The article describes the device and operating principle of the proposed supply and recirculation installation of a tubular type. It is used in systems for providing the microclimate of livestock premises. A method for calculating a tubular heat exchanger is presented, which includes determining

© Мартынов В.М., Хамматов Р.А., Катков А.А.

УДК 621.43:681.51

DOI: 10.31563/1684-7628-2020-56-4-117-124

А.В. Неговора, И.Р. Ахметьянов, Д.А. Гусев

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФОРМЫ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИТНЫХ БАЛЛОНОВ ДЛЯ КОМПРИМИРОВАННОГО ПРИРОДНОГО ГАЗА

Ключевые слова: *автотракторная техника; альтернативные виды топлива; компримированный природный газ; газобаллонное оборудование; баллоны сложной формы; компьютерное моделирование.*

Введение. В современных условиях среди альтернативных видов топлив лидирующую позицию занимает газомоторное топливо, оно хорошо подходит в качестве заменителя жидких нефтяных топлив для двигателей внутреннего сгорания благодаря своей экономичности, экологичности и доступности, при этом не требуя кардинальных изменений конструкции автотракторной техники. В настоящее время в сельском хозяйстве, на транспорте и иных отраслях агропромышленного комплекса Российской Федерации используются сжиженные углеводородные газы преимущественно нефтяного происхождения (СУГ, или пропан-бутановые смеси), компримированные (сжатые) природные газы (КПГ) и сжиженные природные газы (СПГ), основой которых является метан.

Наиболее перспективным из перечисленных газомоторных топлив ввиду низкой стоимости и доступности для использования при эксплуатации двигателей являются КПГ, это обусловлено широким развитием в Российской Федерации магистральных газопроводов и промышленно-бытовых газовых сетей, которые позволяют получать сжатый газ несложным и малозатратным способом. По результатам многих исследований, наиболее экологичным, безопасным и выгодным топливом является метан. Использование же сжиженного метана (в виде СПГ), имея перед КПГ некоторые преимущества, требует применения криогенной техники, что трудновыполнимо в условиях предприятий и поэтому мало распространено.

В то же время главной проблемой широкого внедрения КПГ являются большие массо-габаритные показатели заправочных ёмкостей – баллонов, работающих под большим давлением, –

the design and operating parameters, such as the heat exchanger area, the number and length of pipes of a given diameter, and the flow rates of oncoming air flows. The heat exchanger parameters are selected from the condition of non-freezing of condensate falling out on the pipe walls.

до 22 МПа, причём если при использовании КПГ в автобусах большой вместимости, работающих в городской черте, и на тракторах при наличии передвижной заправочной станции не возникает проблем с размещением баллонов, то при использовании на автобусах малого класса и легковых автомобилях такие проблемы возникают: приходится существенно сокращать размеры багажного отсека.

Данную проблему пытаются решить применением баллонов сложной формы: наборных цилиндрических (PPI, USA), дисковых (рисунки 1, 2).

Рисунок 1
Наборные баллоны фирмы PPI, USA

В Российской Федерации научными коллективами ведутся работы по разработке баллонов сложных форм, например, учёные Волжского политехнического института предложили баллон для метана дисковидной формы [1, 2].

Данный производитель решает проблему организации пространства, занимаемого баллонами, путём применения модульной конструкции, позволяющей гибко менять геометриче-

ские размеры. Уплотнения типа «ласточкин хвост» обеспечивают повышение плотности стыков при воздействии давления. Алюминиевый сплав позволяет существенно снизить вес

кассеты в сборе [3, 4]. Однако при всех положительных качествах применение такой конструкции затруднительно при необходимости создания топливных ёмкостей более сложных форм.

Рисунок 2
Баллон дисковидной формы

Дисковидный баллон хорошо подходит для установки в гнездо запасного колеса, однако в силу конструктивных особенностей масса такого баллона объёмом 30 литров, рассчитанного на рабочее давление 20 МПа, приблизительно равна 35...40 кг. Очевидно, что запас хода при таком объёме сжатого газа невелик, багажный отсек уже загружен допустимыми для большинства легковых автомобилей 50 кг [5].

Проблему малой вместимости газовых баллонов можно решить, используя баллоны сложной формы, устанавливаемые вместо топливного бака и повторяющие его форму. Однако ни один из вышеозначенных подходов не может обеспечить достаточную прочность баллона при приемлемой массе.

Материалы и методы исследований. Для исследования баллонов различных форм было принято решение моделировать кольцевые элементы баллонов, нагружать их расчётным давлением. Для изучения влияния давления на баллоны разной формы использовалась прикладная библиотека программы КОМПАС V17 АРМ FEM [6]. Расчёт в данной программе производится методом конечных элементов; толщина стенки, действующее давление для разных элементов выбраны идентичными, а материал – монолитным.

Форма баллонов выбирается из условия равномерности распределения напряжений, возникающих от действия сжатого газа. Наиболее выгодной формой является сфера, так как эта поверхность имеет минимальную площадь при максимальном объёме [7]. На наземном транспорте нашли применение баллоны цилиндрической формы. На сегодняшний день применительно к баллонам разработано достаточное количество теоретического материала, выработаны оптимальные методы навивки армирующего материала, обеспечивающие высокую прочность [1, 2].

Однако для размещения сферических и цилиндрических баллонов требуется большой

объём, что не приемлемо для автомобильной техники. Данную проблему можно решить, используя баллоны сложной формы, устанавливаемые вместо топливного бака и повторяющие его форму, вместо запасного колеса и т. д. Кроме того, отказ от классической (цилиндрической) формы баллона в пользу плоской или тороидальной позволит снизить потери полезного объёма багажного отсека по аналогии с баллонами для сжиженной пропан-бутановой смеси. Но высокие давления обуславливают большие усилия, действующие на стенки баллона, что существенно увеличивает массу баллонов и накладывает технологические ограничения на процесс их производства. Были проанализированы баллоны различных конструкций, представленные на рисунке 3. Целью моделирования является оценка равномерности распределения нагрузки на поверхность и элементов баллонов различных форм.

Проблему размещения большого запаса газа на борту транспортного средства ввиду отсутствия необходимого объёма в пределах кузова отчасти решают баллоны цилиндрической формы, существенно улучшая возможность компоновки, незначительно увеличивая при этом массу за счёт более толстостенных дна и верхней части. Тороидальные баллоны позволяют установку на место запасного колеса, однако объём сжатого газа, который может храниться в таких баллонах, неприемлемо мал.

Результаты собственных исследований. Распределение напряжений и деформаций баллонов простой формы показаны на рисунке 4. Для изучения влияния давления на баллоны разной формы использовалась прикладная библиотека программы КОМПАС V17 АРМ FEM. В качестве объекта исследования выбраны простые элементы баллонов различных форм. Баллоны с простой поверхностью (рисунок 4 а-г) смоделированы полностью, баллоны сложной формы (рисунок 4 д-з) представлены в виде кольцевых элементов [8].

Рисунок 3

Исследуемые формы баллонов: а – сферический баллон; б – баллон классической формы (цилиндрический); в – тороидальный баллон; г – дисковидный баллон; д – плоский баллон; е – плоский баллон со сплошной перегородкой; е – элемент плоскостенного баллона с распределёнными связями; ж – баллон с распределёнными связями с учётом деформаций

Рисунок 4

Распределение напряжений (а) и деформаций (б) в стенках баллона цилиндрической формы; распределение напряжений и деформаций (в) в баллоне сферической формы; распределение напряжений и деформаций (г) в баллоне тороидальной формы

На рисунке 4 видно, что боковая поверхность сферического цилиндрического баллона нагружена наиболее равномерно, боковая по-

верхность цилиндрического баллона также нагружена равномерно, напряжения и деформации цилиндрической части баллона относи-

тельно невелики, а наиболее напряжёнными участками являются торцевые поверхности. В этом случае проблема решается увеличением толщины торцевых поверхностей, что ведёт к незначительному росту массы баллона. Для тороидального баллона характерны повышенные напряжения на части поверхности, близкой к оси вращения. Данная проблема также может быть решена корректировкой толщины стенки.

Промежуточное положение между тороидальным и цилиндрическим баллонами занимает дисковидный баллон. Такая конструкция отлично согласуется с размерами под запасное колесо. На рисунке 5 показана карта напряжений баллона дисковидной формы.

По карте напряжений (рисунок 5) видно, что имеется большая неравномерность напряжений, что также ведёт к увеличению массы баллона.

Баллоны сложной формы проанализированы в виде кольцевых элементов: кольцевой элемент сечения баллона выбран в центральной его части, так как именно на этот участок приходится максимальное воздействие давления. Расчёт производится методом конечных элементов, толщина стенки, материал и действующее давление для разных элементов выбраны идентичными. Наиболее простым по форме является плоский баллон, часть которого показана на рисунке 6.

Однако, если произвести расчёт для кольцевого элемента баллона плоской формы, показанного на рисунке 6, то можно наблюдать большую неравномерность напряжений, большие значения напряжений и деформаций.

Это вызвано тем, что при отклонении баллона от классической формы (цилиндрической либо сферической) существенно возрастают напряжения на его стенках, а воздействие давления стремится сделать форму баллона близкой к цилиндрической.

Достаточной прочности баллонов такой формы можно достичь лишь многократным увеличением толщины стенок баллона, что делает его массу неприемлемой.

Нами предложена конструкция баллона, в которой общий объём разделён перегородками. Элемент такого баллона показан на рисунке 7.

Расчёт показал существенное снижение напряжений, деформаций и улучшение равномерности распределения напряжений по поверхности элемента баллона. Однако перегородки, особенно при частом расположении, также уменьшают полезный объём и увеличивают массу баллона, поэтому нами предложен более сложный, но эффективный способ распределённых связей, представляющих собой совокупность стержней, соединяющих наибольшие нагружения стенки баллона. Конструкция такого элемента показана на рисунке 8.

Рисунок 5
Карта напряжений баллона дисковидной формы

Рисунок 6
Распределение напряжений (а) и деформаций (б) в стенках баллона цилиндрической формы

Рисунок 7

Распределение напряжений (а) и деформаций (б) в стенках элемента баллона со сплошной перегородкой

Рисунок 8

Распределение напряжений (а) и деформаций (б) в стенках элемента баллона с распределёнными связями

При расчёте было выявлено существенное увеличение неравномерности распределения напряжений по поверхности элемента, многократное снижение деформаций и напряжений. Наиболее нагруженными оказались сами связующие стержни и места их крепления к стенкам элемента, что решается увеличением количества связей на наиболее критичных участках. Кроме того, распределённые связи занимают меньший объём и имеют меньшую массу, чем монолитная перегородка, обеспечивая намного лучшую равномерность напряжений на поверхности элемента и меньшие напряжения и деформации поверхности элемента баллона. Однако данная конструкция не технологична, так как для создания такого баллона требуется сложное плетение, что затруднительно для обеспечения автоматизации процесса.

Одним из наиболее вероятных путей решения проблемы компактного размещения большого объёма сжатого газа в автомобилях является создание массивов из баллонов классических форм. Пример такого массива показан на рисунке 9.

Второй вариант баллона сложной формы с распределёнными связями с учётом деформаций: на плоских поверхностях сосуда имеются

выпуклости, повторяющие деформационные перемещения наружной поверхности. Деформированный баллон с распределёнными связями показан на рисунке 10.

Рисунок 9

Массив из баллонов традиционных форм, повторяющий форму топливного бака легкового автомобиля

В роли связующих элементов в предлагаемой конструкции применены цельнометаллические стяжки. Один из вариантов конструктивного исполнения баллона с распределёнными связями с учётом деформаций показан на рисунке 11.

Рисунок 10
Деформированный баллон с распределёнными связями

Рисунок 11
Вариант конструктивного исполнения баллона с распределёнными связями с учётом деформаций

Карта напряжений баллона с распределёнными связями с учётом деформаций показана на рисунке 12.

Рисунок 12
Распределение напряжений и перемещений в стенках элемента баллона с распределёнными связями с учётом деформаций

Из рисунка 12 видно, что на наружной поверхности баллона не возникает больших напряжений, и деформация такой поверхности минимальна. Основное усилие от давления газа внутри баллона воспринимается стяжками. Снижение загруженности стяжек может быть достигнуто увеличением двумя путями: увеличением количества или диаметра стяжек.

Выводы. При расчёте было выявлено существенное увеличение неравномерности распределения напряжений по поверхности элемента, многократное снижение деформаций и напряжений на поверхности элемента. Наиболее нагруженными оказались сами связующие стержни и места их крепления к стенкам элемента, что решается увеличением количества связей на наиболее критичных участках. Кроме того, распределённые связи занимают меньший объём и имеют меньшую массу, чем монолитная перегородка, обеспечивая намного лучшую равномерность напряжений на поверхности элемента и меньшие напряжения и деформации поверхности элемента баллона.

По результатам расчётов предложены меры по снижению напряжений и улучшения прочностных свойств топливных ёмкостей сложных форм. Таким образом, произведённое моделирование показало высокую эффективность применения распределённых связей при проектировании баллонов сложной формы.

Для производства баллонов с распределёнными связями наиболее оптимальным материалом являются волокнистые композитные материалы – стекловолокно, углеволокно, кевларовая нить со связующим веществом [9], в том числе армированные металлическими нитями композитные конструкции на основе металлического каркаса.

Библиографический список

1. Елпатьевский, А.Н. Прочность цилиндрических оболочек из армированных материалов [Текст] / А.Н. Елпатьевский, В.В. Васильев. М.: Машиностроение, 1972. 168 с.
2. Образцов, И.Ф. Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов [Текст] / И.Ф. Образцов, В.В. Васильев, В.А. Бунаков. М.: Машиностроение, 1977. 144 с.
3. Editors V.V., Gurdal Z. Optimal Design – Theory and Applications to Materials and Structures. Lancaster: Technomic, 1999. 320 p.
4. Vasiliev V.V., Morozov E.V. Mechanics and Analysis of Composite Materials. Amsterdam: Elsevier, 2001. 412 p.
5. Семенищев, С.П. Изготовление металлокомпозитных баллонов [Текст] / С.П. Семенищев, В.П. Глухов, П.П. Мерзляков, О.В. Килина, В.К. Попов // Транспорт на альтернативном топливе: международный научно-технический журнал. 2013. № 3 (33). С. 19.
6. Gusev D.A., Valiev A.R., Urmanov V.G., Kim A.B. Application of modern software products for research of the process of thermal preparation of autotractor equipment. Journal of Advanced Research in Technical Science. 2019. № 16. С. 82–86.
7. Васильев, В.В. Основы проектирования и изготовления конструкций летательных аппаратов из композиционных материалов [Текст] / В.В. Васильев, А.А. Добряков, А.А. Дудченко. М.: МАИ, 1985. 218 с.
8. Неговора, А.В. Проектирование газовых баллонов сложной формы, работающих под давлением [Текст] / А.В. Неговора, И.Р. Ахметьянов, Д.А. Гусев // Чтения академика В.Н. Болотовского: сборник статей. 2020. С. 152–159.
9. Неметаллические конструкционные материалы. Энциклопедия Машиностроения [Текст] / Под ред. А.А. Кулькова, В.В. Васильева. М.: Машиностроение, 2005. Т. 2-4. 464 с.

Сведения об авторах

1. **Неговора Андрей Владимирович**, доктор технических наук, профессор кафедры автомобилей и машинно-тракторных комплексов, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, 450001, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, тел.: +7 (347) 228-32-13, e-mail: negovora@bsau.ru.
2. **Ахметьянов Ильшат Расимович**, кандидат технических наук, доцент кафедры механики и конструирования машин, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, 450001, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, тел.: +7 (347) 252-57-93, e-mail: ahmetir09@rambler.ru.
3. **Гусев Дмитрий Александрович**, кандидат технических наук, доцент кафедры механики и конструирования машин, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, 450001, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, тел.: +7 (347) 252-57-93, e-mail: d-a-gusev@yandex.ru.

Среди альтернативных видов лидирующую позицию занимает газомоторное топливо благодаря своей экономичности и экологичности. Наиболее перспективным ввиду низкой стоимости и доступности являются сжатые природные газы (КПГ). Основной является проблема размещения и хранения газообразного топлива в автомобилях. Существуют различные варианты исполнения баллонов для сжатого природного газа. Предложено

использование баллонов сложной формы для решения проблемы размещения запаса топлива на борту автомобиля. Выполнен анализ свойств газовых баллонов различных форм, произведены расчёты наиболее нагруженных элементов в программном комплексе КОМПАС АРМ-FEM. Расчётным путём определены прочностные характеристики газовых баллонов различных форм и рассмотрена возможность их практической реализации.

A. Negovora, I. Akhmetyanov, D. Gusev

STUDY OF THE INFLUENCE OF SHAPE ON THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF COMPOSITE CYLINDERS FOR COMPRESSED NATURAL GAS

Key words: *automotive equipment; alternative fuels; compressed natural gas; gas cylinder equipment; complex cylinders; computer modeling.*

Authors' personal details

1. **Andrey Negovora**, Doctor of technical Sciences, Professor of the Department of automobiles and machine-tractor complexes, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State

Agrarian University», 450001, Ufa, 50-letiya Oktyabrya St., 34, phone: +7 (347) 228-32-13, e-mail: negovora@bsau.ru.

2. **Ishat Akhmetyanov**, Candidate of technical Sciences, Associate Professor of the chair of automobiles and tractor complexes, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», 450001, Ufa, 50-letiya Oktyabrya St., 34, phone: +7 (347) 252-57-93, e-mail: ahmetir09@rambler.ru.

3. **Dmitry Gusev**, Candidate of technical Sciences, Associate Professor of the chair of automobiles and tractor complexes, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», 450001, Ufa, 50-letiya Oktyabrya St., 34, phone: +7 (347) 252-57-93, e-mail: d-a-gusev@yandex.ru.

Among alternative fuels, the leading position is occupied by gas-engine fuel due to its economy and environmental friendliness. The most promising, due to the low cost and availability, are compressed natural gases (CNG). The main problem is the placement and storage of gaseous fuel in cars. There are various versions of compressed natural gas cylinders. It is proposed to use cylinders of complex

shape to solve the problem of placing the fuel reserve on Board the car. The properties of gas cylinders of various shapes are analyzed, and the most loaded elements are calculated in the COMPASS APM-FEM software package. The strength characteristics of gas cylinders of various shapes are determined by calculation and the possibility of their practical implementation is considered.

© Неговора А.В., Ахметьянов И.Р., Гусев Д.А.

УДК 62-881:51-74

DOI: 10.31563/1684-7628-2020-56-4-124-130

М.Ф. Туктаров, В.Г. Байназаров, С.В. Фефелова, К.А. Ишкинин

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ НА СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЯХ

Ключевые слова: автономная система освещения; солнечная батарея; эффективность работы солнечной электростанции; поток магнитной индукции; явление электромагнитной индукции.

Введение. В последние годы, несмотря на высокую стоимость и длительный срок окупаемости, растет количество автономных систем освещения (далее – АСО) на основе солнечных батарей, применяемых для освещения дорог общего пользования, парков, скверов и дворов многоквартирных домов [3]. Принцип работы солнечной кремниевой батареи основан на том, что в двух кремниевых пластинах, покрытых бором и фосфором, под действием солнечного излучения возникает электрический ток [2].

Основным недостатком солнечных батарей является низкая эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую. Наряду с этим существует и ряд других недостатков: применение аккумуляторных батарей, имеющих большие массогабаритные показатели; малоэффективное использование энергии солнца из-за ограниченности емкости аккумуляторных батарей (у большинства существующих солнечных электростанций при полном заряде аккумуляторных батарей в дневное время солнечные батареи простаивают [1]); необходимость вращать солнечные батареи в течение светового дня таким

образом, чтобы лучи солнца падали перпендикулярно к их поверхности (для повышения эффективности использования солнечной энергии).

Также известно совместное (комбинированное) использование ветрогенератора и солнечной батареи в АСО, однако такая гибридная система малоэффективна в лесостепной местности, занимающей около 50 % от общей территории Республики Башкортостан [5, 9]. В соответствии с вышесказанным повышение эффективности работы АСО на основе солнечных батарей является актуальным вопросом, требующим дальнейшего изучения.

Материалы исследований. В настоящее время для получения электрической энергии (наряду с солнечными батареями) в большинстве случаев применяются синхронные генераторы переменного тока, используемые в ветряных, тепловых, атомных и гидравлических электростанциях, принцип работы которых основан на явлении электромагнитной индукции [8, 9]. В них механическая энергия используется для преобразования энергии постоянного магнитного поля в энергию переменного магнитного