УДК 681.11.031.11

АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ И ОЦЕНКА ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЖАТОГО ВОЗДУХА КАК НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ В РЕКУПЕРАТИВНЫХ СИСТЕМАХ ТРАНСПОРТНЫХ МАШИН

В. О. Никонов, В. И. Посметьев
ФГБОУ ВО «Воронежский государственный
лесотехнический университет им. Г. Ф. Морозова»
Email: 8888nike8888@mail.ru

Введение

Мировое производство и потребление различных видов энергии увеличивается быстрыми темпами, устанавливая направления развития во всех сферах деятельности человека. Стремительное усовершенствование и значительный количественный рост технологий получения энергии, усложняющиеся процессы ее преобразования, расширяющаяся номенклатура устройств энергопотребления определяют новые задачи по повышению эффективности использования энергии на различных стадиях преобразования. При этом значительное место для решения возникающих задач приобретают накопители энергии, являющиеся реверсивными устройствами для частичного или полного разделения во времени выработки и потребления энергии. Следовательно, накопители энергии становятся важным промежуточным звеном между системами генерирования и системами распределения и потребления энергии [1, 2].

В общем виде под накопителем энергии понимается устройство, позволяющее накапливать в нем энергию какого-либо вида в течение периода заряда $t_з$, а затем передавать существенную часть этой энергии нагрузке в течение периода разряда $t_р$. Взаимосвязь параметров накопителя энергии при заряде и разряде определяется следующей зависимостью:

$$P_з \cdot t_з \cdot \eta = P_р \cdot t_р, \quad (1)$$

где $P_з$ и $P_р$ – средние значение мощностей зарядного и разрядного процессов; η – КПД накопителя.

В зависимости от энергетических показателей, значений периода заряда $t_з$ и периода разряда $t_р$ выделяют несколько основных направлений использования накопителей энергии: аккумулирование избыточной энергии при отключении зна-

чительной части потребителей и последующее использование накопленной энергии в периоды интенсивного энергопотребления; преобразование энергии различного вида; преобразование необходимых показателей определенного вида энергии [3].

Методов классификации накопителей энергии предложено много, однако наиболее удобной с практической точки зрения является классификация по способу накопления и отдачи, а также по типу энергии, закачиваемой в накопитель и извлекаемой оттуда (рис. 1) [1, 3-8 и др.].

В настоящее время для транспортных средств наибольшее распространение получили накопители энергии следующих типов: электрохимические накопители энергии на основе аккумуляторных батарей (свинцово-кислотные, гелиевые, литийионные и литийполимерные); конденсаторные накопители энергии на основе суперконденсаторов (ионисторов); механические (кинетические) накопители энергии на основе вращающихся маховиков; механические накопители энергии с использованием сил упругости газа [12, 13].

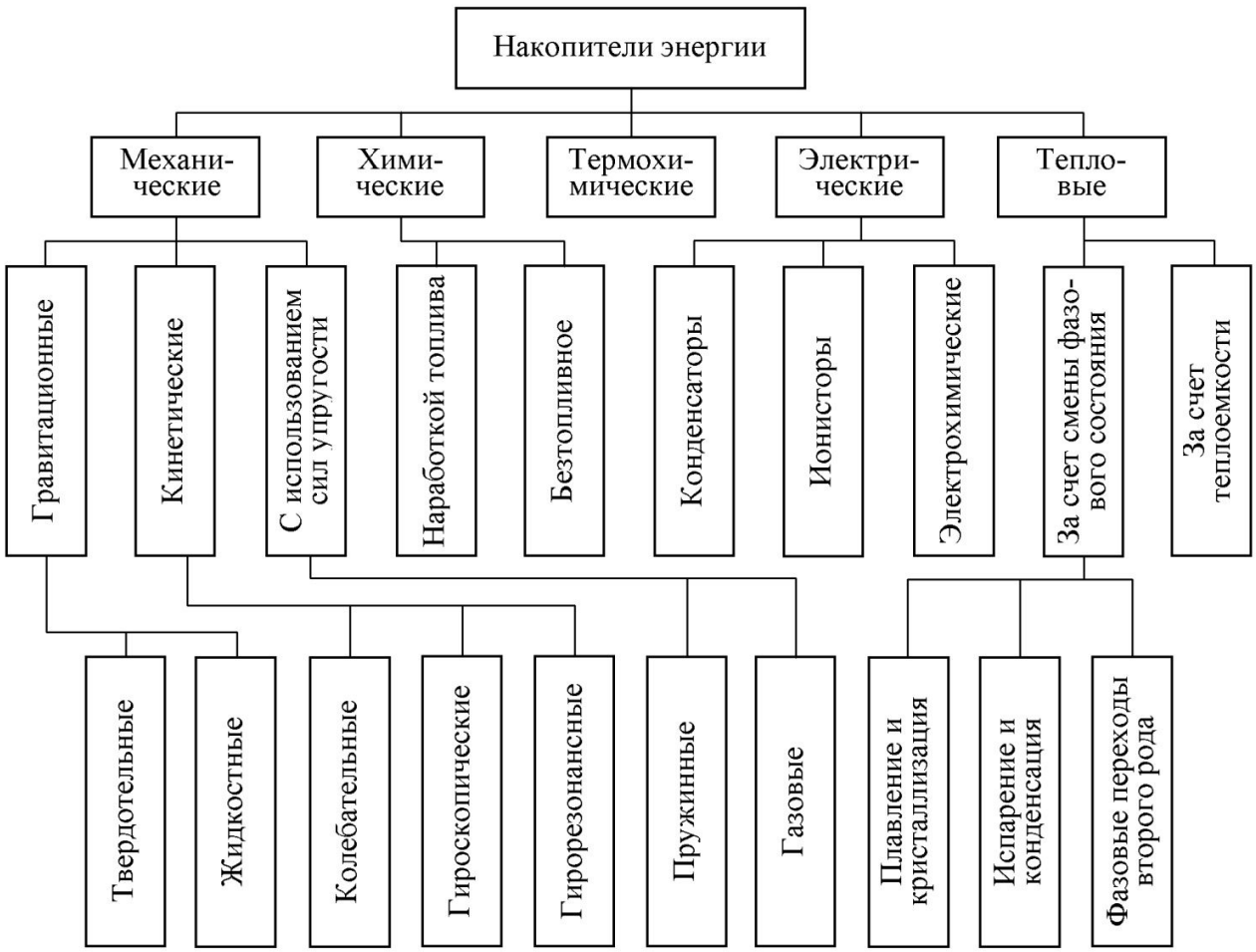


Рисунок 1 – Классификация накопителей по способу накопления и отдачи энергии

Накопители энергии формируют обширный класс энергетических устройств с большим перечнем функциональных возможностей. Каждый из типов накопителей энергии имеет свои специфические особенности, определяющие основную направленность научно-технических разработок при его реализации. Накопители энергии различаются по следующим показателям [9, 10]:

– энергетическим (техническая оптимальная энергоемкость накопителя, максимальная и минимальная энергоемкость, удельная запасаемая энергия или плотность энергии, максимальная и минимальная отдаваемая и потребляемая мощности, плотность мощности);

– временным (продолжительность хранения энергии, вывода энергии, наибольшая возможная продолжительность заряда с заданной мощностью, продолжительность реверса мощности, выхода на требуемый уровень разрядной мощности);

– техническим (КПД, коэффициент линейности, характеристики заряда и разряда, стабильность, количество циклов заряда – разряда);

– эксплуатационным (срок службы накопителя, массогабаритные показатели, требования к условиям эксплуатации, надежность, регулируемость);

– экономическим (капитальные затраты, удельные капиталовложения на единицу энергоемкости, эксплуатационные затраты и др.).

Таблица 1 – Характерные показатели накопителей энергии

Тип накопителя энергии	Удельная энергия, Дж/г
Химический	100-1000
Индуктивный	1-10
Емкостный	0,1-0,5
Механический	10-1000
Электромеханический	1-10
Электродинамический	0,05-1

В таблице 1 приведены типичные значения удельной запасаемой энергии и времени вывода энергии для основных рассматриваемых типов накопителей. Наибольшее значение удельной энергии приходящейся на единицу массы характерно для химических и механических типов накопителей [9].

К механическим накопителям энергии относят устройства для запасания и хранения кинетической или потенциальной энергии с последующей отдачей ее для совершения полезной работы. Основные разновидности механических накопителей подразделяются на статические, динамические и комбинированные устройства. Статистические механические накопители сохраняют запасенную энергию, находясь в неподвижном состоянии. Носителями потенциальной

энергии в них служат упруго деформированные твердые тела или сжатые газы, находящиеся под избыточным давлением. Возможность накопления упругой энергии в твердых телах и газах обуславливается наличием межмолекулярных сил – в первых преобладают силы притяжения, определяющие форму тел, во вторых силы отталкивания, от которых зависит давление газов. Типичными примерами статистических механических накопителей являются: растянутые или сжатые пружины, выполненные из резины, газобаллонные аккумуляторы, пневмоаккумуляторы и гидроаккумуляторы [2, 11].

В таблице 2 представлены технические параметры накопителей энергии. Наибольшее количество энергии из приведенных накопителей может запасать кинетический накопитель энергии, наименьшие потери энергии характерны для механического накопителя с использованием сил упругости газа, поэтому рекомендуется хранить энергию именно в них [12].

Таблица 2 – Технические параметры накопителей энергии

Тип накопителя энергии	Название	Энергия, которую может запасти накопитель W, кВт ч	Потери, %
Кинетический	Lirex	360	2
Ионисторы	DB5U407W35060HA, SAMWHA	0,0675	0,018
Аккумулятор свинцово-кислотный	Bosch S5 Silver Plus	9,96 / 0,24	0,028
Механический, с использованием сил упругости газа	Стальной резервуар объемом 1 м^3 массой 250 кг со сжатым воздухом под давлением 5 МПа	5,56	0,00034

В последние годы механический накопитель энергии с использованием сил упругости газа всерьез рассматривают ведущие производители транспортных машин. Целый ряд небольших инновационных компаний развивают энергосберегающие технологии для транспортных средств, связанных с использованием пневматики, как в чистом виде (с баллонами высокого давления для хранения запаса сжатого воздуха), так и в виде гибридных вариантов.

Целью настоящей работы является оценка целесообразности использования сжатого воздуха как механического накопителя энергии для рекуперативных систем транспортных машин.

Обзор характеристик и специфики механического накопителя энергии в виде сжатого газа

Сжатый воздух является важным ресурсом для промышленности, его часто ставят на четвертое место после электроэнергии, газа и воды. По сравнению с паром сжатый воздух более транспортабелен вследствие малых тепловых потерь, не имеет специфических потерь на начальную конденсацию, упруг, прозрачен, не имеет вредных веществ, не огнеопасен, быстро передает давление и его запас в природе практически неограничен.

Сжатый воздух, обладая упругостью способен совершать работу благодаря накопленной в нем энергии. Накопление энергии происходит при закачивании воздуха в баллон под давлением, а выделение – при выпуске воздуха из баллона. Накопленная сжатым воздухом энергия затем расходуется в самых различных пневматических машинах. Они совершают механическую работу за счет разности давления энергоносителя (сжатого воздуха) и атмосферного давления. Отработанный воздух сбрасывается в атмосферу.

Сжатый воздух обеспечивает привод самых различных механизмов и инструментов, участвует в выплавке металлов, в работе измерительных приборов и средств автоматики, кондиционеров, систем вентиляции и отопления, двигателей внутреннего сгорания и газовых турбин, аэродинамических труб, подводных лодок, аквалангов, устройств по подъему затонувших судов, тормозов автомобилей и поездов и др. Сжатый воздух широко используется в металлургии, кузнечно-прессовом производстве, энергетике, машиностроении, в горной, нефтяной, химической, полиграфической, текстильной, легкой, пищевой промышленности, в медицине, на транспорте, в военном и морском деле, в строительстве, робототехнике, в сельском хозяйстве [14].

Сжатый воздух в баллонах это мобильный, пожаробезопасный, очень удобный в применении и хранении энергоноситель. Его можно хранить сколько угодно долго, и он всегда готов к моментальному использованию. Именно эти качества являются преимуществом сжатого воздуха перед гидроаккумулированием, жидким и твердым топливом. Энергоемкость сжатого воздуха при давлении 100-200 МПа сравнима с энергоемкостью углеводородного топлива. Один литр жидкого воздуха имеет 0,6 МДж энергии или в 2-3 раза больше чем у самого лучшего аккумулятора.

Перспективным является способ накопления упругой энергии путем доведение газов до сжиженного состояния. Правда, в этом случае энергия накап-

ливается не только в виде упругой энергии, но и в виде тепловой – за счет отбора ее у сжиженного газа и отвода во внешнюю среду. Поэтому освобождение упругой энергии проходит как бы две стадии: превращение тепловой энергии, подводимой из внешней среды к сжиженному газу, в упругую энергию – до момента выравнивания температур газа и среды; и превращение упругой энергии сжатого газа в механическую энергию – до выравнивания температур газа и среды. Поскольку тепловая энергия окружающей среды имеется в неограниченном количестве, ее расход нет необходимости учитывать. Расчеты свидетельствуют, что запас энергии, приходящейся на весовую и особенно объемную единицу сжиженного газа, будет значительно выше, чем в случае накопления энергии сжатым газом [11].

Рассмотрим основные энергетические соотношения и характерные параметры системы накопления сжатого газа [2].

Система накопления сжатого газа находится в механически неравновесном состоянии по отношению к окружающей среде: при равенстве температур системы и окружающей среды ($T = T_{ос}$), давление системы $p > p_{ос}$, поэтому система может совершать работу. Запас упругой энергии сжатого газа в баллоне объемом V составляет:

$$W_{уд} = \int_{p_1}^{p_2} V dp = V(p_2 - p_1). \qquad (2)$$

На единицу массы M любого сжатого газа согласно этой формуле приходится удельная энергия

$$W_{уд} = W / M = V(p_2 - p_1)/M = \Delta p / \gamma \ . \qquad (3)$$

При V = 1 м^3 − значение $W = W_{уд} \cdot M$ численно равно перепаду давления $\Delta p = p_2 - p_1$. Например, если $\Delta p = 250 \cdot 10^5$ Па (начальное давление p_1 = 10^5 Па), то W = 25 10^6 Дж независимо от химического состава газа. Максимальное значение $W_{уд}$ при расширении сжатого газа до нулевого давления при данной температуре (согласно уравнению Менделеева-Клапейрона $pV = M_{\mu} R_y$), составляет

$$W_{уд} = W / M = R_y T / \mu \ , \qquad (4)$$

где $\mu = M / M_{\mu}$ – молярная масса (кг/кмоль); R_y = 8,314 кДж (кмоль) − универ-

сальная газовая постоянная при $T_к$ = 273 К; $p = 10^5$ Па; M_μ – количество киломолей в газе массой M.

Из формулы (4) видно, что наиболее эффективно применение в механических накопителях легких газов. Для самого легкого газа – водорода (μ = 2 кг/кмоль) при T = 300 К удельная энергия $W_{уд}$ = 1250 кДж/кг (или 1250 Дж/г). В последнюю формулу давление в явном виде не входит, так как $W_{уд}$ определяется отношением избыточного давления газа к его плотности, которая при повышении давления и T = const возрастает по линейному закону (в изотермическом процессе pV = const). Следует заметить, что целесообразные для эффективного применения рассматриваемых механических накопителей высокие давления принимают из соображений прочности, существенную массу газовых баллонов, с учетом которой значение $W_{уд}$ установки в целом может снижаться почти на порядок. Так для приведенных выше условий на 1 кг сжатого воздуха будет приходиться до 20 кг веса баллонов, а на 1 кг сжатого водорода – примерно в 14,5 раз больше [2].

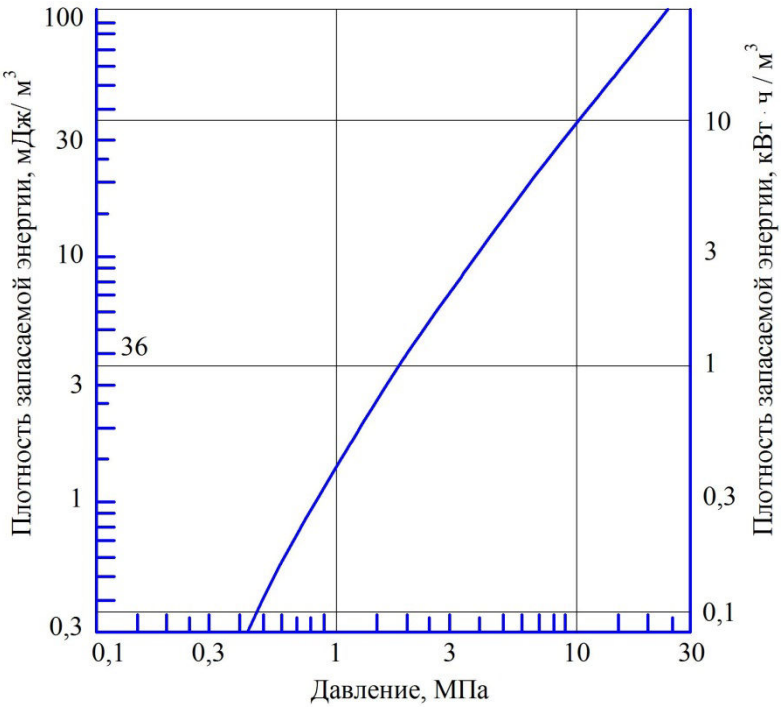
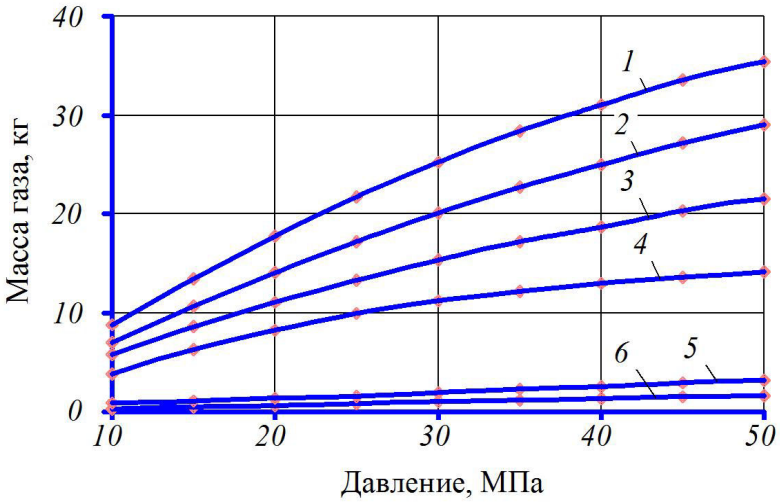


Рисунок 2 – Зависимость плотности запасаемой энергии сжатого воздуха от давления

На рисунке 2 показана зависимость плотности запасаемой энергии сжатого воздуха от давления для случая, когда начальная температура аккумулирования и температура разрядки равны температуре окружающей среды, а расширение внутри резервуара аккумулятора, как и в двигателе изотермическое. Следует отметить, что плотность запасаемой энергии не зависит от температуры окружающей среды: повышение температуры окружающей среды приведет не только к снижению плотности воздуха в аккумуляторе, но и к повышению энтальпии запасенного воздуха. Таким образом, эти два эффекта взаимно уравновесятся. Плотность запасаемой энергии возрастает в зависимости от давления аккумулирования быстрее, чем по линейному закону. Поэтому для аккумулирования с использованием сжатого воздуха были предло-

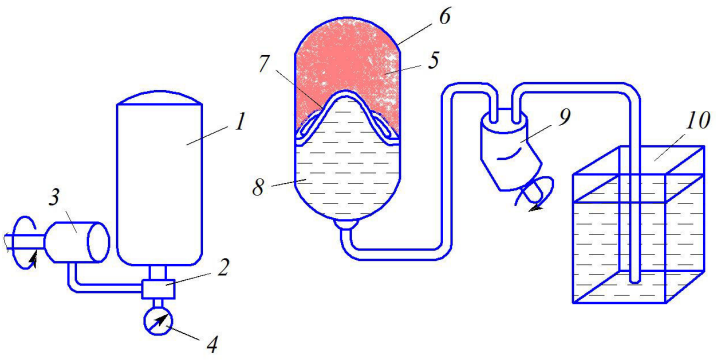


1 – аргон; *2* – кислород; *3* – азот; *4* – метан; *5* – гелий; *6* – водород

Рисунок 3 – Изменение масс газов в 50 литровом объеме в зависимости от давления

жены высокие давления (более 50 МПа) [15].

Устройство накопителя энергии в виде сжатого газа обычно выполнено в виде прочной колбы из стали (газовый баллон), в которую под огромным давлением закачивается газ. Изменение масс газов в 50 литровом объеме в зависимости от давления представлено на рисунке 3 [16]. Уровень выхода энергии накопителя сжатого газа нестабилен. Он велик, пока давление внутри баллона близко к максимуму и снижается по мере расходования газа. Для стабилизации выхода используются редукторы. Они обеспечивают постоянное давление на выходе, что не только создает оптимальные условия работы потребителя, но и продлевает срок эффективного расходования запаса газа.



а *б*

а – принципиальная схема устройства; *б* – совмещенная компоновка газобаллонного накопителя энергии и гидравлического устройства; *1* – баллон со сжатым газом; *2* – вентиль; *3* – пневмодвигатель; *4* – манометр; *5* – сжатый газ; *6* – баллон; *7* – эластичная перегородка; *8* – рабочая жидкость; *9* – гидромашина; *10* – масляный резервуар

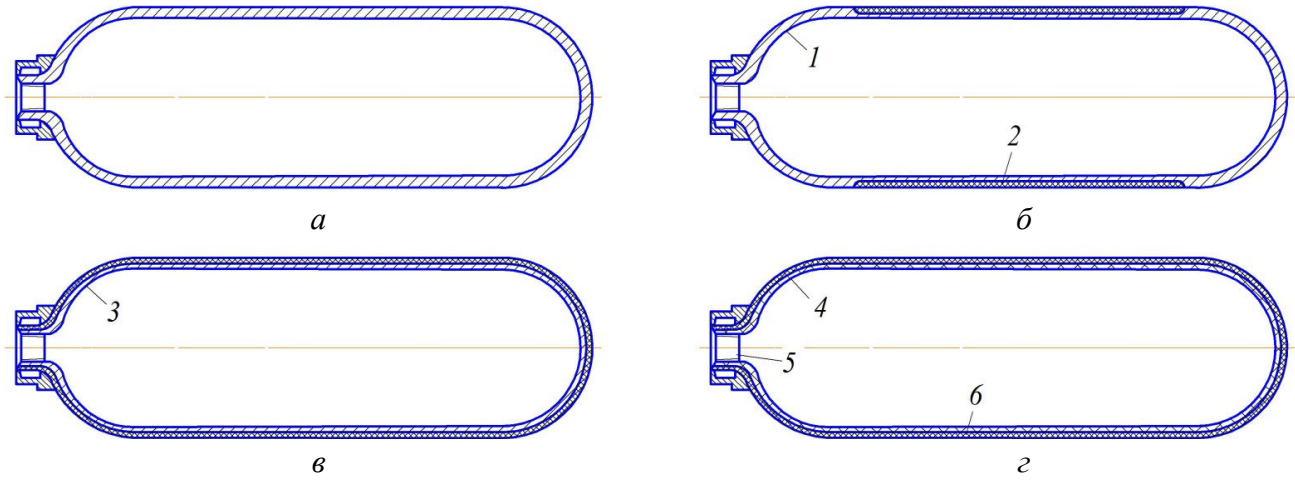
Рисунок 4 – Газобаллонные накопители энергии

Принципиальная схема устройства газобаллонного механического накопителя приведена на рисунке 4, *а*. В режиме заряда газ закачивается в баллон компрессором. При заряде накопителя энергии газ существенно нагревается, но в режиме хранения остывает до температуры окружающей среды, теряя около 30-40 % запасенной энергии. Давление сжатого воздуха при охлаждении стремительно падает, а значит, уменьшается и количество выделяемой энер-

гии. Недостаток рассматриваемых механических накопителей состоит в относительно низком КПД: с учетом КПД компрессора $\eta_к \approx 0{,}25\text{-}0{,}3$ эффективный КПД заряда $\eta_{эф} \leq 0{,}12$.

Различают баллоны низкого и высокого давления, первые используют для сжиженных углеводородных газов и хладагентов [17, 18]. Их испытательное давление составляет 3,0 и 4,8 МПа соответственно. Для сжиженных газов допускается применение сварных баллонов. Баллоны высокого давления предназначены для промышленных газов. В зависимости от исполнения их испытательное давление может быть от 30 до 45 МПа.

В мировой практике сейчас принята классификация баллонов высокого давления, включающая четыре основных вида конструкций: цельнометаллические без применения сварки, изготовленные из легированной или углеродистой стали (рис. 5, *а*); металлопластиковые со стальным или алюминиевым лейнером (рис. 5, *б*); металлопластиковые с обмоткой типа кокон (рис. 5, *в*) и композитные баллоны (рис. 5, *г*). Схематично конструкции указанных баллонов представлены на рисунке 5.



а – стальной цельнометаллический баллон;
б, *в* – металлопластиковые баллоны; *г* – композитный баллон;
1 – металлический несущий лейнер; *2* – армирующая оболочка; *3* – алюминиевый лейнер;
4 – герметизирующая неметаллическая оболочка; *5* – закладной элемент; *6* – силовая оболочка

Рисунок 5 – Конструкции баллонов высокого давления:

Цельнометаллические баллоны первого типа (рис. 5, *а*) изготавливаются из листового металла, трубы из цельнометаллической заготовки без применения сварки. Облегченная конструкция металлопластиковых баллонов второго типа (рис. 5, *б*) достигается нанесением армирующей оболочки из композици-

онного материала на цилиндрическую часть тонкостенного стального или алюминиевого лейнера. К отдельному 3 типу (рис. 5, *в*) относят композитные баллоны, в конструкциях которых имеется металлический лейнер, заключенный по всей поверхности в армирующую оболочку, именуемую кокономом. Композитные баллоны (рис. 5, *г*) содержат усиливающую обмотку из композиционного материала и внутреннюю полимерную герметизирующую оболочку (резины, полимеры и т. д.) с металлическими закладными элементами для подсоединения запорной арматуры.

При выборе баллона необходимо руководствоваться ценовыми соображениями, ограничениями по массе, устойчивостью к ударам, газонепроницаемостью, данными испытаний на циклическую долговечность газом и т. д.

Цельнометаллические баллоны или баллоны со стальным лейнером имеют повышенные риски разрушения при содержании влаги в наполняемом газе выше нормативного. Однако баллоны второго и третьего типов (рис. 5, *б* и *в*) опаснее металлических при разрушении, так как упругие деформации в момент разрушения у металлокомпозитных баллонов значительно больше, чем у металлических. Запас энергии, высвобождаемой баллонами второго и третьего типов (рис. 5, *б* и *в*) при разрушении, больше, чем у баллона первого типа (рис. 5, *а*). В баллонах четвертого типа (рис. 5, *г*) газ находится в непосредственном контакте с композиционным материалом, поэтому большинство таких баллонов ограничивается низким испытательным давлением. Основное преимущество баллонов, изготавливаемых с применением композиционных материалов – меньшая масса. По сравнению с цельнометаллическим, удельный вес баллона второго типа (рис. 5, *б*) снижается в 2-3 раза. Однако из-за высокой стоимости стеклопластика и трудоемкой технологии изготовления стоимость таких баллонов выше, а срок службы меньше в связи с уменьшением со временем конструктивной прочности оплетки [16, 19].

Один из путей повышения эффективности использования рассматриваемых газобаллонных накопителей энергии состоит в увеличении КПД данных установок посредством применения газобаллонных накопителей, совмещенных с гидравлическим устройством – гидроаккумуляторов (рис. 4, *б*). В режиме заряда обратимая гидромашина *9* работает как насос (от внешнего привода) и нагнетает в баллон *5* рабочую жидкость *8*, с помощью которого сжимается газ *5*, отделенный от масла свободным поршнем или мембраной *7*. Последняя предпочтительнее в установках с относительно малыми перепадами давления,

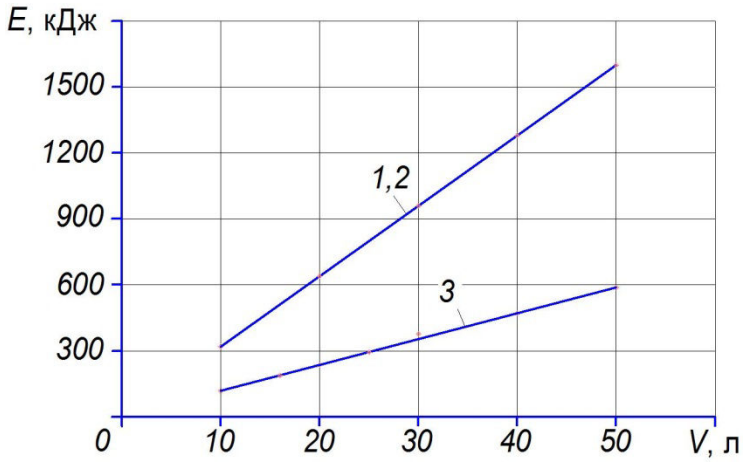
так как упрощается конструкция уплотнений. При разряде потенциальная энергия сжатого газа преобразуется в кинетическую энергию роторной гидромашиной, работающей как двигатель. Резервуар *10* служит для сбора рабочей жидкости. Возрастание КПД в устройстве обуславливают следующие факторы: меньшая степень расширения газа, чем в газовых механических накопителях; снижение тепловыделения при расширении газа; высокий КПД собственной объемной гидросистемы, в том числе гидромашины.

Гидроаккумуляторы являются наиболее распространенными устройствами, применяемыми для хранения больших запасов энергии. Они представляют собой сосуды, работающие под давлением, которые позволяют накапливать энергию за счет сжатия газа или пружины и передавать её в гидросистему потоком рабочей жидкости, находящейся под давлением. Ввиду ряда недостатков гидроаккумуляторы с механическим накоплением энергии в виде пружин не получили широкого распространения и имеют ограниченное применение. Наиболее широкое применение на практике во всём мире получили пневмогидроаккумуляторы, в которых накопление энергии осуществляется за счет сжатия газа, заключенного под давлением в специальный баллон, потенциальная энергия газа по мере необходимости передается гидравлическому потоку рабочей жидкости. Их используют в качестве источников энергии, для демпфирования колебаний давления и компенсации пиковых расходов рабочей жидкости, для гидравлической разгрузки насосов, компенсации утечек при выдержке под давлением, в энергосберегающих сисемах рекуперативного типа и др. Широкое применение пневмогидроаккумуляторов стало возможным благодаря их достаточно большой удельной энергоемкости, малой инерционности, способности долгое время хранить накопленную энергию и кратковременно развивать большую мощность [20, 21].

Сравнительные характеристики энергоемкостей различных типов баллонов и пневмогидроаккумуляторов (ПГА) в зависимости от их объема и массы представлены на рисунках 6-10. Энергоемкости ПГА рассчитывались на основании формулы:

$$E = p_0 V_{ном} \ln\left(p_{ном} / p_0\right), \quad (5)$$

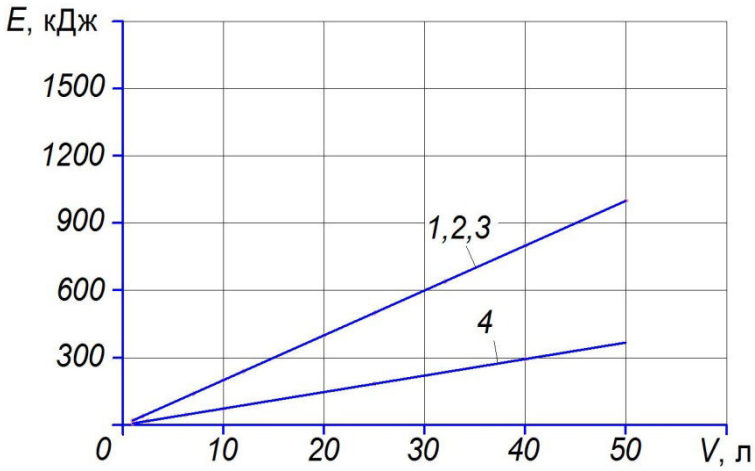
где p_0 – начальное давление зарядки ПГА газом, Па; $V_{ном}$ – номинальная вместимость ПГА, м^3; $p_{ном}$ – номинальное давление ПГА, Па.



1 – металлокомпозиционные баллоны БМА-25 номинальным давлением 32 МПа;
2 – баллоны из легированной стали (ГОСТ 12247-80) номинальным давлением 32 МПа;
3 – пневмогидроаккумуляторы типа АРХ номинальным давлением 32 МПа

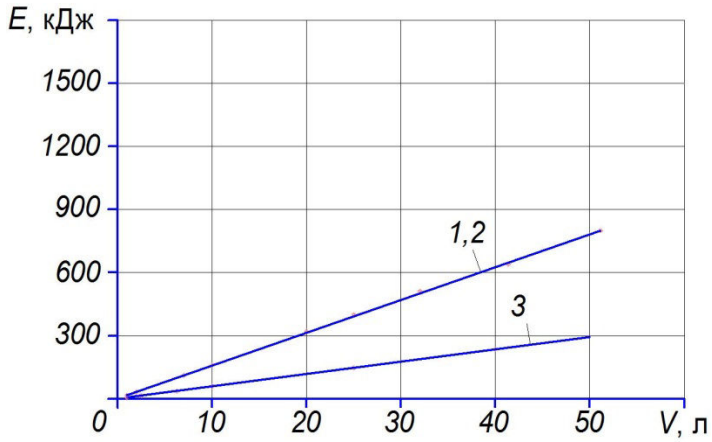
Рисунок 6 – Зависимости энергоемкостей баллонов и пневмогидроаккумуляторов от их объема

В качестве энергоносителя был принят воздух, для которого показатель изотермы $n_н = 1$, а оптимальная степень повышения давления, при которой энергоемкость ПГА максимальна $\left(p_{ном} / p_o\right)_{опт} = 2{,}72$ [21].



1 – баллоны из углеродистой стали (ГОСТ 949-73) номинальным давлением 20 МПа;
2 – баллоны из легированной стали (ГОСТ 949-73) номинальным давлением 20 МПа;
3 – металлокомпозиционные баллоны (ТУ 4591-010-130559988-2006) номинальным давлением 20 МПа;
4 – пневмогидроаккумуляторы типа АПГ-Б номинальным давлением 20 МПа

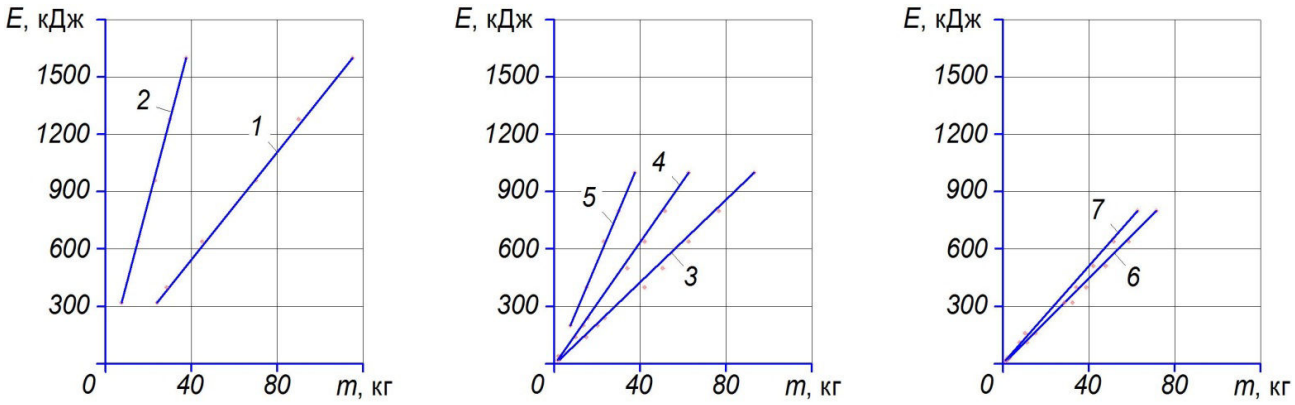
Рисунок 7 – Зависимости энергоемкостей баллонов и пневмогидроаккумуляторов от их объема



1, 2 – баллоны из углеродистой и легированной стали (ГОСТ 949-73) номинальным давлением 16 МПа; *3* – пневмогидроаккумуляторы типа АПГ-Б номинальным давлением 16 МПа

Рисунок 8 – Зависимости энергоемкостей баллонов и пневмогидроаккумуляторов от их объема

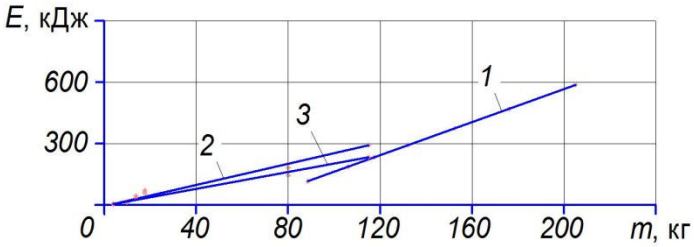
Анализ полученных зависимостей, представленных на рисунках 6-8, позволил установить, что с увеличением объемов и давлений в баллонах и ПГА происходит возрастание их энергоемкостей. Наибольшее значение энергоемкостей характерно для всех рассматриваемых типов баллонов в сравнении с ПГА. Это объясняется тем, что при одинаковой номинальной вместимости ПГА и баллонов, в ПГА объем накопителя энергии в заряженном состоянии при наличии объема жидкости значительно ниже.



1 – баллоны из легированной стали (ГОСТ 12247-80) номинальным давлением 32 МПа; *2* – металлокомпозиционные баллоны БМА-25 номинальным давлением 32 МПа; *3, 4* – баллоны из углеродистой и легированной стали (ГОСТ 949-73) номинальным давлением 20 МПа; *5* – металлокомпозиционные баллоны (ТУ 4591-010-130559988-2006) номинальным давлением 20 МПа; *6, 7* – баллоны из углеродистой и легированной стали (ГОСТ 949-73) номинальным давлением 16 МПа

Рисунок 9 – Зависимости энергоемкостей баллонов от их массы

Так, с увеличением объемов металлокомпозицинных баллонов от 10 до 50 л, баллонов из легированной стали и ПГА номинальным давлением 32 МПа, их энергоемкость возрастает от 320 до 2560 кДж и от 117 до 538 кДж соответственно (рис. 6); с увеличением объемов от 10 до 50 л баллонов из углеродистой и легированной стали, металлокомпозиционных баллонов и ПГА номинальным давлением 20 МПа, их энергоемкость возрастает от 200 до 1000 кДж и от 73 до 300 кДж соответственно (рис. 7); с увеличением объемов от 10 до 50 л баллонов из углеродистой и легированной стали, ПГА номинальным давлением 16 МПа, их энергоемкость возрастает от 160 до 800 кДж и от 57 до 300 кДж соответственно.



1 – пневмогидроаккумуляторы типа АРХ номинальным давлением 32 МПа;
2 – пневмогидроаккумуляторы типа АПГ-Б номинальным давлением 20 МПа;
3 – пневмогидроаккумуляторы типа АПГ-Б номинальным давлением 16 МПа

Рисунок 10 – Зависимости энергоемкостей пневмогидроаккумуляторов от их массы

На основании представленных зависимостей на рисунках 9 и 10 можно сделать вывод, что металлоемкость ПГА самая высокая в сравнении со всеми типами рассматриваемых баллонов. С увеличением номинальных давлений, массы ПГА и баллонов повышаются. Самой низкой металлоемкостью обладают металлокомпозиционные баллоны.

Перспективным способом повышения КПД газовых механических накопителей является их совместное использование с регенерирующими теплообменниками или с накопителями тепловой энергии. Регенерирующие теплообменники отбирают тепло у газа при сжатии и возвращают тепло газу при расширении. Тепловые аккумуляторы запасают энергию в нагреваемом выше точки плавления рабочем теле, размещенном термосплатированном резервуаре. При разряде накопителя тепловой энергии охлаждение рабочего тела сопровождается его обратным фазовым переходом в твердое состояние с выделением тепла, которое подводится к газобаллонному механическому накопителю. При расширении в режиме разряда баллона газ сильно охлаждается и теряет значи-

тельную часть запасенной энергии. Поступающее от накопителя тепловой энергии тепло компенсирует уменьшение запаса энергии и обуславливает возрастание КПД установки [3, 22].

Идея использования сжатого воздуха для привода механизмов транспорта, возникла давно и была запатентована в Великобритании, еще в 1799 г. Еще в позапрошлом веке во французском городе Нанте ходил трамвай, работавший от баллонов со сжатым воздухом. Десяти баллонов воздуха, сжатого всего до 3 МПа, при общем объеме 2800 л, трамваю хватало, чтобы проходить путь в 10-12 км. Трамвай на конечных станциях заправляли не только сжатым воздухом, но и кипятком. Кипяток, играя роль накопителя тепла, согревал воздух после выхода его из баллона, когда газ сильно охлаждался. Нагревание повышало давление воздуха, и он совершал гораздо большую работу, чем без нагрева. Этот пример показывает, что пользуясь дополнительным накопителем тепла, можно получать от газового или воздушного аккумулятора энергию, даже превосходящую ту, что была затрачена при зарядке баллона [1].

Пневматический привод имеет ряд преимуществ по сравнению с другими типами приводов. В частности, по удельным массогабаритным показателям (табл. 3), пожаро- и взрывобезопасности, способности работать в сильно запыленной, влажной и радиационной среде, способности переносить длительные перегрузки без перегрева, простоте конструкции и относительно невысокой стоимости [23].

Таблица 3 – Характерные показатели различных типов двигателей

Тип двигателя	Удельная весовая мощность, л. с. / кг	Удельная мощность, л. с. / дм^3
Дизельные двигатели	0,1-0,2	0,03-0,1
Двигатели внутреннего сгорания	0,04-0,18	0,02-0,07
Электромоторы (менее 3 л. с.)	0,02-0,15	0,1-0,2
Поршневые пневмомоторы	0,1-0,2	0,1-0,4
Пластинчатые пневмомоторы	0,4	1,3-1,7
Гидроцилиндры	0,8-1,0	2,7-2,8

Повысить энергоэффективность пневматических транспортных средств можно за счет рекуперации энергии торможения. При рекуперации энергии торможения сжатый воздух испытывает двойное преобразование: сжатие при торможении и последующее расширение с совершением работы при разгоне. В Университете Лунда подсчитали, что «воздушная гибридизация» городских автобусов может снизить расход топлива на 60 %. При этом в отличие от элек-

трических, воздушный гибрид не требует дорогих материалов, а пневматическая система занимает гораздо меньше места, чем электромотор и аккумуляторная батарея [24].

В работе [25] приведены способы повышения удельной мощности системы пневматического аккумулирования для водных транспортных средств на основе подогрева воздуха перед воздушной турбинной установкой, параметры, которых представлены в таблице 4. Данная система состоит из привода движителя от пневматического аккумулятора, в котором воздух из бака основного запаса с давлением до 50 МПа редуцируется до рабочего давления 0,3-1,4 МПа в расходный баллон и поступает в воздушную турбинную установку, где расширяется до атмосферного давления. Наименьшие потери энергии по результатам исследований (табл. 4) обеспечит применение горячего запаса и подогрева.

Таблица 4 – Характеристика вариантов подготовки сжатого воздуха

Вариант	Давление в баке основного запаса, МПа	Температура в баке основного запаса, К	Давление в расходном баке, МПа	Температура в расходном баке, К	Температура за воздушной турбинной установкой, К	Удельная мощность, кДж / кг
Без подогрева	30	300	0,3	300	240	60
С «горячим» запасом	30	420	0,3	420	280	140
Подогрев выхлопными газами	30	300	0,3	500	290	210
С «горячим» запасом и подогревом выхлопными газами	30	429	0,3	620	300	320

Заключение

Накопители энергии играют важную роль в возможности использования возобновляемых источников энергии. Анализ основных типов накопителей энергии на основе приведенных показателей позволяет получить ясную и полную картину их возможностей, относительных достоинств, недостатков, перспектив их использования и дальнейшего развития.

В последние годы накопители энергии сжатого воздуха всерьез рассматривают во всем мире. Сжатый воздух является идеальным рабочим телом для аккумуляции энергии. Проведенный анализ использования энергии сжатого воздуха как накопителя энергии позволяет сделать следующие выводы:

– его не нужно изготавливать из дорогостоящего, трудно добываемого материала, и он не изнашивается при повторном использовании;

– для наиболее эффективного практического применения сжатого воздуха как накопителя энергии необходимо решить несколько технических проблем: снизить потери энергии при сжатии и расширении воздуха; снизить массу, повысить энергоемкость и прочность накопителей энергии (баллонов);

– одним из способов повышения плотности запасенной энергии сжатого воздуха является доведение его до сжиженного состояния, однако с учетом основных энергетических соотношений с увеличением плотности запасенной энергии значительно возрастают требования к прочности баллонов и существенно возрастет их масса;

– из всех рассмотренных типов применение цельнометаллических баллонов как накопителей энергии сжатого воздуха наиболее целесообразно. Несмотря на то, что масса баллонов, изготовленных из композиционных материалов в 2-3 раза меньше цельнометаллических, технология изготовления их более трудоемкая, используемые композиционные материалы, обладают высокой стоимостью, срок службы их в связи с уменьшением со временем конструктивной прочности оплетки значительно меньше;

– одним из путей снижения степени расширения газа и увеличение КПД использования энергии сжатого газа в газобаллонных накопителях является применение газобаллонных накопителей, совмещенных с гидравлическим устройством – ПГА. Тем не менее, при одинаковой номинальной вместимости ПГА и баллонов, масса ПГА на порядок выше, а объем накопленной энергии в заряженном ПГА, вследствие наличия рабочей жидкости значительно ниже, чем в баллонах;

– для более полного использования потенциальной энергии сжатого воздуха в баллонах применяют как регенерирующие теплообменники, отбирающие тепло у воздуха при сжатии и возвращающие тепло воздуху при расширении, так и устройства для подогрева воздуха при расширении. Использование таких устройств усложняет и удорожает конструкции систем накопления и использования сжатого воздуха;

– для экономии энергии сжатый воздух можно запасать при более низком давлении за счет использования абсорбирующих материалов, таких как активированный уголь, или металло-органические структуры, которые используются при хранении сжатого природного газа при давлении 3,3 МПа вместо 30 МПа.

Библиографический список

1 Гулиа, Н. В. Накопители энергии [Текст] / Н. В. Гулиа, М. : Наука. – 152 с.

2 Сошинов, А. Г. Накопители энергии в электроэнергетических системах : Учеб. пособие [Текст] / А. Г. Сошинов, Г. Г. Угаров // ВолгГТУ, Волгоград, 2007. – 106 с.

3 Накопители энергии : Учеб. пособие для вузов / Д. А. Бут, Б. Л. Алиевский, С. Р. Мизюрин, П. В. Васюкович : Под. ред. Д. А. Бута. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 400 с.

4 Козлов, С. В. Анализ эффективности систем накопления энергии [Текст] / С. В. Козлов, А. Н. Киндряшов, Е. В. Соломин // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология», научно-технический центр ТАТА, 2015. – С. 29-34.

5 Обзор типов накопителей энергии [Электронный ресурс] – Режим доступа : http://khd2.narod.ru/gratis/accumul.htm. – Загл. с экрана.

6 Small Compressed Air Energy Storage Systems [Text] / Kayne Herriman // A dissertation submitted by in fulfillment of the requirements of ENG4112 Research Project towards the degree of a Bachelor of Engineering (Electrical and Electronic) Submitted: 24 October 2013 – 114 p.

7 Energy storage systems – Characteristics and comparisons [Text] / H. Ibrahima, A. Ilincaa, J. Perronb // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12 (2008) – 1221-1250 pp.

8 A novel design of a compressed air storage system with liquid pistons [Text] / M. Kılıç1, M. Mutlu // Bulgarian Chemical Communications, Volume 48, Special Issue E, 2016. – pp. 318-324.

9 Рыбалко, А. Я. Критерии сопоставления накопителей энергии [Электронный ресурс] / А. Я. Рыбалко, С. В. Дыбрин. Режим доступа : vde.nmu.org.ua/ua/science/ntz/arhive/75/12.pdf. – Загл. с экрана.

10 Посметьев, В. И. Анализ эффективности и классификация упругих устройств, используемых в традиционных и новых подвесках колесных машин/ В. И. Посметьев, В. О. Никонов, В. В. Посметьев // Воронежский научно-технический Вестник, 2017. – Т. 1. – № 1 (19). – С. 78-89.

11 Алексеев, Г. Н. Преобразование энергии [Текст] / Г. Н. Алексеев // Издательство «Наука», Москва, 1966. – 189 с.

12 Любарский, Б. Г. Система преобразования энергии автономного транспортного средства на основе электрической передачи мощности с комбинированным накопителем энергии [Текст] / Б. Г. Любарский, В. П. Шайда, С. Г. Бурековский // Локомотив – інформ. ЕКОНОМІЯ ТА РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ, № 09-10, вересень-жовтень, 2015. – С. 42-45.

13 Набокин, А. В. Повышение эффективности автомобилей за счет рекуперации энергии их агрегатов и систем [Электронный ресурс] / А. В. Набокин, В. И. Посметьев, В. О. Никонов // Воронежский научно-технический вестник. – 2016. – Т. 4, № 4 (18). – С. 11-19.

14 Левин, В. И. Профессии сжатого воздуха и вакуума [Текст] / В. И. Левин. – М. : Машиностроение, 1989. – 256 с.

15 Бекмен Г., Гилли П. Тепловое аккумулирование энергии : Пер. с англ. – М. : Мир, 1987. – 272 с.

16 Рубан, А. Г. Анализ характеристик баллонов высокого давления для сжатых газов [Текст] / А. Г. Рубан // Технические газы, № 2, 2009. – С. 48-55.

17 ГОСТ 949-73 Баллоны стальные малого и среднего объема для газов на P_p < = 19,6 МПа (200 кг/см^2). Технические условия.

18 ГОСТ 12247-80 Баллоны стальные бесшовные большого объема для газов на Рр 31,4 и 39,2 МПа (320 и 400 кг/см^2). Технические условия.

19 ПБ 03-576-03. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением // Российская газета. – № 120/1 – 21 июня 2003.

20 Современные конструкции и тенденции развития гидроаккумуляторов для сельскохозяйственных машин [Текст] / Центральный научно-исследовательский институт информации и технико-экономических исследований по тракторному и сельскохозяйственному машиностроению. Министерство транспортного и сельскохозяйственного машиностроения, Москва. – 1980 – 40 с.

21 Виноградов, Л. М. Пневмогидроаккумуляторы [Текст] / Л. М. Виноградов, Ю. Н. Лаптев, С. Г. Телица и др. / М. : Машиностроение, 1993. – 176 с.

22 Патент на изобретение 2444649 РФ, МПК F15B 1/02, F15B 21/14. Устройство для рекуперации гидравлической энергии [Текст] / А. А. Строганов, Л. О. Шешин ; заявитель и патентообладатель Строганов А. А. и Шешин Л. О. – № 2010129792/06 ; заявл. 13.07.2010 ; опубл. 10.03.2012.

23 Бозров, В. М. Перспективы развития автономных пневматических транспортных средств [Текст] / В. М. Бозров, В. И. Ивлев // Проблемы машиностроения и надежности машин, № 4, 2010. – С. 99-104.

24 Ивлев, В. И. Автономные пневматические приводы для легких транспортных средств [Текст] / В. И. Ивлев, С. Ю. Мисюрин // Проблемы машиностроения и автоматизации, № 2 – 2012. – С. 32-34.

25 Просянок, В. В. Оценка эффективности применения пневматического аккумулирования в качестве рабочего тела судовых турбоагрегатов [Текст] / В. В. Просянок, В. М. Житаренко // Науковий вісник Херсонськоі державноі академіі, № 1(8), 2013. – С. 54-61.