

СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ГИБРИДНЫХ ГАЗОГЕНЕРАТОРОВ МОДУЛЕЙ ПОДУШЕК БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЯ

А.В. Гонсалес Астуа

andresastua@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Модуль подушки безопасности является важнейшей системой пассивной безопасности автомобиля, обеспечивающей защиту водителя и пассажиров при столкновении со статичным или движущимся объектом. Главная задача системы — минимизация травм водителя и пассажиров, а также снижение смертности при дорожно-транспортных происшествиях. Для разработки и тестирования современных высокотехнологичных модулей подушек безопасности необходимы информативные теоретические и экспериментальные методы исследования нестационарных процессов их функционирования, структурно-функциональные схемы типовых исполнительных устройств модулей (газогенераторов), созданные на основе их реальных натурных испытаний и верифицированных методов расчета параметров процессов функционирования газогенератора и раскрытия подушки безопасности. Приведены результаты экспериментальных исследований процессов функционирования модулей подушек безопасности, исполнительными механизмами которых являются гибридные газогенераторы. На основе разработанной методики определения параметров динамики функционирования модулей подушек безопасности различного типа с использованием инструментария экспериментальной физики быстротекущих процессов проведена высокоскоростная регистрация процессов накачки подушек безопасности при активации гибридных газогенераторов, выполнена инструментальная декомпозиция последних, определены структурные компоновки всех узлов и деталей, их функциональное назначение и конструктивные особенности. С применением методов реверс-инжиниринга разработаны

Ключевые слова

Пассивная безопасность, гибридный газогенератор, высокоскоростная съемка, инструментальная декомпозиция, реверс-инжиниринг

3D-модели типовых гибридных газогенераторов. Проведенные исследования и полученные результаты — важная составляющая создания научно-технической и экспериментальной баз для разработки и производства высокотехнологичных систем внутренней пассивной безопасности автомобилей в России

Поступила 11.09.2023

Принята 22.09.2023

© Автор(ы), 2024

Введение. В автомобилестроении всегда уделяется пристальное внимание системам пассивной безопасности водителя и пассажиров, а также внедрению их в конструкторскую и эксплуатационную практику [1–4]. В настоящей работе особое внимание уделено именно этому направлению, конкретно модулям подушек безопасности (ПБ) с газогенераторами (ГГ) гибридного типа.

Важным компонентом системы пассивной безопасности автомобиля является комплекс модулей надувных ПБ. В зависимости от места расположения в салоне автомобиля и выполняемых функций ПБ подразделяются на фронтальные, боковые, головные, коленные и центральные. Их расположение, размеры и время полного срабатывания подбираются с учетом различия в расстояниях между водителем или пассажиром и ближайшими твердыми передними и боковыми поверхностями в момент ДТП, т. е. в зависимости от конструкционных особенностей автомобиля [5–7].

Отметим, что разработка эффективных модулей головных, боковых, центральных и коленных ПБ намного сложнее, чем проектирование модулей фронтальных ПБ. Это объясняется тем, что большая часть энергии от лобового столкновения поглощается бампером, капотом и двигателем, что задерживает на 3...40 мс воздействие на водителя/пассажира. За это время фронтальные ПБ успевают полностью раскрыться при срабатывании обычных пиротехнических ГГ купольного (для водителя) и трубчатого (для переднего пассажира) типов. При боковом ударе автомобиля водителя/пассажира отделяет от другого транспортного средства сравнительно тонкая дверь (буквально десятые доли метра). Следовательно, боковые ПБ, вмонтированные в двери или сиденья, коленные ПБ, размещенные в панели под рулевой колонкой, и головные ПБ, расположенные над дверными проемами, должны раскрыться за весьма малое время порядка 10...15 мс.

Наиболее важный и нагруженный узел модуля ПБ — это ГГ, форма и тип которого во многом определяются назначением и расположением ПБ. Гибридные ГГ состоят из корпуса, в котором находятся газ под высоким давлением и небольшой твердый пиротехнический заряд-активатор

с капсулем-воспламенителем (КВ), элементные составы которых подробно описаны в [8–11]. Основными узлами таких ГГ являются баллон со сжатым газом для наполнения ПБ и примыкающий к нему гранулированный выталкивающий пиротехнический заряд-активатор. Сжатый газ представляет собой смесь инертных газов, например, аргона и гелия или азота и гелия, находящуюся под давлением 20...60 МПа. Сгорание заряда-активатора приводит к вскрытию баллона со сжатым газом, в результате образуется смесь из газа, выделившегося от сгорания пиротехнического состава, и инертного газа, находящегося в баллоне.

Реальные конструкции ГГ модулей ПБ, как правило, в той или иной степени отличаются от схем, приведенных в ряде литературных источников и на доступных информационных ресурсах. *Цель настоящей работы* — представить структурно-конструкторские и технологические решения типичных гибридных ГГ модулей головных, боковых и коленных ПБ, а также описать их функциональные особенности и кинематические характеристики на основе результатов натурных экспериментов и сопутствующих описаний физических процессов и явлений, составляющих суть той или иной технологии.

Экспериментальные исследования проводились на специализированном стенде в соответствии с ранее разработанной методикой испытаний [12] и с учетом рекомендаций по регистрации и верификации результатов измерений параметров быстропротекающих процессов [13–16].

Модуль головной ПБ автомобиля. Для экспериментального анализа конструкции модуля головной ПБ использована типовая модель, широко применяемая в седанах фирмы BMW. Подушка свернута в длинный рулон (рис. 1), который с помощью газоотводной трубки, закрепленной

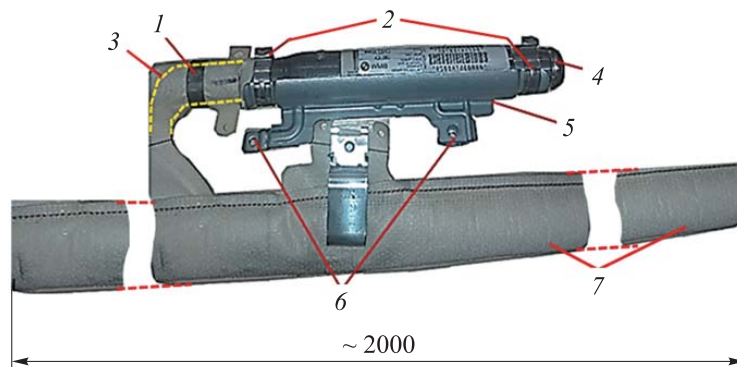


Рис. 1. Газогенератор головной ПБ:

1, 2, 6 — крепежные обруч, стяжка и скобы обоймы соответственно; 3 — контур газоотводной трубки; 4 — корпус; 5 — обойма; 7 — ПБ

на входном отведении ПБ с помощью крепежного обруча, соединен с ГГ. Корпус ГГ размещен в металлической обойме и жестко закреплен двумя металлическими стяжками.

Для создания условий, соответствующих реальному процессу функционирования, использованы две стойки (имитация передней и задней стоек кабины автомобиля) с поперечными стержнями и металлическая труба (имитация верхней накладки кабины автомобиля), а рулон с ПБ и ГГ размещен на дюралевом уголке и закреплен вместе с ним на металлической поперечной трубе с помощью нескольких кабельных стяжек (рис. 2). После сборки приспособление с закрепленной на нем головной ПБ было помещено на стенде для проведения эксперимента. Отметим, что после срабатывания ГГ приход газа накачки на торцы ПБ может быть неодновременным из-за смещенной центровки ГГ относительно указанных торцов. Разновременность может составлять 1...2 мс. Поэтому приспособление уравновешено грузом-компенсатором массой 10 кг для противодействия действующей на него горизонтальной силе, возникающей при неодновременности раскрытия ПБ в горизонтальном направлении в процессе ее накачки истекающими в противоположных направлениях двумя струями газа.

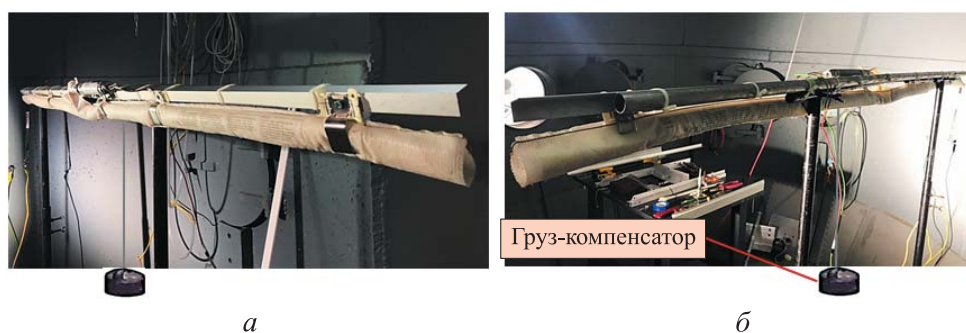


Рис. 2. Расположение головной ПБ на экспериментальном стенде:
а — вид со стороны кабины; *б* — вид с тыльной стороны

В результате анализа фрагментов высокоскоростной видеосъемки процессов накачки и раскрытия головной ПБ, приведенных на рис. 3, выявлено, что нижняя кромка перемещается практически параллельно горизонтальной подвеске. Видно, что для головной ПБ важным фактором является скорость горизонтального раскрытия, так как именно она определяет разновременность вовлечения всей ПБ, имеющей довольно большую длину до 2 м, в процесс вертикального раскрытия. Эта разновременность должна быть минимальной, поскольку критически важным

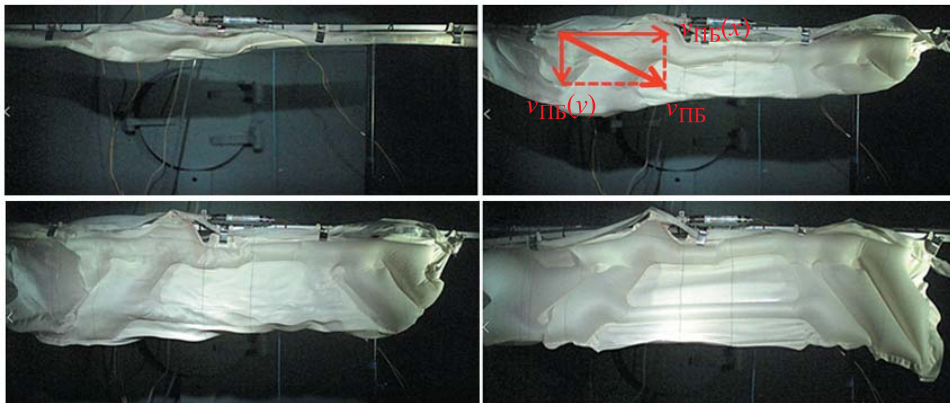


Рис. 3. Фрагменты высокоскоростной видеосъемки процессов накачки и раскрытия головной ПБ

параметром является время полного вертикального раскрытия ПБ в связи с очень малым расстоянием между водителем/пассажем и боковой поверхностью салона автомобиля.

Оценить горизонтальную $v_{ПБ(x)}$ и вертикальную $v_{ПБ(y)}$ составляющие скорости раскрытия головной ПБ можно с помощью встроенного в видеокамеру интерфейса [17–18] и фрагментов видеосъемки (см. рис. 3). Отметим, что в начальный момент времени составляющие скорости $v_{ПБ(x)} = 170 \text{ м/с} \gg v_{ПБ(y)} = 17 \text{ м/с}$. Далее вертикальная составляющая скорости раскрытия увеличивается в 2...3 раза, а горизонтальная уменьшается до 50...75 м/с. Полная измеренная скорость раскрытия головной ПБ $v_{ПБ}$ имеет довольно большие значения и находится в диапазоне 60...90 м/с. Время процесса накачки головной ПБ $t_{ПБ}$ составило всего $\sim 16 \text{ мс}$.

Для анализа функциональных и конструктивных особенностей ГГ последний был извлечен из обоймы и разрезан на составные элементы — активатор, отсек со сжатым газом и газоотводную трубку. Каждый элемент имеет свое функциональное назначение (рис. 4).

Активатор содержит КВ, который инициирует горение пиротехнического заряда-активатора, после чего под действием возникающего избыточного давления продуктов горения разрушается предохранительная мембрана-заглушка, разделяющая полости активатора и отсека со сжатым газом, а далее сжатый газ вследствие увеличения избыточного давления разрушает мембрану-заглушку между полостями отсека и газоотводной трубки и поступает в последнюю. Обе мембраны выполнены из жаропрочного сплава марки ХН70Ю [17]. Отсек, содержащий рабочее тело

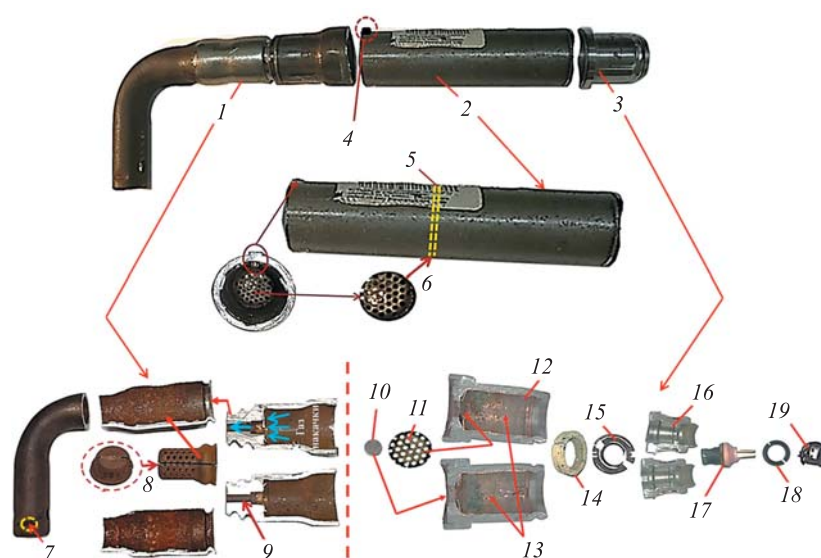


Рис. 4. Разделение ГГ на функциональные элементы:

- 1, 7 — газотводные трубка и отверстие; 2 — отсек со сжатым газом;
 3 — активатор; 4 — штифт; 5 — расположение фильтра в отсеке; 6, 11 — фильтры;
 8 — фильтр-ламинатор; 9 — фильера; 10 — запорная мембрана; 12 — корпус активатора;
 13 — стакан заряда-активатора на внутренней поверхности корпуса; 14 — прокладка;
 15 — прижимная шайба; 16 — втулка; 17 — КВ; 18 — уплотнительное кольцо;
 19 — контактная группа

(нейтральный газ, сжатый до 20...60 МПа), служит для накачки ПБ при срабатывании активатора. Газотводная трубка предназначена для транспортирования потока расширяющегося сжатого газа в полость ПБ; штифт в корпусе отсека — для герметизации отверстия после накачки через него в отсек сжатого газа.

В полости отсека имеется заштампованный в его корпус металлический фильтр (см. рис. 4) для улавливания фрагментов, разрушаемых при срабатывании КВ деталей активатора (осколков оболочки КВ, фильтра, втулки и др.), чтобы исключить их попадание в полость ПБ, так как эти горячие фрагменты, имеющие острые грани, могут нарушить целостность ткани подушки. Кроме того, проходя через регулярно расположенные множественные отверстия фильтра турбулизированный в результате сгорания пиротехнического состава газ приобретает более ламинарный характер течения перед поступлением в газотводную трубку ГГ.

Торец газотводной трубки является глухим (торцевое отверстие трубки изнутри закрыто приваренной заглушкой), а поступление газа в полость ПБ происходит через два газовыпускных отверстия, расположенных симметрично под углом 180° относительно друг друга. При этом

газ накачки, втекающий в узкую фильеру газоотводной трубки (аналог соплового блока), подвергается сильной турбулизации, поэтому для нормализации потока после фильеры установлен фильтр-ламинатор с глухим торцом и множественными регулярными отверстиями на боковой поверхности. Кроме того, фильтр может улавливать мелкие фрагменты, образующиеся при функционировании активатора и не уловленные двумя предыдущими металлическими фильтрами сквозного типа (на торце активатора и внутри отсека со сжатым газом).

На основании результатов детального анализа внутренней структуры конструкции ГГ и активатора созданы их точные пространственные модели (рис. 5).

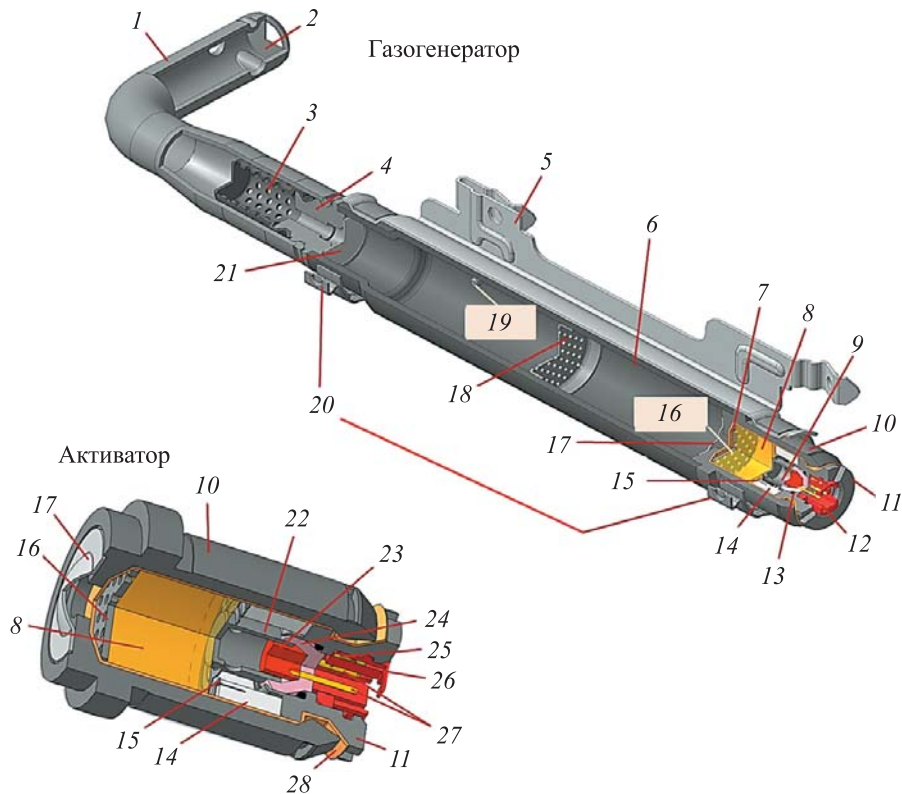


Рис. 5. Трехмерные модели ГГ и активатора:

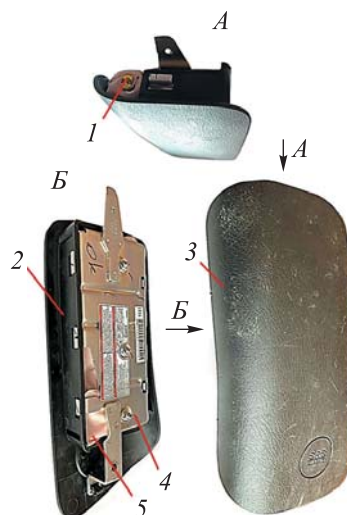
- 1 — газоотводная трубка; 2 — заглушка; 3 — фильтр-ламинатор; 4, 11 — втулки;
- 5 — обойма с крепежными скобами; 6 — отсек со сжатым газом; 7 — стакан заряда-активатора; 8 — пиротехнический заряд-активатор; 9 — КВ с втулкой-изолятором;
- 10 — корпус активатора; 12 — контактная группа; 13 — кольцо; 14 — прокладка;
- 15 — прижимная шайба; 16, 18 — фильтры; 17, 21 — запорные мембраны; 19 — штифт;
- 20 — манжеты; 22 — корпус КВ; 23 — пороховая навеска КВ; 24 — втулка-изолятор;
- 25 — шунт; 26 — контактное гнездо; 27 — контактная вилка;
- 28 — стакан заряда-активатора

В результате исследования материала корпуса отсека гибридного ГГ с применением лазерно-эмиссионной спектроскопии [18] выявлено, что его элементный состав практически соответствует стали 35ХМФЛ, механические характеристики которой обеспечивают прочность этого корпуса при внутреннем давлении газа накачки ~ 60 МПа с необходимым запасом прочности $n \approx 1,5$ [19].

Модуль боковой ПБ автомобиля. Для проведения экспериментального охлаждения модуля боковой ПБ выбрана типовая модель, используемая в автомобилях Ford Ranger (рис. 6). Подушка размещена в полости между контейнером с лицевой панелью и металлическим корытом, которые скреплены с помощью скоб. При этом ГГ и ПБ закреплены в корыте тремя шпильками.

Рис. 6. Типовая модель модуля боковой ПБ, используемая в автомобилях Ford Ranger:

1 — втулка воспламенительного устройства (ВУ); 2 — контейнер; 3 — лицевая панель контейнера; 4 — корыто; 5 — ПБ



Модуль размещен в специальной торцевой полости, расположенной в зоне сопряжения спинки сиденья и самого сиденья под тканью (или кожей) обшивки (рис. 7), и закреплен с помощью двух скоб корыта модуля ПБ.

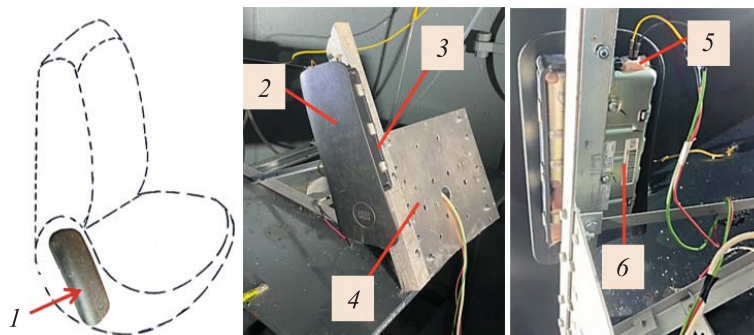


Рис. 7. Приспособление с модулем боковой ПБ на рабочем столе станда:

1 — модуль боковой ПБ; 2 — лицевая панель модуля ПБ; 3 — контейнер; 4 — модель спинки сиденья; 5 — втулка ВУ; 6 — корыто

Для экспериментального охлаждения модуля боковой подушки ПБ в лабораторных условиях спинка сиденья моделировалась дюралевой пластиной, которая наклонена относительно вертикальной плоскости аналогично спинке сиденья автомобиля (см. рис. 7) и зафиксирована в необходимом положении двумя упорами. Каркас торцевой боковой поверхности спинки сиденья моделировался дюралевым уголком, на котором с помощью скоб корыта закреплен модуль боковой ПБ. Отметим, что для возможности проведения высокоскоростной съемки процесса накачки ПБ отсутствовала ограничивающая поверхность, соответствующая правой двери автомобиля.

Характерные фрагменты высокоскоростной видеосъемки процесса раскрытия боковой ПБ приведены на рис. 8, из которого следует, что вначале произошло быстрое раскрытие ПБ вперед, а затем вверх (рис. 9).

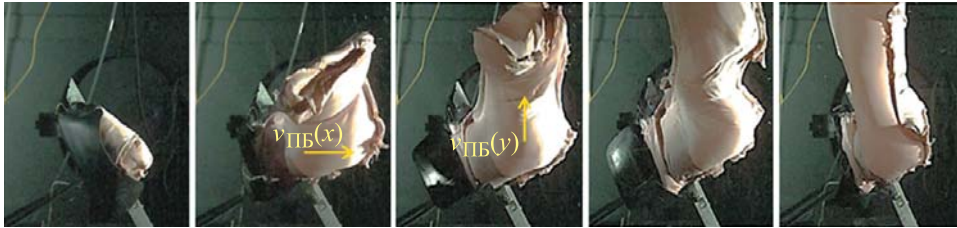


Рис. 8. Характерные фрагменты высокоскоростной видеосъемки раскрытия боковой ПБ

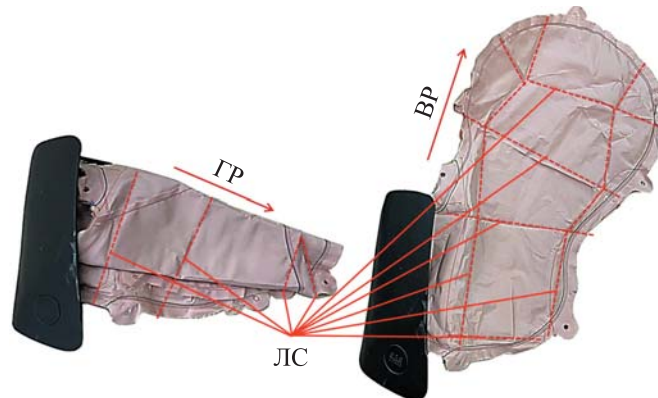


Рис. 9. Последовательность процесса раскрытия боковой ПБ
(ГР, ВР — направления горизонтального и вертикального раскрытия;
ЛС — линии складывания)

Оценить начальную горизонтальную составляющую скорости раскрытия боковой ПБ $v_{ПБ(x)}$ можно по первым приведенным фрагментам высокоскоростной видеосъемки (см. рис. 8). Отметим, что в начальный момент

накачки (1,5...2 мс) значение $v_{\text{ПБ}(x)}$ максимально и составляет ~ 64 м/с, что необходимо для инициирования последующего максимально быстрого раскрытия ПБ в вертикальном направлении. Максимальная вертикальная скорость раскрытия $v_{\text{ПБ}(y)} \approx 53$ м/с, что обеспечивает полное раскрытие боковой ПБ за время $t_{\text{ПБ}} \approx 15$ мс. Столь малое время необходимо, поскольку расстояние между водителем/пассажем и боковой стенкой кабины составляет не более 200...220 мм. По мере завершения процесса полной накачки скорость вертикального раскрытия подушки уменьшается и при $t_{\text{ПБ}} \approx 12$ мс $v_{\text{ПБ}(y)} \approx 31$ м/с.

В результате инструментальной декомпозиции модуль боковой ПБ разделен на корыто, контейнер и подушку с ГГ, сопряженным с поддоном. Затем ГГ с поддоном был извлечен из тканевого конверта подушки, после чего ГГ, закрепленный в поддоне с помощью двух хомутов, отделен от поддона и двумя продольными разрезами разделен на два симметричных фрагмента (рис. 10).

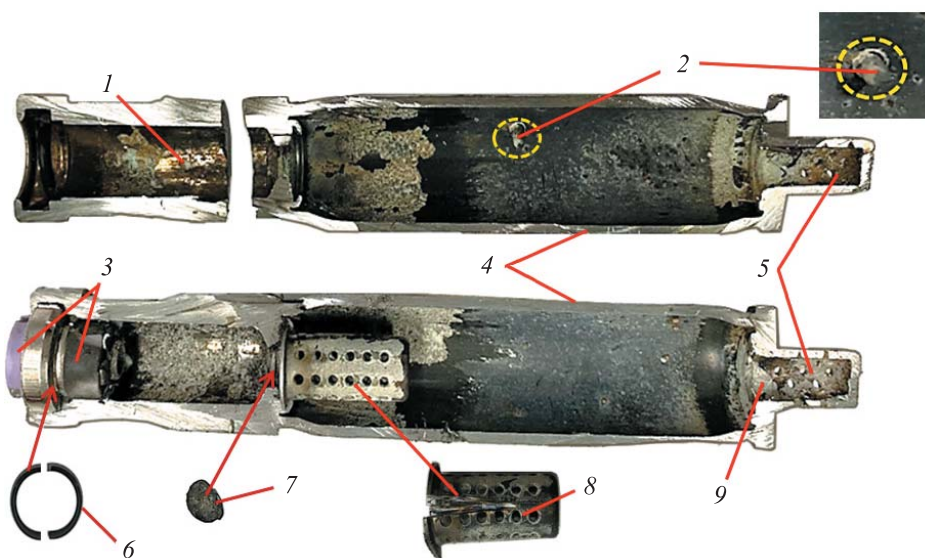


Рис. 10. Декомпозиция ГГ модуля боковой ПБ:

- 1 — камера сгорания пиротехнического заряда-активатора; 2 — штифт-пробка;
 3 — ВУ; 4 — отсек со сжатым газом; 5 — газоотводная трубка; 6 — прокладка;
 7, 9 — запорные мембраны камеры сгорания и газоотводной трубки; 8 — фильтр

На корпусе ГГ имеется штифт-пробка, технологически предназначенный для наполнения отсека ГГ сжатым газом и последующей герметизации уже заполненного отсека. На выходе из камеры сгорания в отсеке со сжатым газом установлен полый цилиндрический фильтр, а неболь-

шие отверстия на торцах отсека закрыты запорными мембранами, которые приварены к отсеку и до срабатывания пиротехнического заряда-активатора герметично перекрывают отверстия между камерой сгорания и отсеком, а также между отсеком и газоотводной трубкой. При срабатывании заряда-активатора мембрана, разделяющая камеру сгорания и отсек со сжатым газом, выбивается избыточным давлением (100 МПа) продуктов горения, после чего разрушается запорная мембрана, расположенная между отсеком со сжатым газом и газоотводной трубкой. Втулка ВУ с КВ герметизирована от корпуса камеры сгорания пиротехнического заряда-активатора кольцевой прокладкой.

Пространственные модели модуля боковой ПБ и гибридного ГГ (исполнительного механизма) приведены на рис. 11.

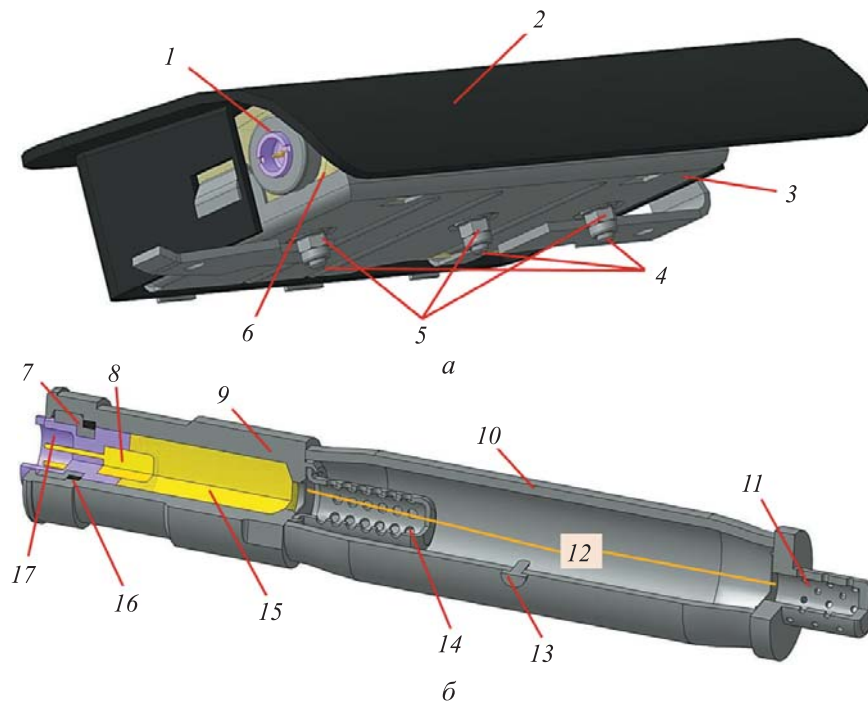


Рис. 11. Трехмерные модели модуля боковой ПБ (а) и гибридного ГГ (б):

- 1 — ГГ; 2 — лицевая панель контейнера; 3 — корыто; 4 — крепежные шпильки поддона ГГ; 5 — гайки; 6 — ПБ; 7 — втулка; 8 — КВ; 9 — корпус заряда-активатора; 10 — отсек со сжатым газом; 11 — газоотводная трубка; 12 — запорные мембраны; 13 — штифт; 14 — фильтр; 15 — пиротехнический заряд; 16 — прокладка; 17 — изолятор

Модуль коленной ПБ автомобиля. Для проведения экспериментального охлаждения модуля коленной ПБ (рис. 12) в целях его структурно-функционального анализа выбрана типовая модель, выпускаемая од-

ним из ведущих производителей модулей ПБ TRW Airbag Systems GmbH и используемая в автомобиле Volkswagen Golf 6. Модуль с помощью металлического корыта закреплен в полости приборной панели под рулевой колонкой так, что лицевая панель модуля располагается напротив коленей водителя, а закрепленный с помощью шпилек внутри корыта трубчатый ГГ — на нижней линии абриса модуля.

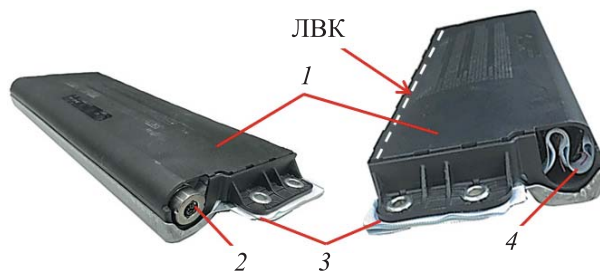


Рис. 12. Модуль коленной ПБ:

1 — лицевая панель; 2 — ГГ; 3 — корыто; 4 — ПБ;
ЛВК — линия вскрытия контейнера

Модуль коленной ПБ водителя встроен в подрулевую панель, поэтому для максимально возможного натурального моделирования процесса срабатывания модуля использовано специальное приспособление (рис. 13). Панель приспособления, к которой крепится весь модуль, наклонена относительно вертикальной плоскости на угол $\alpha = 40^\circ$, соответствующий углу наклона подрулевой лицевой панели автомобиля.

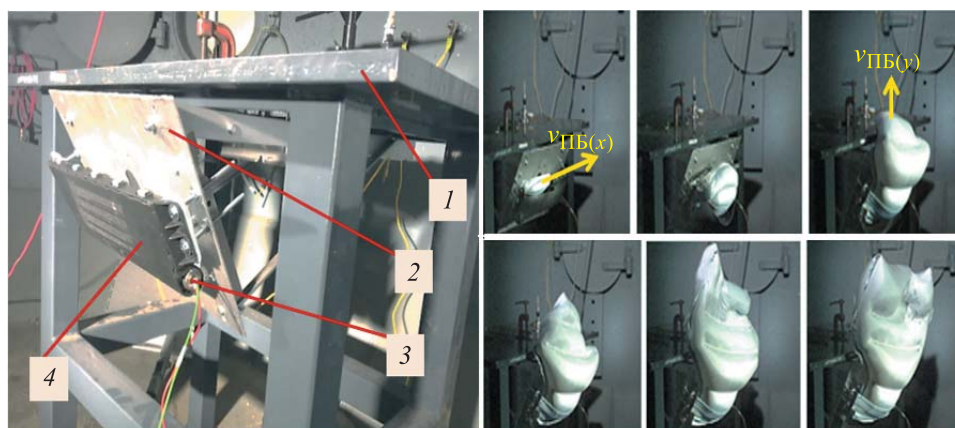


Рис. 13. Специальное приспособление для размещения модуля ПБ на экспериментальном стенде и характерные фрагменты высокоскоростной видеосъемки процесса раскрытия коленной ПБ:

1 — рабочий стол; 2 — панель; 3 — ГГ; 4 — модуль коленной ПБ

В результате оценки горизонтальной и вертикальной составляющих скорости раскрытия ПБ $v_{\text{ПБ}(x)}$ и $v_{\text{ПБ}(y)}$ по характерным фрагментам высокоскоростной видеосъемки процесса раскрытия ПБ (см. рис. 13) выявлено, что в начальный момент времени (1,5...2 мс) значение горизонтальной составляющей скорости существенно больше значения вертикальной составляющей, а именно, значение горизонтальной скорости раскрытия ПБ, практически совпадающее со значением скорости процесса раскрытия лицевой панели, составило $v_{\text{ПБ}(x)} \approx 153$ м/с. За это небольшое время ПБ раскрылась в вертикальном направлении на $\Delta h \approx 0,05$ м, а начальное значение вертикальной составляющей скорости раскрытия $v_{\text{ПБ}(y)}$ составило ~ 25 м/с.

Из рис. 13 следует, что вертикальная составляющая скорости раскрытия увеличивается в 3 раза и достигает максимального значения $v_{\text{ПБ}(y)} \approx 75$ м/с, в связи с чем верхняя кромка ПБ двигается практически параллельно горизонтальной координате, а время полного раскрытия составляет $t_{\text{ПБ}} \approx 14$ мс. Столь малое время необходимо, потому что расстояние между коленями водителя и подрулевой панелью составляет не более 250 мм.

В результате инструментальной декомпозиции модуль был разделен на лицевую панель, корыто и ПБ, после чего из специального цилиндрического кармана, выполненного из того же материала, что и ПБ, извлечен ГГ (рис. 14). Газогенератор структурно разделен на три узла: 1) газоотводный модуль (газоотводная трубка с сеткой-фильтром), который размещен во входном портале ПБ; 2) активатор с пиротехническим зарядом и КВ; 3) отсек со сжатым нейтральным газом — цилиндрический корпус, находящийся между зарядом и КВ.

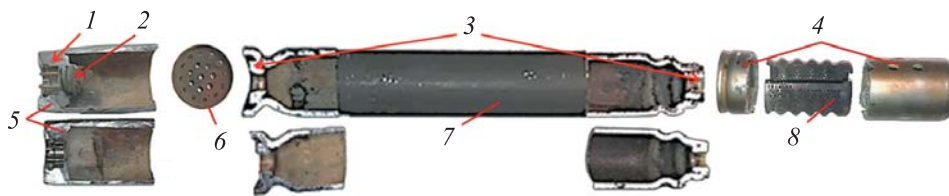


Рис. 14. Структура ГГ модуля коленной ПБ:

1 — втулка КВ; 2 — КВ; 3 — втулки с запорными мембранами; 4 — газоотводная трубка;
5 — корпус активатора; 6, 8 — сетки-фильтры; 7 — отсек со сжатым газом

Корпус активатора, в котором размещены изолятор и втулка с КВ и контактной группой (на рис. 14 не показана), — это неотъемлемая часть отсека со сжатым газом, условно отделенная от него обжатым перешейком. Между корпусом активатора и отсеком имеется выпуклая сетка-

фильтр, отсекающая попадание крупных твердых частиц продуктов сгорания пиротехнического заряда в отсек со сжатым газом. Газопрopusкные отверстия во втулках отсека запаены тонкими запорными мембранами, которые вскрываются под действием высокого избыточного давления продуктов сгорания пиротехнического заряда-активатора.

Газоотводная трубка фиксируется на корпусе отсека с помощью технологической операции кольцевого обжима и содержит в полости цилиндрическую сетку-фильтр с мелкоячеистой структурой, предназначенную для отсека остаточных мелкодисперсных частиц горения пиротехнического заряда от их попадания в полость ПБ.

Пространственные модели модуля коленной ПБ и гибридного ГГ (исполнительного механизма) приведены на рис. 15.

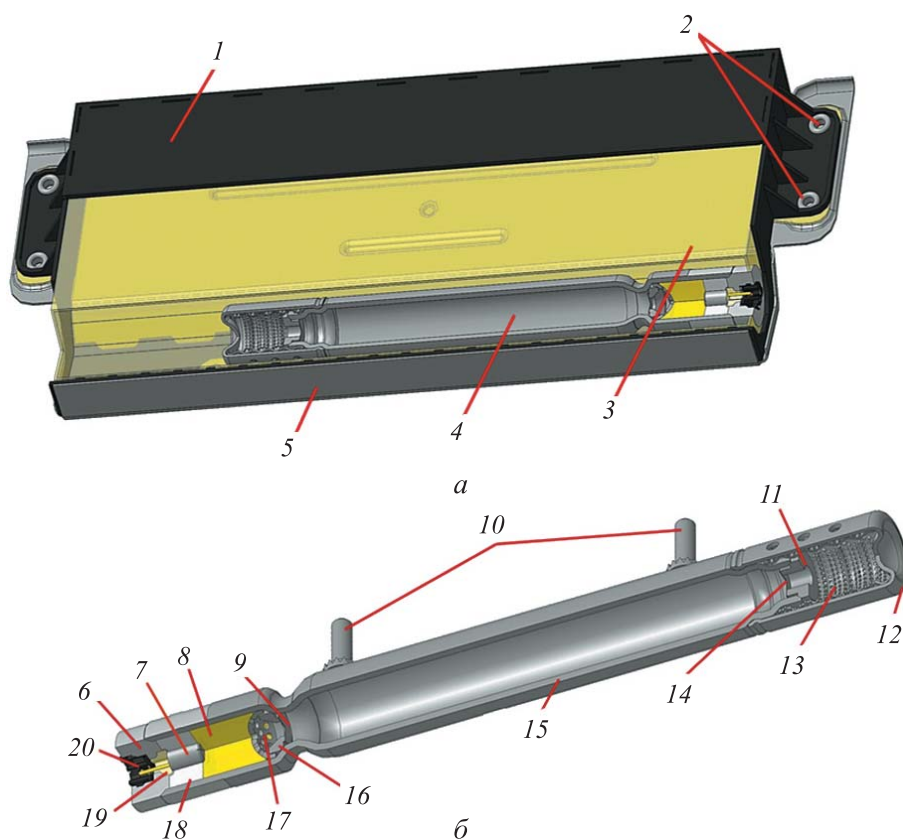


Рис. 15. Трехмерные модели модуля коленной ПБ (а) и гибридного ГГ (б):

- 1 — лицевая панель; 2 — заклепки; 3 — ПБ; 4 — ГГ; 5 — корыто; 6 — втулка КВ; 7 — КВ;
 8 — пиротехнический заряд; 9, 14 — запорные мембраны; 10 — шпильки;
 11, 16 — втулки; 12 — газоотводная трубка; 13, 17 — сетки-фильтры;
 15 — отсек со сжатым газом; 18, 19 — изоляторы;
 20 — контактное гнездо с шунтом

Уровень измеренного звукового давления для всех рассмотренных модулей регистрировали шумомером на расстоянии 0,4...0,5 м от ГГ, исходя из реальных условий посадки водителя/пассажира в салоне автомобиля. Значение звукового давления находится в диапазоне от 85 до 95 дБ, что в соответствии с промышленными стандартами РФ ниже допустимого уровня звука на рабочих местах [20], т. е. не представляет опасности для слухового аппарата человека.

Заключение. С помощью информативного экспериментального метода исследования динамики функционирования гибридных ГГ модулей головных, боковых и коленных ПБ установлены кинематические и акустические параметры процессов их срабатывания, а инструментальная декомпозиция указанных гибридных ГГ и последующий реверс-инжиниринг позволили установить детальную структуру их конструктивного воплощения и функциональные особенности всех узлов и элементов ГГ.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кравец В.Н. Измерители эксплуатационных свойств автотранспортных средств. Н. Новгород, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2014.
- [2] Полунгян А.А., ред. Проектирование полноприводных колесных машин. Т. 3. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
- [3] Хусаинов А.Ш., Кузьмин Ю.А. Пассивная безопасность автомобиля. Ульяновск, Изд-во УлГТУ, 2011.
- [4] Савич Е.Л., Капустин В.В. Системы безопасности автомобилей. Ульяновск, Инфра-М, 2019.
- [5] Минченко А.В., Кузьмин Н.А., Протасов В.И. и др. Анализ систем пассивной безопасности. *Молодой ученый*, 2020, № 11, с. 44–47.
- [6] Гонсалес Астуа А.В., Карнаухов К.А., Малищук Т.С. и др. Особенности конструкции и технологии производства куполообразных твердотопливных газогенераторов с одноступенчатым срабатыванием системы пассивной безопасности автомобиля. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2023, № 1 (144), с. 67–79. DOI: <http://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-1-67-79>
- [7] Юскаев Ю.Ю., Раевская Л.Т. Моделирование переносного устройства пассивной безопасности пассажиров автомобиля. *Инновационный транспорт*, 2020, № 2, с. 70–73. DOI: <https://doi.org/10.20291/2311-164X-2020-2-70-73>
- [8] Мельников В.Э. Современная пиротехника. М., Наука, 2014.
- [9] Шидловский А.А. Основы пиротехники. М., Машиностроение, 1973.
- [10] Алешин А.В., Широкова Г.Н. Пиротехнические составы для получения азота на основе азидов. *Химическая физика*, 1999, т. 18, № 2, с. 72–79.

- [11] Hirata N., Matsuda N., Kubota N. Combustion of NaN_3 based energetic pyrolants. *Propellants, Explos. Pyrotech.*, 2000, vol. 25, no. 5, pp. 217–219.
DOI: [https://doi.org/10.1002/1521-4087\(200011\)25:5<217::AID-PREP217>3.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/1521-4087(200011)25:5<217::AID-PREP217>3.CO;2-G)
- [12] Котиев Г.О., Петюков А.В., Гонсалес Астуа А.В. Экспериментально-теоретический метод исследования особенностей функционирования модулей подушек безопасности автомобиля. *Труды НАМИ*, 2021, № 2, с. 15–24.
DOI: <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2021-2-15-24>
- [13] Андреев С.Г., Бойко М.М., Селиванов В.В. Экспериментальные методы физики взрыва и удара. М., ФИЗМАТЛИТ, 2013.
- [14] Орленко Л.П., ред. Физика взрыва. М., ФИЗМАТЛИТ, 2004.
- [15] Remote control unit — help file. *Vision Research–AMETEK Material Analysis Division*, Wayne, New Jersey, 2013.
- [16] Phantom video player help file. *Vision Research–AMETEK Material Analysis Division*, Wayne, New Jersey, 2016.
- [17] Гонсалес Астуа А.В. Обратная задача определения давления накачки гибридного газогенератора боковой подушки (шторки) безопасности автомобиля. *Сб. тез. докл. Всерос. студ. науч. конф. «Студенческая научная весна»*. М., Научная библиотека, 2022, с. 106–107.
- [18] Гонсалес Астуа А.В., Гончаров Р.Б., Малищук Т.С. Экспериментальный анализ элементного состава материалов для изготовления газогенераторов модулей подушек безопасности автомобиля. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2022, № 2 (141), с. 75–88.
DOI: <http://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-2-75-88>
- [19] Гонсалес Астуа А.В., Гончаров Р.Б., Петюков А.В. Метод расчета на прочность корпуса газогенератора автомобильной подушки безопасности. *Вестник МАДИ*, 2022, № 1, с. 3–11.
- [20] Савенко С.К., Гурин А.А., Малый П.С. Ударные воздушные волны в подземных выработках. М., Недра, 1973.

Гонсалес Астуа Андрес Виктор — аспирант кафедры «Колесные машины» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гонсалес Астуа А.В. Структурно-функциональный анализ гибридных газогенераторов модулей подушек безопасности автомобиля. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2024, № 1 (148), с. 36–54. EDN: CTXJNK

**STRUCTURAL AND FUNCTIONAL ANALYSIS
OF THE HYBRID GAS GENERATORS
OF THE VEHICLE AIRBAG MODULES**

A.V. Gonsales Astua

andresastua@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

Airbag module is the most important passive safety system in a vehicle providing the driver and passengers' protection in the event of collision with a static or moving object. The system main task is to minimize injuries to the driver and passengers, as well as reduce mortality in the road accidents. To develop and test the modern high-tech airbag modules, informative theoretical and experimental methods for studying their non-stationary operation processes are required, as well as the structural and functional diagrams of the modules typical actuators (gas generators). They are created on the basis of real field tests and verified methods in calculating parameters of the gas generator operation processes and airbags deployment. Experimental study results of the airbag modules operation process are presented; hybrid gas generators are their actuators. Based on the developed methodology to determine the operation dynamics parameters of the airbag modules of various types using tools of the experimental physics of fast processes, high-speed photography of the airbag inflation processes with activating the hybrid gas generators was carried out. Besides, the latter were instrumentally decomposed, and structural layouts of all the components and parts were determined, as well as their functional purpose and design peculiarities. Using the reverse engineering methods, 3D models of the typical hybrid gas generators were developed. Conducted research and its results are an important component in creating scientific, technical and experimental base for design, development and production of the high-tech internal passive vehicle safety systems in Russia

Keywords

Passive safety, hybrid gas generator, high-speed photography, instrumental decomposition, reverse engineering

Received 11.09.2023

Accepted 22.09.2023

© Author(s), 2024

REFERENCES

- [1] Kravets V.N. Izmeriteli ekspluatatsionnykh svoystv avtotransportnykh sredstv [Measuring performance properties of motor vehicles]. Nizhniy Novgorod, NSTU im. R.E. Alekseeva Publ., 2014.
- [2] Polungyan A.A., ed. Proektirovanie polnoprivodnykh kolesnykh mashin. T. 3 [Design of all-wheel drive wheeled vehicles. Vol. 3]. Moscow, BMSTU Publ., 2008.
- [3] Khusainov A.Sh., Kuzmin Yu.A. Passivnaya bezopasnost avtomobilya [Passive safety of a car.]. Ulyanovsk, Izd-vo UITSU Publ., 2011.
- [4] Savich E.L., Kapustin V.V. Sistemy bezopasnosti avtomobiley [Safety systems of automobiles]. Ulyanovsk, Infra-M Publ., 2019.
- [5] Minchenko A.V., Kuzmin N.A., Protasov V.I., et al. Analysis of passive safety systems. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], 2020, no. 11, pp. 44–47 (in Russ.).
- [6] Gonsales Astua A.V., Karnaukhov K.A., Malishchuk T.S., et al. Design and production technology features of the domed solid fuel gas generators with single-stage response of the vehicle passive safety system. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2023, no. 1 (144), pp. 67–79 (in Russ.). DOI: <http://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-1-67-79>
- [7] Yuskaev Yu.Yu., Raevskaya L.T. Simulation of a motor vehicle portable device of passengers' passive safety. *Innovatsionnyy transport* [Innotrans], 2020, no. 2, pp. 70–73 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.20291/2311-164X-2020-2-70-73>
- [8] Melnikov V.E. Sovremennaya pirotekhnika [Modern pyrotechnics]. Moscow, Nauka Publ., 2014.
- [9] Shidlovskiy A.A. Osnovy pirotekhniki [Fundamentals of pyrotechnics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973.
- [10] Aleshin A.V., Shirokova G.N. Pyrotechnic compositions for nitrogen production on the basis of azides. *Khimicheskaya fizika*, 1999, vol. 18, no. 2, pp. 72–79 (in Russ.).
- [11] Hirata N., Matsuda N., Kubota N. Combustion of NaN_3 based energetic pyrolants. *Propellants, Explos. Pyrotech.*, 2000, vol. 25, no. 5, pp. 217–219. DOI: [https://doi.org/10.1002/1521-4087\(200011\)25:5<217::AID-PREP217>3.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/1521-4087(200011)25:5<217::AID-PREP217>3.CO;2-G)
- [12] Kotiev G.O., Petyukov A.V., Gonsales Astua A.V. Experimental-theoretical method for studying the vehicle airbag modules functioning. *Trudy NAMI*, 2021, no. 2, pp. 15–24 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.51187/0135-3152-2021-2-15-24>
- [13] Andreev S.G., Boyko M.M., Selivanov V.V. Eksperimentalnye metody fiziki vzryva i udara [Experimental methods of explosion and impact physics]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2013.
- [14] Orlenko L.P., ed. Fizika vzryva [Explosion physics]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2004.
- [15] Remote control unit — help file. *Vision Research-AMETEK Material Analysis Division*, Wayne, New Jersey, 2013.
- [16] Phantom video player help file. *Vision Research-AMETEK Material Analysis Division*, Wayne, New Jersey, 2016.

- [17] Gonsales Astua A.V. [Inverse problem of determining the inflation pressure of a hybrid gas generator of a car side airbag (curtain)]. *Sb. tez. dokl. Vseros. stud. nauch. konf. "Studencheskaya nauchnaya vesna"* [Abs. Russ. Stud. Sc. Conf. Student Spring]. Moscow, Nauchnaya biblioteka Publ., 2022, pp. 106–107 (in Russ.).
- [18] Gonsales Astua A.V., Goncharov R.B., Malishchuk T.S. Experimental analysis of elemental composition of materials used to manufacture gas generators for vehicle airbag modules. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2022, no. 2 (141), pp. 75–88 (in Russ.).
DOI: <http://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-2-75-88>
- [19] Gonsales Astua A.V., Goncharov R.B., Petyukov A.V. Calculation method for the strength of the automotive airbag gas generator housing. *Vestnik MADI*, 2022, no. 1, pp. 3–11 (in Russ.).
- [20] Savenko S.K., Gurin A.A., Malyy P.S. Udarnye vozdushnye volny v podzemnykh vyrabotkakh [Shock air waves in underground excavations]. Moscow, Nedra Publ., 1973.

Gonsales Astua A.V. — Post-Graduate Student, Department of Wheeled Vehicles, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Gonsales Astua A.V. Structural and functional analysis of the hybrid gas generators of the vehicle airbag modules. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2024, no. 1 (148), pp. 36–54 (in Russ.).

EDN: CTXJNK