего ТС. При сбросе газообразного водорода в тоннель неизбежно возникают негативные последствия – увеличение мощности насосов, поддерживающих разрежение в тоннеле. По этой причине сброс лишнего водорода является нежелательным.

В настоящем исследовании уделяется внимание анализу равномерного прямолинейного движения, т. е. движения ТС с неизменной мощностью. При разгоне и торможении соотношение потребляемой электрической мощности и выделяемой тепловой будет изменяться по сравнению с равномерным ходом. Соответственно, в дальнейшем необходимо выполнить расчёт теплового баланса при движении ГТС на участках разгона и торможения, что может послужить целью следующей работы в данном направлении.

Литература

1. *Щитов, С.В. Оптимизация энергетических затрат транспортного средства по скорости движения / С.В. Щитов, З.Ф. Кривуца, Е.Е. Кузнецов // Актуальные вопросы энергетики в АПК: материалы всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Благовещенск, 19 февр. 2020 г. / Дальневост. гос. аграр. ун-т. – Благовещенск: Дальневосточ. ГАУ, 2020. – С. 97–102.*
2. *Егоров, Р.Н. Оптимизация скорости в транспортных процессах / Р.Н. Егоров // Международный технико-экономический журнал. – 2009. – № 4. – С. 65–67.*
3. *Башаркин, М.В. Скоростной трамвай как элемент модернизации транспортной системы Самары / М.В. Башаркин, А.А. Ионов, С.А. Окладов // Наука и образование транспорту. – 2016. – № 1. – С. 237–240.*
4. *Чеченова, Л.М. Перспективы развития скоростного железнодорожного транспорта / Л.М. Чеченова, Ю.В. Егоров, Н.В. Вольхина // Транспортные системы и технологии. – 2019. – Т. 5, № 3. – С. 26–35.*
5. *Подвербный, В.А. Проектирование скоростного пассажирского рельсового транспорта Иркутской агломерации /*

- В.А. Подвербный, В.В. Казарина, О.В. Подвербная // Проектирование развития региональной сети железных дорог. – 2016. – № 4. – С. 308–326.
6. Муссакаев, О.П. Применение технологии магнитной левитации на транспорте / О.П. Муссакаев, В.К. Чикалина // Современные технологии и научно-технический прогресс. – 2020. – Т. 1, № 7. – С. 173–174.
 7. Сивко, Ю.Д. Магнитные материалы. Левитация. Маглев / Ю.Д. Сивко, А.П. Иванова // Молодёжная наука в XXI веке: традиции, инновации, векторы развития: материалы всерос. науч.-исслед. конф., Оренбург, 25 апр. 2019 г. / Оренбург. ин-т путей сообщения – ф-л ФГБОУ ВО «Самар. гос. ун-т путей сообщения». – Ростов н/Д: Юж. ун-т (ИУБиП), 2019. – С. 41–43.
 8. Технологии [Электронный ресурс] // Unitsky String Technologies Inc. – Режим доступа: <https://unitsky.com/technologies?lang=ru>. – Дата доступа: 15.12.2021.
 9. Дмитриев, А.И. Транспортные системы на основе магнитной левитации: технология, экономика, безопасность / А.И. Дмитриев // Транспортное право и безопасность. – 2016. – № 8 (8). – С. 24.
 10. Лapidус, Б.М. Магнитная левитация – фундаментальная основа для сверхскоростных вакуумно-левитационных транспортных технологий / Б.М. Лapidус // Транспортные системы и технологии. – 2018. – Т. 4, № 3. – С. 26–35.
 11. Dudnikov, E.E. Advantages of a New Hyperloop Transport Technology / E.E. Dudnikov // Management of Large-Scale System Development (MLSD): Proceedings of the 10th Intern. Conf., Moscow, 2–4 Oct. 2017 / V.A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences. – IEEE, 2017. – P. 1–4.
 12. Гиперскоростной транспортный комплекс: пат. ВУ 037983 / А.Э. Юницкий. – Опубл. 18.06.2021.
 13. Скворцов, Д.В. Классификация видов охлаждения электрических машин / Д.В. Скворцов, А.Г. Михайлов, С.С. Плотников // Вестник современных исследований. – 2016. – № 2–1 (2). – С. 144–148.
 14. К вопросу о системах охлаждения блоков энергетических силовых установок транспортных средств / В.Д. Червенчук [и др.] // Инновационные технологии в АПК как фактор развития науки в современных условиях: сб. всерос. (нац.) науч.-практ. конф., Омск, 29 нояб. 2019 г. / Омский гос. аграр. ун-т им. П.А. Столыпина. – Омск: Омский ГАУ, 2019. – С. 452–456.
 15. Горяев, А.Б. Повышение надёжности работы систем охлаждения энергетического оборудования путём установки орошающих устройств / А.Б. Горяев, А.М. Телевный, О.Е. Прун // Надёжность и безопасность энергетики. – 2017. – № 2 (13). – С. 60–62.
 16. Dearman: Technology Firm Drives a Cold and Power Revolution [Electronic resource]. – Mode of access: <https://gov.uk/government/case-studies/dearman-technology-firm-drives-a-cold-and-power-revolution>. – Date of access: 02.08.2022.
 17. Tafonea, A. Integrating an Oxygen Enriched Waste to Energy Plant with Cryogenic Engines and Air Separation Unit: Technical, Economic and Environmental Analysis / A. Tafonea, F.D. Magroa, A. Romagnoli // Applied Energy. – 2018. – No. 231. – P. 423–432.
 18. Prodan, G. How to Make Quick Changeovers and Storage Optimization / G. Prodan // Science and Society: Collection of Scientific Articles / ed. S.I. Drobyazko. – Namur: Fadette Editions, 2020. – P. 53–58.
 19. Motwani, S. Experiencing Hyperloops: The Transit of the Future / S. Motwani, A. Gupta // Computer. – 2021. – Vol. 54, No. 7. – P. 37–45.
 20. Hyperloop Alpha [Electronic resource]. – Mode of access: https://www.tesla.com/sites/default/files/blog_images/hyperloop-alpha.pdf. – Date of access: 02.08.2022.
 21. Глухов, Е.И. Применение льдоаккумулятора на примере охлаждения молока / Е.И. Глухов // Пищевые инновации и биотехнологии: сб. тез. IX междунар. науч. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных в рамках III междунар. симпозиума «Инновации в пищевой биотехнологии», Кемерово, 17–19 мая 2021 г. / Кемеров. гос. ун-т; под общ. ред. А.Ю. Просекова. – Кемерово: КемГУ, 2021. – С. 92–93.
 22. Моишеев, И.М. Контурность системы принудительного охлаждения водородом / И.М. Моишеев // Теплофизика высоких температур. – 1974. – Т. 12, № 6. – С. 1257–1266.
 23. Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – Изд. 2-е. – М.: Наука, 1972. – 721 с.
 24. Large-Scale Production and Transport of Hydrogen from Norway to Europe and Japan: Value Chain Analysis and Comparison of Liquid Hydrogen and Ammonia as Energy Carriers / Y. Ishimoto [et al.] // International Journal of Hydrogen Energy. – 2020. – Vol. 45, No. 58. – P. 32865–32883.
 25. Price of Breathing. Medical Oxygen Procurement for Hospitals [Electronic resource]. – Mode of access: <https://ti-ukraine.org/en/blogs/price-of-breathing-medical-oxygen-procurement-for-hospitals>. – Date of access: 02.03.2022.