

## СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДУЛЕЙ ФРОНТАЛЬНЫХ ДВУХСТУПЕНЧАТЫХ ПОДУШЕК БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЯ

А.В. Гонсалес Астуа

andresastua@yandex.ru

Т.С. Малищук

malishchuk@bmstu.ru

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

---

### Аннотация

Приведены результаты экспериментальных исследований процессов функционирования модулей фронтальных двухступенчатых водительской и пассажирской подушек безопасности автомобиля. На основе современного высокоинформативного инструментария экспериментальной физики быстропротекающих процессов разработана и реализована экспериментальная методика определения кинематических параметров динамики функционирования модулей подушек безопасности автомобилей, проведены натурные эксперименты по фиксации процессов функционирования модулей двухступенчатых подушек безопасности с применением высокоскоростной видеосъемки. Подготовлены и приведены подробные фрагменты видеосъемки процесса раскрытия лицевых панелей контейнеров, разворачивания и опадания подушек безопасности для случая срабатывания модуля водительской подушки безопасности, разнесенного во времени. Выполнена инструментальная декомпозиция исполнительных устройств — пиротехнических твердотопливных газогенераторов, определены структурные компоненты всех узлов и деталей, их функциональное назначение и конструктивные особенности. С применением методов реверсивного инжиниринга, в том числе прямого измерения и технологического анализа, разработаны 3D-модели газогенераторов и модулей двухступенчатых подушек безопасности. Результаты исследования являются важной и необходимой составляющей создания научно-технической и экспериментальной баз для разработки и производства высокотехнологичных систем внутренней пассивной безопасности автомобиля

### Ключевые слова

*Пассивная безопасность, модуль подушки безопасности, газогенератор, высокоскоростная съемка, инструментальная декомпозиция, реверс-инжиниринг*

Поступила 16.01.2023

Принята 24.03.2023

© Автор(ы), 2023

**Введение.** По мере технического усовершенствования автомобилей неуклонно увеличивается и их мощность. Это позитивное развитие автомобилей в сочетании с растущей плотностью транспортных потоков влечет за собой ужесточение требований к степени обеспечения безопасности водителя и пассажиров и активизацию исследований в области развития пассивных систем безопасности.

В категорию пассивной безопасности входят все конструктивные меры, принимаемые для защиты водителя и пассажиров от травм при аварии, либо для снижения опасности травмирования. Важнейшими компонентами системы пассивной безопасности современных автомобилей являются компоненты, составляющие внутренний модуль пассивной безопасности: система ремней безопасности с натяжителями и система модулей подушек безопасности (ПБ) — фронтальных, боковых, головных и коленных. Наиболее значимые методические, экспериментальные и теоретические результаты исследований процессов функционирования модулей ПБ различных типов опубликованы в [1–10], а инструментарий предшествующих исследований составлен и описан в [11, 12].

Сегодня при разработке новых модулей ПБ речь идет в основном об оптимизации процессов срабатывания ПБ, их раскрытия и взаимодействия с ними пассажиров для уменьшения опасности травмирования. Алгоритмы срабатывания ПБ постоянно совершенствуются, при этом учитываются не только скорости движения и замедления транспортного средства, но и вес пассажира, место его расположения, использование ремня безопасности, а также наличие детского кресла. Одновременно совершенствуются и международные стандарты на испытания компонентов модулей ПБ, например ISO 12097-2:1996<sup>1</sup>, в которых заданы требования к проведению, параметрам и верификации результатов испытаний модулей ПБ на надежность функционирования после внешних воздействий, моделирующих параметры жизненного цикла.

Модуль любой ПБ — это совокупность следующих основных принципиальных узлов: эластичной оболочки, наполняемой газом; газогенератора (ГГ) — исполнительной системы; электронного блока управления (ЭБУ). Раскрытие и надувание ПБ газом обеспечивает ГГ. Задача ГГ — в короткие сроки сгенерировать большое количество газа (азота), которым затем заполнится ПБ. Газогенератор состоит из пиропатрона — капсуля-воспла-

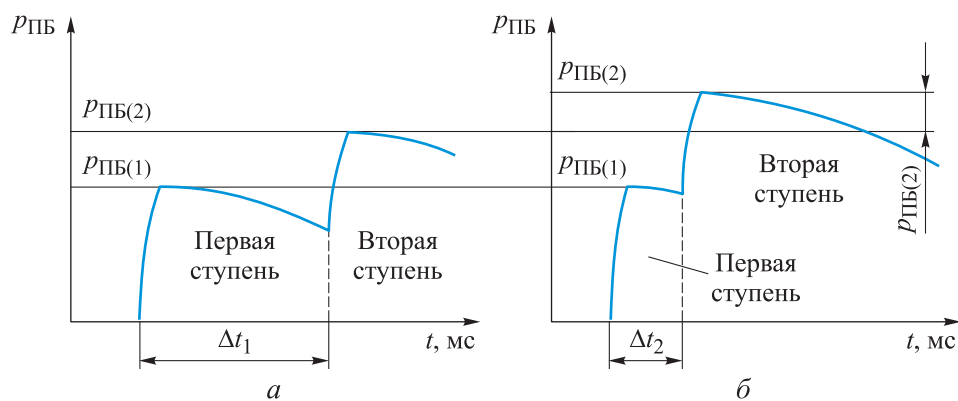
---

<sup>1</sup> ISO 12097-2:1996. Транспорт дорожный. Компоненты предохранительных подушек, автоматически заполняемых воздухом. Часть 2. Испытание модулей пневмоподушки.

менителя (КВ) и пиротехнического газогенерирующего состава (ГГС), чаще называемого пиротехническим зарядом (ПЗ) [13, 14], который при горении выделяет газ. Подушка безопасности и ГГ в совокупности образуют модуль ПБ, а пиропатрон предназначен для воспламенения ГГС.

Для водительских ПБ применяются ГГ куполообразной формы, а для пассажирских — трубчатой формы, причем они могут иметь одно- или двухступенчатое срабатывание. В одноступенчатом ГГ воспламенение единственного ПЗ происходит в один этап. В двухступенчатых ГГ имеются два ПЗ, которые активируются по очереди, через определенный промежуток времени. С учетом степени тяжести и типа аварии блок управления модуля ПБ рассчитывает промежуток времени  $\Delta t$  между двумя этапами срабатывания, который находится в диапазоне 5...50 мс, при этом на втором этапе накачки ПБ в нее поступает дополнительный объем газа.

Таким образом, сложные двухступенчатые ГГ водительской и пассажирской ПБ позволяют обеспечить более высокий уровень безопасности при тяжелых дорожно-транспортных происшествиях (ДТП), поскольку в подобных ГГ оба ПЗ активируются последовательно. При более тяжелых авариях интервал  $\Delta t$  между воспламенением ПЗ меньше ( $\Delta t_2 < \Delta t_1$ ), в результате чего давление накачки ПБ  $p_{\text{ПБ}(2)}$  больше (рис. 1).



**Рис. 1.** Тайминг активации двухступенчатого ГГ ПБ при легком (а) и тяжелом (б) ДТП

В соответствии с классификацией ООН модули ПБ являются неразборными пиротехническими устройствами и относятся к классу опасности 9,0 по UN3268 (№ ООН 3268)<sup>2</sup>. Для их производства и транспортировки требуется специально обученный персонал, а ГГ любого модуля ПБ не может быть

<sup>2</sup> № ООН 3268 «Устройства безопасности с электрическим инициированием».

раздетализован в снаряженном состоянии, так как всегда имеет неразъемный стальной сварной корпус. Кроме того, опыт, основанный на большом числе экспериментов по натурным испытаниям модулей ПБ практически всех имеющихся типов [5–10], показал, что реальная структура и конструктивные особенности различных ГГ никогда не соответствовали их схематическим представлениям, имеющимся на многочисленных информационных ресурсах и в печатных технических изданиях. Это связано с тем, что данное высокотехнологичное направление производства модулей ПБ и сопутствующих компонентов (датчиков удара, ГГ, систем управления) в России отсутствует, а все используемые модули ПБ вплоть до настоящего времени являются импортными техническими продуктами. Таким образом, для установления детальной соразмеренной структуры любого ГГ, функционального анализа и последующего реверс-инжиниринга необходимы натурное охлаждение модуля ПБ, подробная инструментальная декомпозиция ГГ и проведение на этой основе 3D-моделирования его реальной конструкции.

**Экспериментальные исследования модуля водительской фронтальной двухступенчатой ПБ.** Структурно-функциональный анализ ГГ двухступенчатой водительской ПБ выполнен на основе результатов экспериментального охлаждения типового модуля фронтальной водительской ПБ с двухступенчатым срабатыванием, используемого в автомобилях BMW 5 (рис. 2). Модуль размещен в специальной профилированной полости, расположенной на фронтальной поверхности рулевого колеса.

На наружной панели ГГ имеются втулки с двумя КВ № 1 и № 2, которые обеспечивают управляемое с помощью ЭБУ двухступенчатое последовательное срабатывание ГГ с разновременностью, зависящей от фиксируемой датчиками степени перегрузки при ДТП, т. е. от степени тяжести ДТП.

Модуль водительской ПБ подготовлен к охлаждению с использованием экспериментальной схемы [1] и закреплен в коробе, расположенном на крепежной панели, зафиксированной с помощью специального приспособления на рабочем столе в бронекамере. Выводы КВ № 1 и № 2 модуля ПБ были коммутированы с клеммами генератора иницирующих импульсов, имеющих функцию задержки, которая позволяет формировать последовательность из двух иницирующих импульсов для цепей воспламенения ГГ в диапазоне 1...65 535 мс и синхроимпульса для запуска видеосъемки.

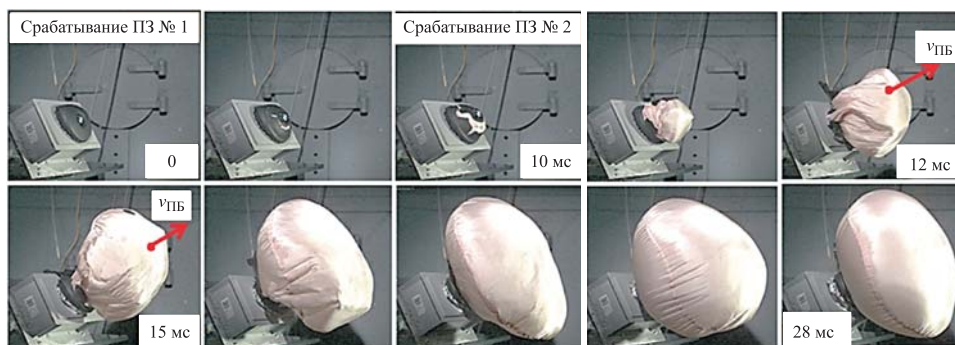
Параметры высокоскоростной видеосъемки установлены в соответствии с предположительным временем процесса (до 40 мс) и максимальной возможной скоростью раскрытия ПБ (до 80 м/с): скорость съемки



**Рис. 2.** Модуль двухступенчатой водительской ПБ:

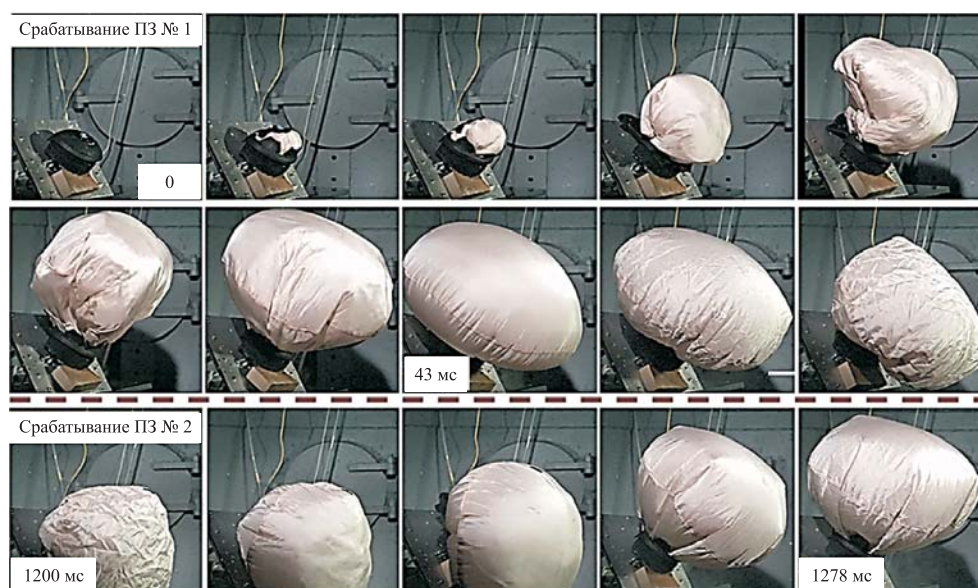
1 — лицевая панель контейнера; 2 — контейнер; 3 — ГГ; 4 — КВ № 1;  
5 — КВ № 2; 6 — крепление ГГ с ПБ к контейнеру

$10^4$  кадр/с, период между кадрами (скважность) 100 мкс, время экспозиции 10 мкс. Видеосъемка процесса разворачивания ПБ проводилась для двух значений времени задержки срабатывания второго заряда ГГС:  $t_3 = 10, 1200$  мс (рис. 3, 4). Для измерения акустического воздействия от последовательного срабатывания ПЗ ГГ, размещенного в камерах сторания, был использован специализированный шумомер «Экофизика-110А-НФ».



**Рис. 3.** Характерные фрагменты видеосъемки раскрытия водительской двухступенчатой ПБ при  $t_3 = 10$  мс

Характерные фрагменты видеосъемки процесса накачки ПБ при разно-временности срабатывания ПЗ № 1 и № 2  $t_3 = 10$  мс (см. рис. 3) отображают реакцию ЭБУ и модуля двухступенчатой водительской ПБ на степень пере-



**Рис. 4.** Характерные фрагменты видеосъемки раскрытия водительской двухступенчатой ПБ при  $t_3 = 1200$  мс

грузки при тяжелых ДТП (фронтальный или кософронтальный удары на большой скорости), когда требуется максимально возможное избыточное давление в полости ПБ и минимально возможное время ее полной накачки. В данном случае полная накачка ПБ происходит за время  $t_{ПБ} \approx 28$  мс при последовательном срабатывании двух ПЗ и двух ГГ. Взаимодействие водителя с ПБ является максимально жестким, что обусловлено высокими перегрузками ударного торможения. Измеренная скорость раскрытия ПБ (по фиксации лидирующей фронтальной точки) в начальной стадии процесса ее накачки для времени задержки  $t_3 = 10$  мс составила  $v_{ПБ} \approx 55$  м/с при  $t = 12$  мс, при  $t = 15$  мс скорость уменьшилась до значения  $v_{ПБ} \approx 40,5$  м/с. Звуковое давление на расстоянии 0,8 м от лицевой поверхности рулевого колеса равно 120 дБ, что на 20 дБ ниже уровня болевого порога слухового аппарата человека [15].

Высокоскоростная видеосъемка процесса накачки ПБ при большой затрате времени задержки срабатывания ПЗ № 2 (см. рис. 4) имела своей целью экспериментальную фиксацию времени накачки при срабатывании только основного ПЗ № 1 и степени подкачки ПБ при срабатывании ПЗ № 2. Именно для этого установлено заведомо большое время задержки срабатывания ПЗ № 2  $t_3 = 1200$  мс, которое сравнимо со временем опадания ПБ в результате стравливания из ее полости газа накачки. В со-

ответствии с кинограммой время полной накачки ПБ при срабатывании ПЗ № 1 (основного)  $t_{\text{ПБ}} \approx 43$  мс, т. е. примерно в 1,5 раза больше, чем время накачки при практически одновременном срабатывании ПЗ № 1 и № 2 ( $t_{\text{ПБ}} \approx 28$  мс). При этом визуально фиксируется заметно меньшая степень накачки, а измеренное звуковое давление составляет не более 105 дБ. Это связано с тем, что обычно газоприход от основного ПЗ составляет ~ 80 % общего объема. Остальной объем газа (~ 20 %) реализуется при срабатывании ПЗ № 2, который в данном случае сработал только через 1200 мс и обеспечил подкачку ПБ в течение довольно длительного времени, равного ~ 78 мс. Таким образом, при небольших значениях скорости фронтального или кософронтального столкновения автомобиля со статичным или движущимся объектом срабатывание ПЗ № 2 с большой задержкой относительно времени срабатывания основного ГГС позволяет смягчить интенсивность взаимодействия водителя с ПБ, которая имеет меньшее избыточное давление, чем при последовательном (практически одновременном) срабатывании двух ПЗ.

Оценить избыточное давление газа накачки при срабатывании только одной (основной) ступени ГГ можно достаточно просто, используя уравнение политропы:

$$p_{\Gamma} V_{\Gamma}^k = p_{\text{ПБ}} V_{\text{ПБ}}^k,$$

откуда

$$p_{\text{ПБ}} = p_{\Gamma} \left( \frac{V_{\Gamma}}{V_{\text{ПБ}}} \right)^k, \quad (1)$$

где  $p_{\Gamma}$  и  $p_{\text{ПБ}}$  — давление газа, образованного при сгорании ПЗ, в объеме камеры сгорания ГГ и в полости ПБ после ее полной накачки;  $V_{\Gamma}$  и  $V_{\text{ПБ}}$  — объемы камеры сгорания ГГ и полости ПБ;  $k$  — показатель политропы.

Как отмечалось ранее, при срабатывании только основной ступени ГГ образуется 80 % общего объема газа, генерируемого при срабатывании двух ступеней ГГ, т. е.  $0,8 V_{\Gamma}$ . Тогда давление в полости ПБ составит

$$p_{\text{ПБ}}(0,8V_{\Gamma}) = p_{\Gamma} \left( \frac{0,8V_{\Gamma}}{V_{\text{ПБ}}} \right)^k, \quad (2)$$

т. е. в соответствии с уравнениями (1) и (2) имеем

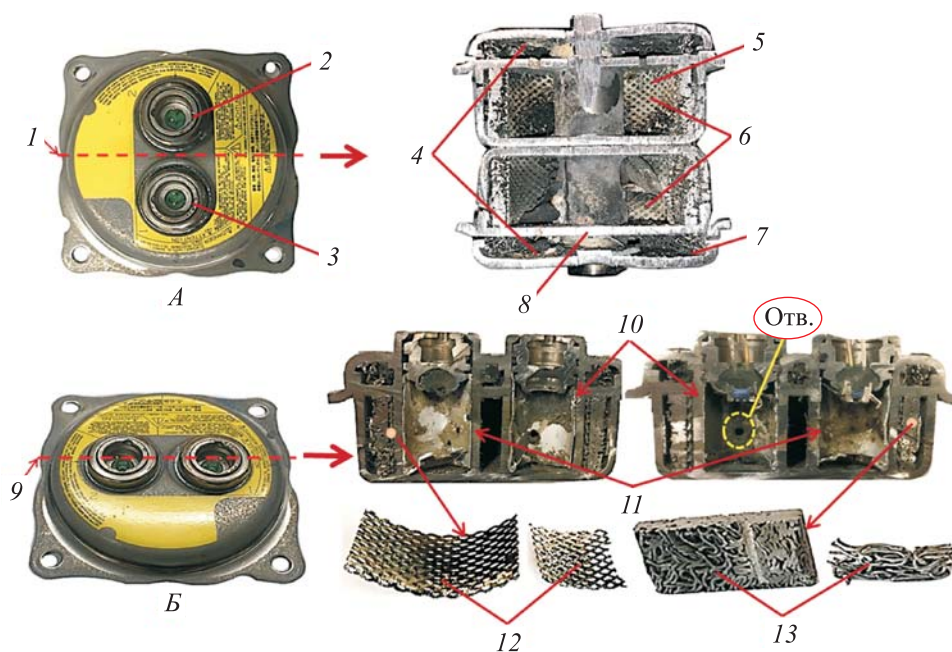
$$\frac{p_{\text{ПБ}}(0,8V_{\Gamma})}{p_{\text{ПБ}}(V_{\Gamma})} = \left( \frac{0,8V_{\Gamma}}{V_{\Gamma}} \right)^k = 0,8^k. \quad (3)$$

Для двухатомных газов, к которым относится азот, имеющих показатель политропы  $k \approx 1,4$ ,  $p_{\text{ПБ}}(0,8V_{\Gamma}) \approx 0,73p_{\text{ПБ}}(V_{\Gamma})$ , в соответствии с (3), т. е. давление в полости ПБ, создаваемое при срабатывании только первой ступени ГГ (относительно малые перегрузки при ДТП), на  $\sim 27\%$  меньше, чем давление, создаваемое в полости ПБ при срабатывании двух ступеней. Поскольку значение избыточного давления в полости наддутой ПБ после полного срабатывания ГГ обычно составляет  $\Delta p_{\text{ПБ}} = p_{\text{ПБ}} - p_{\text{атм}} \approx 0,05 \dots 0,15$  МПа, то полное давление накачки  $p_{\text{ПБ}} \approx 0,15 \dots 0,25$  МПа. При этих условиях можно оценить относительное различие значений избыточного давления для разных вариантов срабатывания двухступенчатого ГГ, приняв среднее значение давления накачки при срабатывании двух ступеней ГГ  $\langle p_{\text{ПБ}}(V_{\Gamma}) \rangle = 0,2$  МПа, а среднее значение избыточного давления  $\Delta \langle p_{\text{ПБ}}(V_{\Gamma}) \rangle = \langle p_{\text{ПБ}}(V_{\Gamma}) \rangle - p_{\text{атм}} = 0,2 - 0,1 \approx 0,1$  МПа. Среднее значение давления при срабатывании первой ступени ГГ  $\langle p_{\text{ПБ}}(0,8V_{\Gamma}) \rangle = 0,73 \langle p_{\text{ПБ}}(V_{\Gamma}) \rangle \approx 0,15$  МПа, при этом значение избыточного давления  $\Delta \langle p_{\text{ПБ}}(0,8V_{\Gamma}) \rangle = \langle p_{\text{ПБ}}(0,8V_{\Gamma}) \rangle - p_{\text{атм}} = 0,15 - 0,1 \approx 0,05$  МПа, а отношение значений избыточного давления в полости ПБ после полной накачки в случае одно- и двухступенчатого срабатывания ГГ составит  $\Delta \langle p_{\text{ПБ}}(0,8V_{\Gamma}) \rangle / \Delta \langle p_{\text{ПБ}}(V_{\Gamma}) \rangle = 0,05/0,1 = 0,5$ . Отношение значений полного давления накачки ПБ для двух вариантов срабатывания ГГ  $\Delta \langle p_{\text{ПБ}}(0,8V_{\Gamma}) \rangle / \Delta \langle p_{\text{ПБ}}(V_{\Gamma}) \rangle = 0,15/0,2 = 0,75$ .

Декомпозиция первого охлажденного ГГ осуществлялась разрезанием его корпуса по плоскости симметрии, проходящей между модулями вспомогательного ПЗ № 1 и № 2 (рис. 5, а), а второго — по плоскости, проходящей через оси симметрии модулей вспомогательного ПЗ № 1 и № 2 (рис. 5, б). На симметричных половинках модуля ПБ хорошо визуализируются камеры сгорания основного и вспомогательного ПЗ ГГ, причем объем камеры сгорания первой ступени накачки примерно в 4 раза больше объема камеры сгорания второй ступени, т. е. обеспечивается соотношение между объемами их газовой выделения 4:1, как это принято ранее при оценке давления накачки от каждой ступени.

Между камерами сгорания имеется перегородка с четырьмя небольшими сквозными отверстиями, которые расположены попарно, причем каждая пара отверстий была закрыта до срабатывания ГГ тонкой круглой мембраной со стороны основной камеры сгорания. На внутренней поверхности корпуса хорошо видны сетки-фильтры камер сгорания, а на бо-





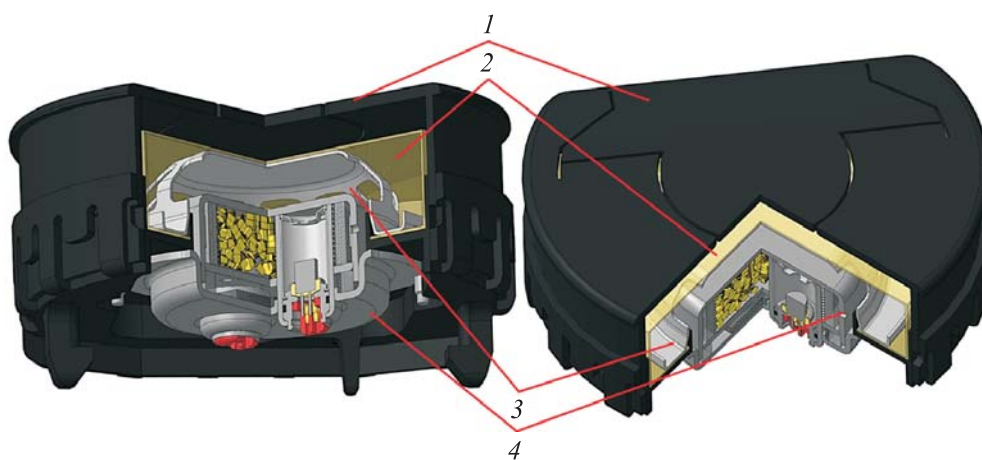
**Рис. 5.** Декомпозиция корпуса ГГ с помощью двух разрезов по взаимно перпендикулярным плоскостям:

1 и 9 — линии разреза; 2 и 10 — модули вспомогательного ПЗ № 1; 3 и 11 — модули вспомогательного ПЗ № 2; 4 — камера сгорания вспомогательного ПЗ; 5 — сетка-фильтр 1; 6 — камера сгорания основного ПЗ; 7 — сетка-фильтр 2; 8 — перегородка; 12 и 13 — тонкостенная и толстостенная сетки-фильтры

ковой поверхности стакана вспомогательного заряда — отверстие для передачи импульса воспламенения от вспомогательного к основному ПЗ. Двухслойная сетка-фильтр является функциональным элементом основной камеры сгорания основного ПЗ. Ее тонкостенный крупноячеистый слой служит для улавливания крупных остатков горения заряда, а толстостенный слой с плотной проволочной структурой — как для фильтрации пылеобразных частиц сгорания, так и для охлаждения образующегося при горении газа накачки, который поступает в полость ПБ через шесть газоразрядных отверстий на боковой поверхности корпуса ГГ.

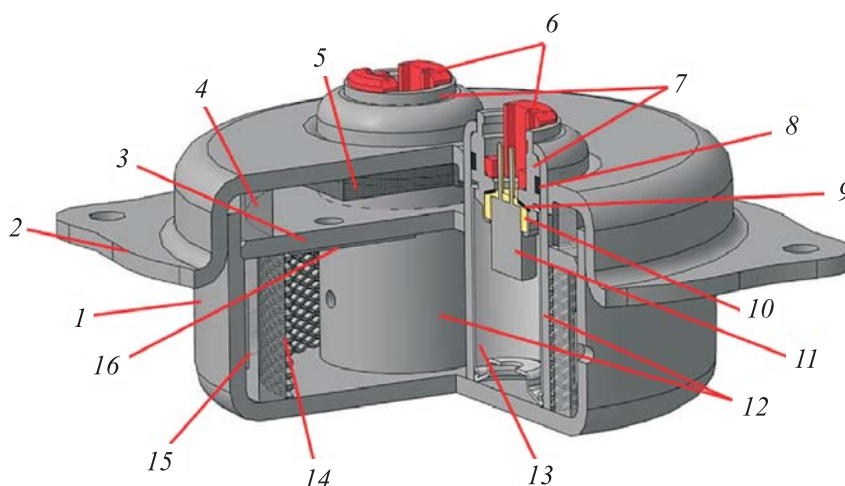
Полученная в результате декомпозиции структурная схема ГГ подтверждает его принадлежность к классу куполообразных твердотопливных ГГ с двухступенчатым срабатыванием. Проведенное на основе декомпозиции 3D-моделирование позволило создать пространственные модели как всего модуля (рис. 6), так и ГГ (рис. 7).

**Экспериментальные исследования модуля пассажирской фронтальной двухступенчатой ПБ.** Структурно-функциональный анализ ГГ



**Рис. 6.** 3D-модель модуля двухступенчатой водительской ПБ:

1 — контейнер; 2 — ПБ; 3 — диффузор; 4 — ГГ



**Рис. 7.** 3D-модель ГГ модуля двухступенчатой водительской ПБ:

1 — корпус ГГ; 2 — крышка ГГ; 3 — перегородка; 4 — сетка-фильтр (кольцевая);  
 5 — прокладка; 6 — контактные гнезда; 7 — втулки КВ; 8 — прокладка-уплотнитель  
 втулки КВ; 9 — прокладка-уплотнитель КВ; 10 — втулка-изолятор КВ;  
 11 — КВ; 12 — стаканы вспомогательных ПЗ; 13 — тонкостенный лейнер  
 вспомогательного ПЗ; 14 — сетка-фильтр (двухслойная кольцевая); 15 — лейнер  
 на отверстиях корпуса ГГ; 16 — мембрана на отверстиях корпуса ГГ

двухступенчатой пассажирской ПБ выполнен на основе результатов экспериментального охлаждения типового модуля фронтальной пассажирской ПБ с двухступенчатым срабатыванием, используемого в автомобилях VW Jetta (рис. 8).



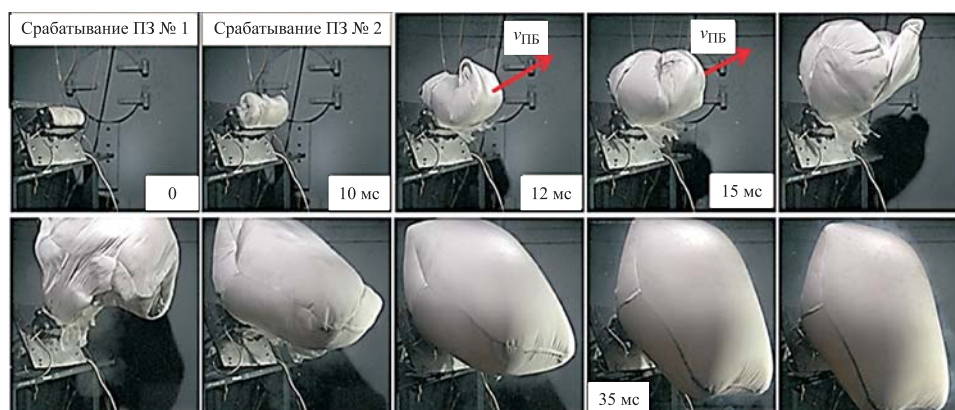
**Рис. 8.** Модуль двухступенчатой пассажирской ПБ:

1 — ПБ; 2 — отверстия для крепления модуля ПБ к каркасу кабины автомобиля;  
3 — контейнер; 4 — КВ № 1; 5 — крепление ГГ с ПБ к контейнеру; 6 — КВ № 2

Модуль закрепляется под панелью перед передним пассажирским сиденьем в специальном каркасе со стороны двигательного отсека на четырех болтах, проходящих через четыре периферийных отверстия на корпусе модуля ПБ. На противоположных торцах трубчатого ГГ имеются втулки с двумя КВ № 1 и № 2, которые обеспечивают управляемое с помощью ЭБУ двухступенчатое последовательное срабатывание модуля с разновременностью, зависящей от фиксируемой датчиками степени перегрузки при ДТП, т. е. от степени тяжести ДТП.

Модуль пассажирской ПБ подготовлен к охлаждению с использованием экспериментальной схемы [1] и закреплен на лицевой панели приспособления аналогично тому, как он фиксируется в каркасе кабины. Для последовательного инициирования КВ двух ПЗ, обеспечивающих двухступенчатое срабатывание ГГ, как и ранее, использован генератор инициирующих импульсов с функцией задержки. При проведении эксперимента установлена задержка между срабатыванием КВ № 1 и № 2  $\Delta t_3 = 10$  мс, что соответствует ситуации тяжелого ДТП при лобовом ударе.

В результате анализа фрагментов видеосъемки (рис. 9) выявлено, что ПБ сработала штатно, время полной накачки  $t_{ПБ} \approx 35$  мс, скорость раскрытия (по фиксации лидирующей фронтальной точки) в начале процесса ее накачки составила  $\sim 40$  м/с при  $t = 12$  мс, при  $t = 15$  мс снизилась

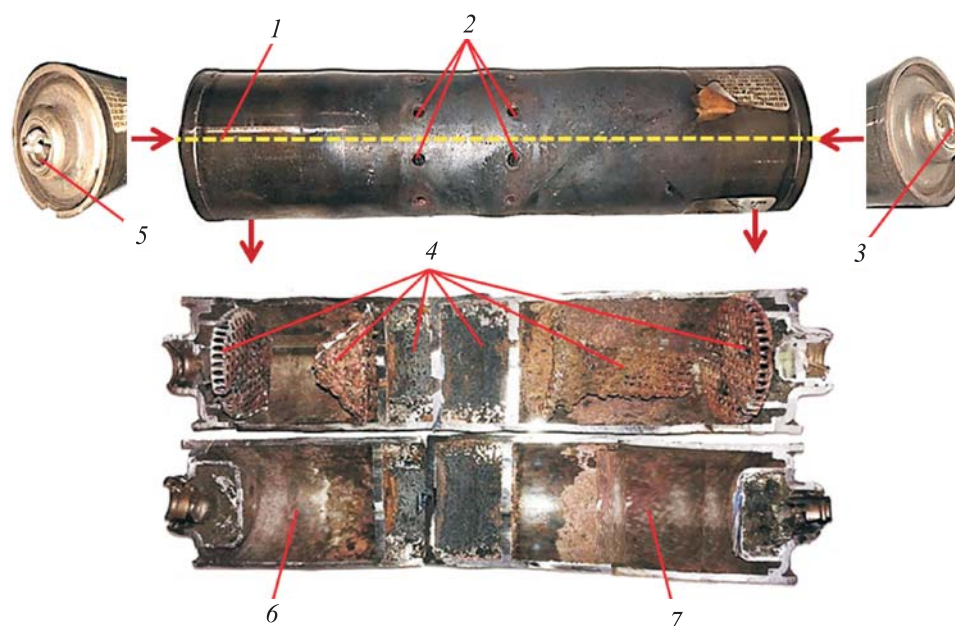


**Рис. 9.** Характерные фрагменты видеосъемки раскрытия пассажирской двухступенчатой ПБ

до  $\sim 30$  м/с. Таким образом, при раскрытии двухступенчатой пассажирской ПБ средняя скорость ее раскрытия приблизительно на 25 % меньше, чем для двухступенчатой водительской ПБ, что связано с наличием большего расстояния между пассажиром на переднем сидении и передней панелью, чем между водителем и рулевым колесом, и, соответственно, с возможностью большего времени накачки. Акустическое давление на расстоянии  $\sim 1$  м от лицевой поверхности модуля БП составило  $\sim 125$  дБ, что на 15 дБ меньше уровня болевого порога слухового аппарата человека [15].

При инструментальной декомпозиции корпус ГГ с учетом анализа его внешнего вида разрезан продольно по всей длине (рис. 10). Это позволило визуализировать всю совокупную структуру исполнительного устройства. Малая камера сгорания ГГ содержит стакан и донный лейнер вспомогательного ПЗ, втулку с КВ, фильтры (конический, торовый и сито), а также стопорное кольцо, фиксирующее в полости камеры сгорания плоский фильтр-сито и конический фильтр-диффузор. Структура большой камеры сгорания практически аналогична структуре малой камеры сгорания. Единственным значимым отличием является существенно больший размер конического фильтра-диффузора.

Измерения показали, что объем большой камеры сгорания ПЗ № 1 на 60 % больше объема малой камеры сгорания. Именно поэтому торовые сетки-фильтры и конические фильтры-диффузоры, размещенные в большой камере сгорания, более объемные, чем фильтры, размещенные в малой камере, что связано с необходимостью фильтрации и частичного охлаждения большего объема продуктов горения.

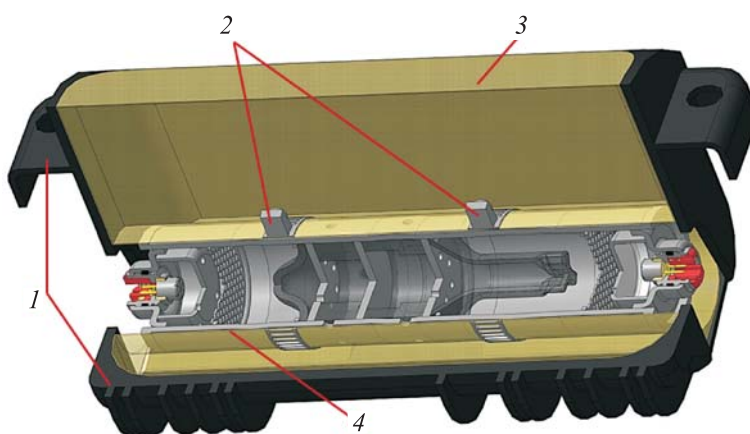


**Рис. 10.** Структура ГГ модуля двухступенчатой пассажирской ПБ:

1 — линия разреза; 2 — газовыделительные отверстия; 3 — КВ № 1;  
4 — фильтры; 5 — КВ № 2; 6 и 7 — малая и большая камеры сгорания

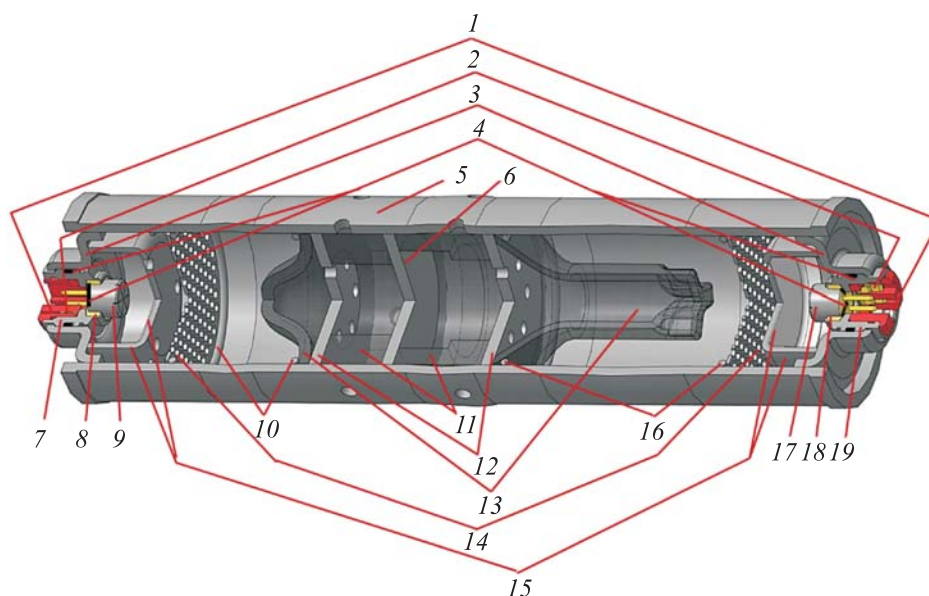
Полученная в результате декомпозиции структурная схема ГГ подтверждает его принадлежность к классу твердотопливных трубчатых ГГ с двухступенчатым срабатыванием.

На основе анализа структуры модуля ПБ и ГГ и соответствующего реверс-инжиниринга выполнены пространственные модели как всего модуля (рис. 11), так и ГГ (рис. 12). Для удобства восприятия подробной



**Рис. 11.** 3D-модель модуля двухступенчатой пассажирской ПБ:

1 — контейнер; 2 — крепежные хомуты со шпильками; 3 — ПБ; 4 — ГГ



**Рис. 12.** 3D-модель ГГ модуля двухступенчатой пассажирской ПБ (без вспомогательного и основного ПЗ):

1 — контактные гнезда; 2 — шунты; 3 — торцевые крышки корпуса ГГ;  
 4 — прокладки; 5 — корпус ГГ; 6 — перегородка между камерами сгорания;  
 7, 19 — втулки КВ; 8, 18 — изоляторы КВ; 9, 17 — КВ; 10, 16 — стопорные кольца;  
 11 — тортовые сетки-фильтры; 12 — пропускные перегородки; 13 — конические  
 фильтры-диффузоры; 14 — фильтры-ситя; 15 — стаканы и донные лейнеры  
 вспомогательных ПЗ

внутренней структуры конструкции ГГ 3D-модели приведены без газогенерирующих ПЗ, размещенных как в стакане вспомогательного заряда, так и в малой и большой камерах сгорания (между фильтром-ситом и коническим фильтром-диффузором).

**Заключение.** С помощью информативного экспериментального метода исследования динамики функционирования модулей фронтальных двухступенчатых ПБ двух типов установлены кинематические и акустические параметры процессов их накачки, а инструментальная декомпозиция двухступенчатых ГГ купольного и трубчатого типов и последующий реверс-инжиниринг позволили установить детальную структуру их конструктивного воплощения.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] 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>

- [2] Хусаинов А.Ш., Кузьмин Ю.А. Пассивная безопасность автомобиля. Ульяновск, УлГТУ, 2011.
- [3] Балабин И.В., Богданов В.В. Подушка как элемент обеспечения безопасности и ее эволюционные этапы инкорпорирования в конструкцию автомобиля. *Автомобильная промышленность*, 2019, № 2, с. 21–25.
- [4] Балабин И.В., Богданов В.В. Конструкция подушек безопасности и основные принципы механизма ее срабатывания. *Автомобильная промышленность*, 2019, № 4, с. 15–18.
- [5] 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: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-2-75-88>
- [6] Гонсалес Астуа А.В., Гончаров Р.Б., Петюков А.В. Метод расчета на прочность корпуса газогенератора автомобильной подушки безопасности. *Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)*, 2022, № 1 (68), с. 3–11.
- [7] Гонсалес Астуа А.В., Гончаров Р.Б., Петюков А.В. Физико-математическое моделирование процесса взаимодействия подушки безопасности легкового автомобиля с антропоморфным манекеном. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2022, № 4 (103), с. 4–21.  
DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-4-4-21>
- [8] Селиванов В.В., Левин Д.П., Петюков А.В. и др. Моделирование динамического взаимодействия тканевой воздушнонаполненной подушки с антропометрическим манекеном. *Фундаментальные и прикладные задачи механики. Матер. Междунар. науч. конф. Ч. 1*. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021, с. 11–18.
- [9] Gonsales Astua A.V., Levin D.P., Petyukov A.V. Modeling of dynamic interaction of a fabric airbag with an anthropometric dummy. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2021, vol. 1191, art. 012003. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1191/1/012003>
- [10] Гонсалес Астуа А.В., Карнаузов 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.
- [11] Андреев С.Г., Бойко М.М., Селиванов В.В. Экспериментальные методы физики быстропротекающих процессов. М., ФИЗМАТЛИТ, 2013.
- [12] Орленко Л.П., ред. Физика взрыва. М., ФИЗМАТЛИТ, 2004.
- [13] Шидловский А.А. Основы пиротехники. М., Машиностроение, 1973.
- [14] Мельников В.Э. Современная пиротехника. М., Наука, 2014.
- [15] Савенко С.К., Гурин А.А., Малый П.С. Ударные воздушные волны в подземных выработках. М., Недра, 1973.

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

**Малищук Тарас Сергеевич** — аспирант кафедры «Высокоточные летательные аппараты» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская, д. 5, стр. 1).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Гонсалес Астуа А.В., Малищук Т.С. Структурно-функциональный анализ модулей фронтальных двухступенчатых подушек безопасности автомобиля. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2023, № 2 (145), с. 29–46.

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-2-29-46>

**STRUCTURAL AND FUNCTIONAL ANALYSIS  
OF THE AUTOMOBILE FRONTAL TWO-STAGE  
AIRBAG MODULES**

**A.V. Gonsales Astua**

[andresastua@yandex.ru](mailto:andresastua@yandex.ru)

**T.S. Malishchuk**

[malishchuk@bmstu.ru](mailto:malishchuk@bmstu.ru)

**Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation**

**Abstract**

The paper presents experimental study results of the automobile frontal two-stage driver and passenger airbags operation. Based on the modern highly informative tools of experimental physics of fast processes, an experimental method for determining kinematic parameters of the automobile air bag operation dynamics was developed and implemented. Detailed cinegrams of the process of container front panels opening, air bag unfolding and dropping for the case of the driver's airbag module response in time were prepared and presented. Actuating devices, i.e., the pyrotechnic solid propellant gas generators, were instrumentally decomposed, structural arrangements of all components and parts, their functional purpose and design features were determined. Using the reverse engineering methods including direct measurement and process analysis, 3D models of gas generators and air bag two-stage modules were developed. Results of the study are an important and necessary component in creating scientific, technical and experimental bases to design, develop and produce high-tech systems for the internal passive automobile safety

**Keywords**

*Passive safety, airbag module, gas generator, high-speed imaging, instrumental decomposition, reverse engineering*

Received 16.01.2023

Accepted 24.03.2023

© Author(s), 2023



## REFERENCES

- [1] 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>
- [2] Khusainov A.Sh., Kuzmin Yu.A. Passivnaya bezopasnost avtomobilya [Passive safety of a car]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2011.
- [3] Balabin I.V., Bogdanov V.V. Airbag as the element of constructive safety and its main evolutionary stages of incorporation in the vehicle's design. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2019, no. 2, pp. 21–25 (in Russ.).
- [4] Balabin I.V., Bogdanov V.V. Design of airbags and basic principles response its mechanism. *Avtomobilnaya promyshlennost*, 2019, no. 4, pp. 15–18 (in Russ.).
- [5] 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: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2022-2-75-88>
- [6] Gonsales Astua A.V., Goncharov R.B., Petyukov A.V. The method of strength calculation of the automobile airbag gas generator body. *Vestnik Moskovskogo avtomobilno-dorozhnogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta (MADI)*, 2022, no. 1 (68), pp. 3–11 (in Russ.).
- [7] Gonsales Astua A.V., Goncharov R.B., Petyukov A.V. Numerical simulation of interaction between a passenger car airbag and an anthropomorphic dummy model. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2022, no. 4 (103), pp. 4–21 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18698/1812-3368-2022-4-4-21>
- [8] Selivanov V.V., Levin D.P., Petyukov A.V., et al. [Modelling of dynamic interaction between an air-filled fabric cushion and an anthropometric mannequin]. *Fundamentalnye i prikladnye zadachi mekhaniki. Mater. Mezhdunar. nauch. konf. Ch. 1* [Fundamental and Applied Problems of Mechanics. Proc. Int. Sc. Conf. Vol. 1]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2021, pp. 11–18 (in Russ.).
- [9] Gonsales Astua A.V., Levin D.P., Petyukov A.V. Modeling of dynamic interaction of a fabric airbag with an anthropometric dummy. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sc. Eng.*, 2021, vol. 1191, art. 012003. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1191/1/012003>
- [10] 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: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-1-67-79>
- [11] Andreev S.G., Boyko M.M., Selivanov V.V. Eksperimentalnye metody fiziki bystroprotekayushchikh protsessov [Experimental methods of physics of high-speed processes]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2013.

- [12] Orlenko L.P., ed. Fizika vzryva [Explosion physics]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2004.
- [13] Shidlovskiy A.A. Osnovy pirotekhniki [Fundamentals of pyrotechnics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973.
- [14] Melnikov V.E. Sovremennaya pirotekhnika [Modern pyrotechnics]. Moscow, Nauka Publ., 2014.
- [15] Savenko S.K., Gurin A.A., Malyy P.S. Udarnye vozdushnye volny v podzemnykh vyrabotkakh [Shock air waves in underground workings]. Moscow, Nedra Publ., 1973.

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

**Malishchuk T.S.** — Post-Graduate Student, Department of High-Precision Airborne Devices, 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., Malishchuk T.S. Structural and functional analysis of the automobile frontal two-stage airbag modules. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2023, no. 2 (145), pp. 29–46 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3941-2023-2-29-46>