

## СТРУКТУРНО-ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВНУТРИКАМЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ГАЗОГЕНЕРАТОРАХ МОДУЛЕЙ ПОДУШЕК БЕЗОПАСНОСТИ АВТОМОБИЛЯ

А.В. Гонсалес Астуа

andresastua@yandex.ru

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

---

### Аннотация

В современных легковых автомобилях минимизация травм водителя и пассажиров и снижение смертности при дорожно-транспортных происшествиях во многом обеспечиваются системой пассивной безопасности, важным элементом которой являются модули подушек безопасности различных типов. Основные параметры, определяющие эффективность указанных модулей, непосредственно зависят от структурно-функциональных схем их исполнительных механизмов (газогенераторов) и от особенностей и параметров газодинамических процессов течения продуктов сгорания газогенерирующих пиротехнических составов. Приведены результаты экспериментальных исследований структуры и параметров газодинамических процессов, возникающих при воспламенении и последующем горении азотосодержащих пиротехнических составов, используемых в исполнительных механизмах модулей подушек безопасности, — твердотопливных и гибридных газогенераторах. Высокоскоростная регистрация процессов накачки подушек безопасности, инструментальная декомпозиция газогенераторов, определение их структурных компоновок и 3D-моделей выполнены на основе разработанной методики с использованием инструментария экспериментальной физики быстропротекающих процессов. На основе опубликованных результатов натуральных экспериментов выполнены описание и сравнительный анализ характерных особенностей внутрикамерных газодинамических процессов течения продуктов сгорания газогенерирующих пиротехнических составов для различных типов газогенераторов модулей подушек безопасности автомобиля, а именно твердотоп-

### Ключевые слова

*Пассивная безопасность, газогенератор, камера сгорания, пиротехнический состав, продукты сгорания*

ливных пиротехнических газогенераторов фронтальных (водительских и пассажирских) модулей с одноступенчатым и управляемым двухступенчатым срабатыванием; гибридных газогенераторов головных модулей (шторок), размещаемых над дверцами автомобилей, боковых модулей, размещаемых в сиденьях автомобилей, и коленных модулей, размещаемых под рулевой колонкой

Поступила 16.10.2023

Принята 07.11.2023

© Автор(ы), 2024

---

**Введение.** При разработке систем пассивной безопасности водителя и пассажиров [1–4], их внедрении в конструкторскую и эксплуатационную практику большое внимание уделяется одному из важнейших компонентов — комплексу модулей надувных подушек безопасности (МПБ). Их расположение, размеры и время полного срабатывания подбираются с учетом расстояний от тела водителя или пассажира до ближайших твердых передних и боковых поверхностей в момент дорожно-транспортного происшествия (ДТП), т. е. от конструктивных особенностей автомобиля [5–7]. Время срабатывания МПБ и избыточное давление газа накачки в значительной степени зависят от реализации необходимых параметров газодинамических процессов в камере сгорания (для твердотопливных газогенераторов (ГГ)) и отсеке (камере) со сжатым газом (для гибридных ГГ).

*Цель работы* — дать описание и привести результаты анализа функциональных особенностей газодинамических течений в зависимости от структурной схемы ГГ на основе экспериментального охлаждения, высокоскоростной регистрации процесса накачки подушки безопасности (ПБ), последующей декомпозиции и 3D-моделирования ГГ существующих и используемых в системах пассивной безопасности типов МПБ.

Основной функциональный узел МПБ — исполнительный механизм — ГГ. Газогенератор генерирует большое количество газа в короткие промежутки времени, которым заполняется ПБ. В соответствии с классификацией (рис. 1) различают ГГ по форме корпуса, характеру работы и способу газообразования. Во многом форма и тип используемого ГГ определяются назначением и расположением ПБ.

Твердотопливный ГГ состоит из корпуса, капсуль-воспламенителя (КВ) и твердого пиротехнического азотосодержащего газогенерирующего состава (ГГС), а гибридный ГГ — из корпуса, КВ, пиротехнического зарядоактиватора и специальной емкости со сжатым инертным газом (аргон, гелий, азот) под высоким давлением в диапазоне 20...60 МПа. Наполнение ПБ осуществляется сжатым газом, который освобождается выталкивающим зарядом-активатором.

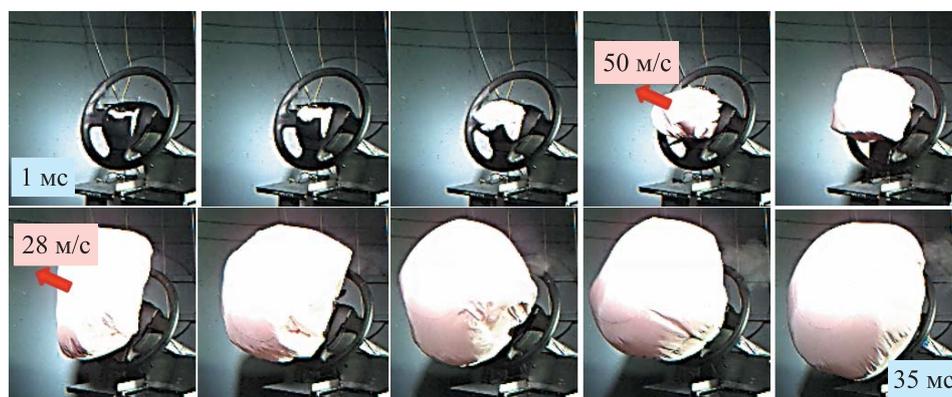


Рис. 1. Классификация конструкций ГГ

Для регистрации процесса функционирования ПБ, динамики ее накачки и раскрытия, а также для последующего анализа полученных оптических регистраций во всех натуральных экспериментах использован высокоинформативный инструментарий физики быстропротекающих процессов [8, 9] и специализированный стенд [10], состоящий из цифровой видеокамеры *Phantom V1210* [11, 12], позволяющей регистрировать быстропротекающие процессы в течение нескольких секунд со скоростью до  $(5...10) \cdot 10^5$  тыс. кадр/с. Параметры высокоскоростной съемки устанавливаются в соответствии с предположительным максимальным временем процесса (до 40 мс) и скоростью раскрытия ПБ (до 80 м/с): скорость съемки 10 000 кадр/с; период между кадрами (скважность) 100 мкс; экспозиция 10 мкс; разрешающая способность  $1280 \times 720$ .

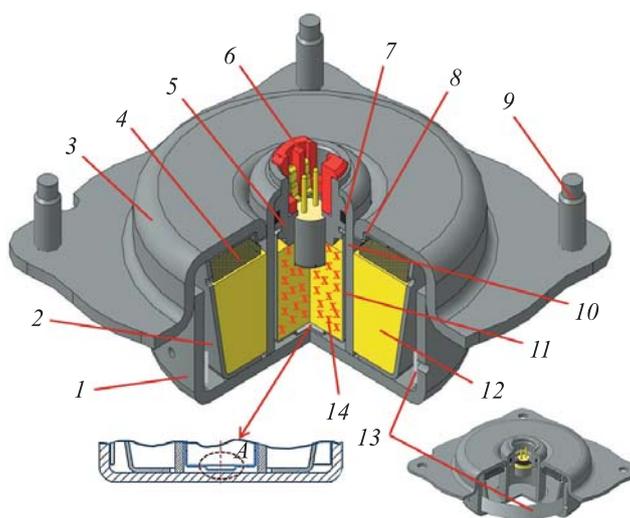
Выполним детальный анализ модулей фронтальных водительских ПБ, в которых в качестве исполнительных механизмов использованы твердотопливные куполообразные ГГ с одно- и двухступенчатым срабатыванием. Наиболее характерные кадры скоростной видеосъемки функционирования модуля водительской ПБ автомобиля LADA GRANTA приведены на рис. 2.

Время полной накачки ПБ  $t_{ПБ} \approx 35$  мс, скорость ее раскрытия для лидирующей фронтальной точки 50 м/с в начальный момент раскрытия, затем скорость снижается до 28 м/с в стадии последующей равномерной накачки.



**Рис. 2.** Характерные кадры видеосъемки функционирования модуля водительской ПБ автомобиля LADA GRANTA

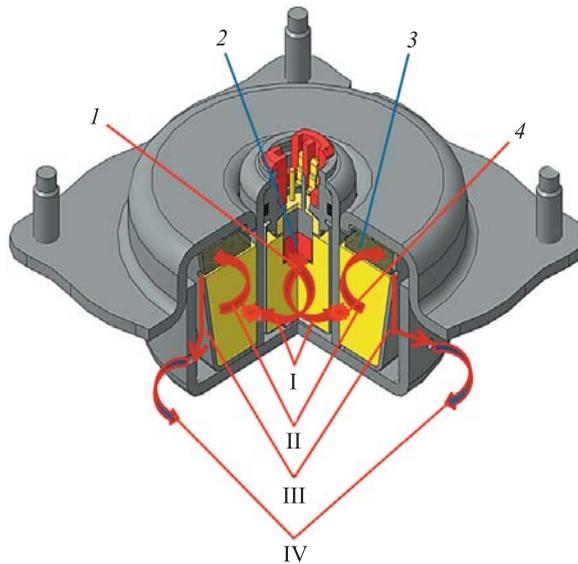
Выполненная на основе реверс-инжиниринга 3D-модель ГГ показана на рис. 3. Небольшое углубление *A* на дне тонкостенного лейнера пиротехнического вещества вспомогательного состава (ВВС) — место размещения небольшой шашки на основе нитроцеллюлозы, являющейся естественным термозащитным средством, обеспечивающим воспламенение ВВС при нештатном нагреве конструкции ГГ при пожаре, когда по каким-либо причинам исключается поступление сигнала на воспламенение КВ от датчиков удара или ускорения.



**Рис. 3.** 3D-модель ГГ:

- 1 — корпус ГГ; 2 — корпус камеры сгорания; 3 — крышка ГГ; 4 — сетка-фильтр;  
 5 — втулка; 6 — контактное гнездо; 7 — прокладка; 8 — прижимная шайба;  
 9 — крепежная шпилька; 10 — корпус ВВС; 11 — лейнер ВВС; 12 — ГГС;  
 13 — лейнер на отверстиях корпуса ГГ; 14 — ВВС

Схема воспламенения пиротехнических составов и процесса течения генерируемого газа (азота) накачки ПБ приведена на рис. 4. После инициирования (от КВ) ВВС горячие продукты сгорания I через отверстия в придонной части корпуса инициируют процесс горения основного ГГС. Образующиеся продукты сгорания II, основную массовую и объемную доли которых составляет генерируемый газ накачки, фильтруются через металлическую сетку-фильтр, задерживающую крупные недогоревшие частицы и частично охлаждающую азот. Азот III через систему отверстий в камере сгорания поступает в полость между корпусом ГГ и стенкой конической камеры сгорания. Происходит дополнительное разрежение и соответствующее охлаждение продуктов сгорания. В результате азот IV поступает в полость ПБ и накачивает последнюю.



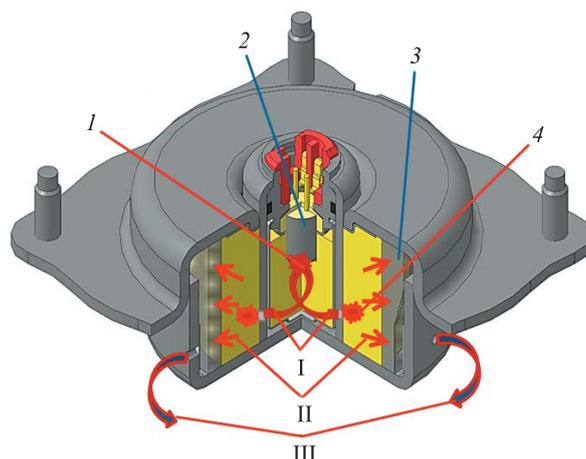
**Рис. 4.** Схема воспламенения пиротехнических составов и процесса течения генерируемого газа накачки ПБ:

I, II — горячие и образующиеся продукты сгорания; III, IV — азот;  
1 — инициирование ВВС; 2 — КВ; 3 — сетка-фильтр; 4 — инициирование ГГС

Более поздняя модификация аналогичного ГГ (рис. 5) отличается от рассмотренной версии конструкцией камеры сгорания. В ней отсутствует конический тонкостенный лейнер, в котором размещается ГГС, вместо него использована плотная прессованная металлическая сетка-фильтр, выполненная в форме полого цилиндра и одновременно являющаяся контейнером для ГГС.

Модифицированная камера сгорания имеет меньше деталей, более простые геометрические формы по сравнению с предыдущим вариантом,

а технология ее сборки существенно упрощается. Кроме того, упрощается схема течения генерируемого азота, улучшается качество его фильтрации от твердых частиц продуктов сгорания и уменьшается время поступления в полость ПБ генерируемого газа в связи с сокращением траектории его течения.

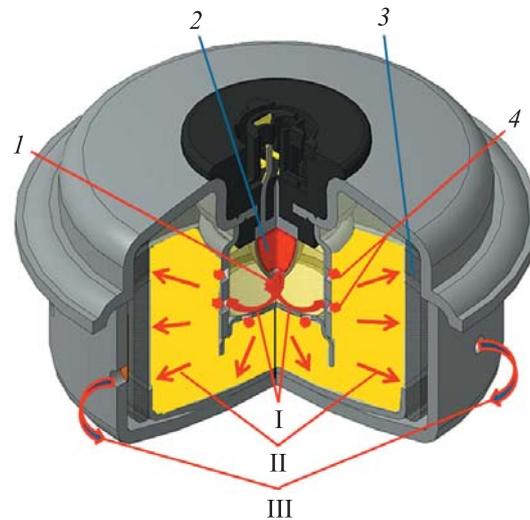


**Рис. 5.** Схема процессов воспламенения пиротехнических составов и процесса течения генерируемого газа накачки ПБ в полости модернизированного ГГ: I — инициирование процесса горения ГГС через отверстия в придонной части корпуса ВВС; II — фильтрация продуктов сгорания основного ГГС через металлическую сетку-фильтр; III — поступление азота через систему отверстий в корпусе ГГ в полость ПБ; 1 — инициирование ВВС; 2 — КВ; 3 — сетка-фильтр; 4 — инициирование ГГС

Декомпозиция модуля водительской фронтальной ПБ автомобиля Volkswagen Polo и последующий реверс-инжиниринг после его испытательный показали, что принципиальная схема ГГ, определяющая газодинамику процесса накачки, аналогична предыдущей схеме (рис. 6).

Для экспериментальных испытаний модуля водительской ПБ с двухступенчатым срабатыванием и определения газодинамического процесса ее функционирования использована типовая модель, применяемая в автомобилях BMW 5. На наружной панели корпуса ГГ имеются втулки с двумя КВ, которые обеспечивают управляемое с помощью электронного блока двухступенчатое последовательное срабатывание модуля с разновременностью, зависящей от фиксируемой датчиками степени перегрузки при ДТП, т. е. от степени его тяжести.

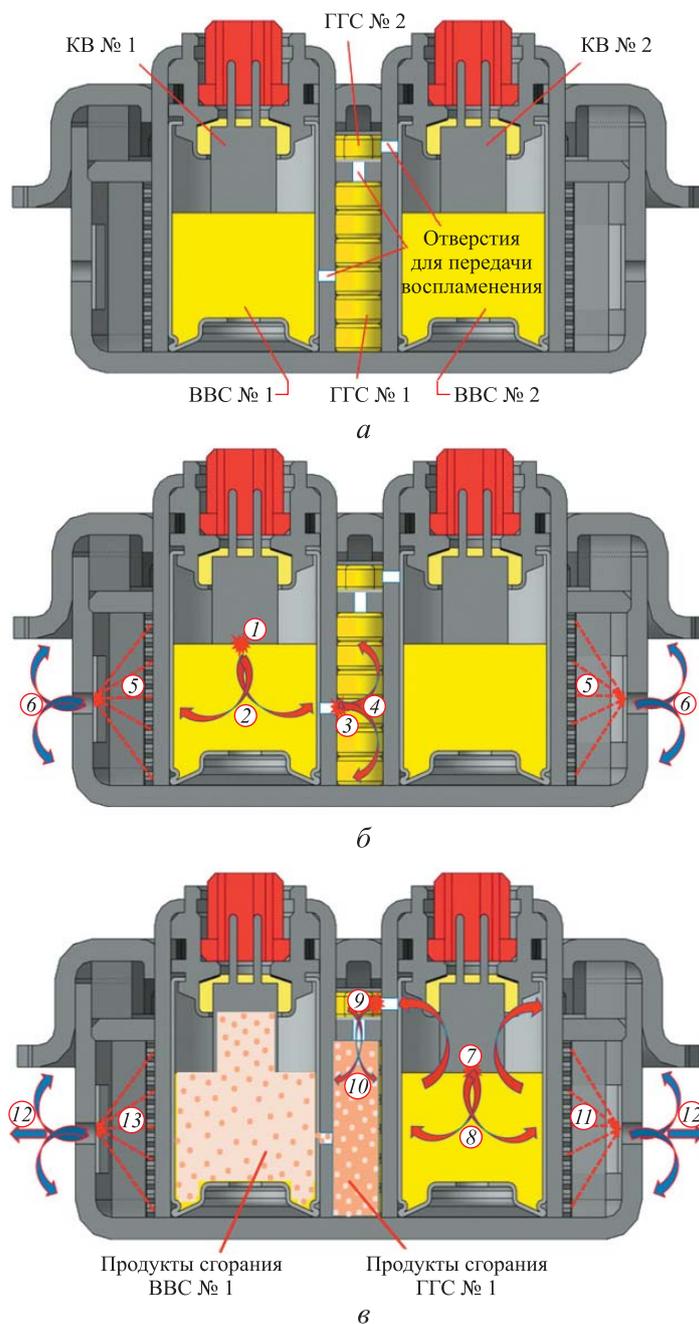
Пространственная модель рассмотренного двухступенчатого ГГ приведена в [13], а схемы воспламенения пиротехнических составов и процесса течения генерируемого газа накачки — на рис. 7.



**Рис. 6.** Схема процессов воспламенения пиротехнических составов и процесса течения генерируемого газа накачки фронтальной водительской ПБ автомобиля Volkswagen Polo:

I — иницирование процесса горения ГГС через отверстия в придонной части корпуса ВВС; II — фильтрация продуктов сгорания основного ГГС через металлическую сетку-фильтр; III — поступление азота через систему отверстий в корпусе ГГ в полость ПБ; 1 — иницирование ВВС; 2 — KB; 3 — сетка-фильтр; 4 — иницирование ГГС

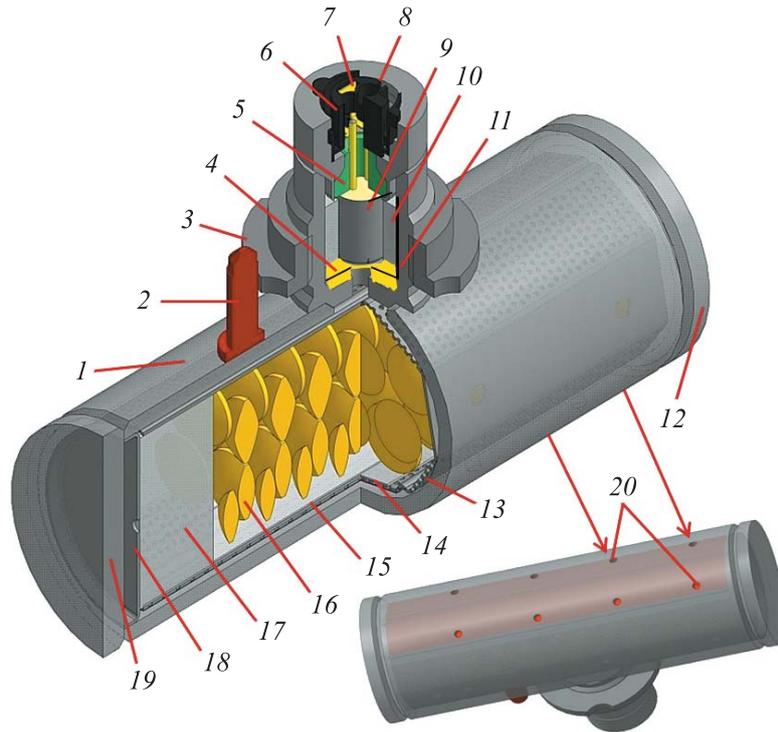
После иницирования 1 ВВС № 1 горячие продукты сгорания 2, прорвав тонкостенный лейнер, через отверстия на боковой поверхности стакана ВВС № 1 иницируют 3 процесс горения основного ГГС № 1 в камере сгорания (рис. 7, б). Далее продукты сгорания этого ГГС 4 фильтруются через металлические сетки-фильтры 5, которые задерживают крупные недогоревшие частицы и частично охлаждают газ. Затем газ прорывает тонкостенный лейнер на отверстиях корпуса ГГ 6 и поступает в полость ПБ, накачивая последнюю. После иницирования 7 срабатывает вторая ступень (рис. 7, в). Горячие продукты сгорания 8, прорвав тонкостенный лейнер, через отверстия на боковой поверхности стакана ВВС № 2 иницируют 9 процесс горения основного ГГС № 2 в камере сгорания. Затем продукты сгорания этого газогенерирующего состава перемешиваются с остатками продуктов сгорания первой ступени, фильтруются через металлические сетки-фильтры 11 и через уже вскрытые газоотводные отверстия на корпусе ГГ образующийся газ 12 поступает в полость ПБ, подкачивая последнюю до максимального избыточного давления, т. е. делает ее более «жесткой», чем после срабатывания первой ступени.



**Рис. 7.** Схемы воспламенения пиротехнических составов и процесса течения генерируемого газа накачки ПБ:

а — схема размещения КВ, ВВС и ГГС; б, в — схемы срабатывания первой и второй ступеней

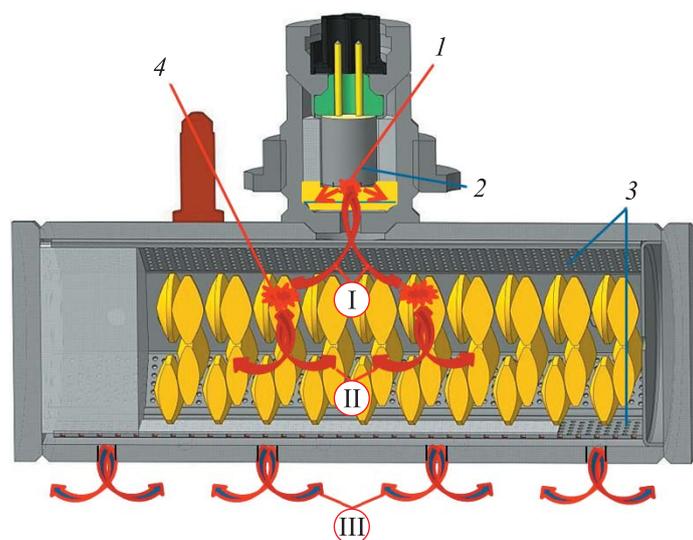
Газодинамика процесса функционирования твердотопливного трубчатого ГГ с одноступенчатым срабатыванием исследована при натуральных испытаниях модуля пассажирской фронтальной ПБ автомобиля Volkswagen Polo. 3D-Модель ГГ этого модуля, созданная после его охлаждения на основе реверс-инжиниринга, приведена на рис. 8.



**Рис. 8.** 3D-модель трубчатого твердотопливного ГГ:

- 1 — корпус ГГ; 2 — клемма; 3 — гайка; 4 — ВВС; 5 — изолятор;  
 6 — контактная группа; 7 — шунт; 8 — втулка; 9 — КВ; 10 — прокладка;  
 11 — корпус ВВС; 12 — крышка ГГ; 13 — сетка-фильтр; 14 — фильтр-пластина;  
 15 — медный лейнер; 16 — ГГС; 17 — пробка; 18 — вкладыш; 19 — крышка ГГ;  
 20 — газовыделительные отверстия на корпусе ГГ

Схема воспламенения пиротехнических составов в полости ГГ и процесса течения генерируемого газа накачки (азота) приведена на рис. 9. После инициирования (от КВ) ВВС горячие продукты сгорания I через отверстие в придонной части корпуса ВВС инициируют процесс горения основного ГГС. Образующиеся продукты сгорания II фильтруются через металлическую сетку-фильтр, а образующийся азот прорывает тонкостенный медный лейнер на газовыделительных отверстиях корпуса ГГ, поступает через них в полость ПБ III и накачивает последнюю.

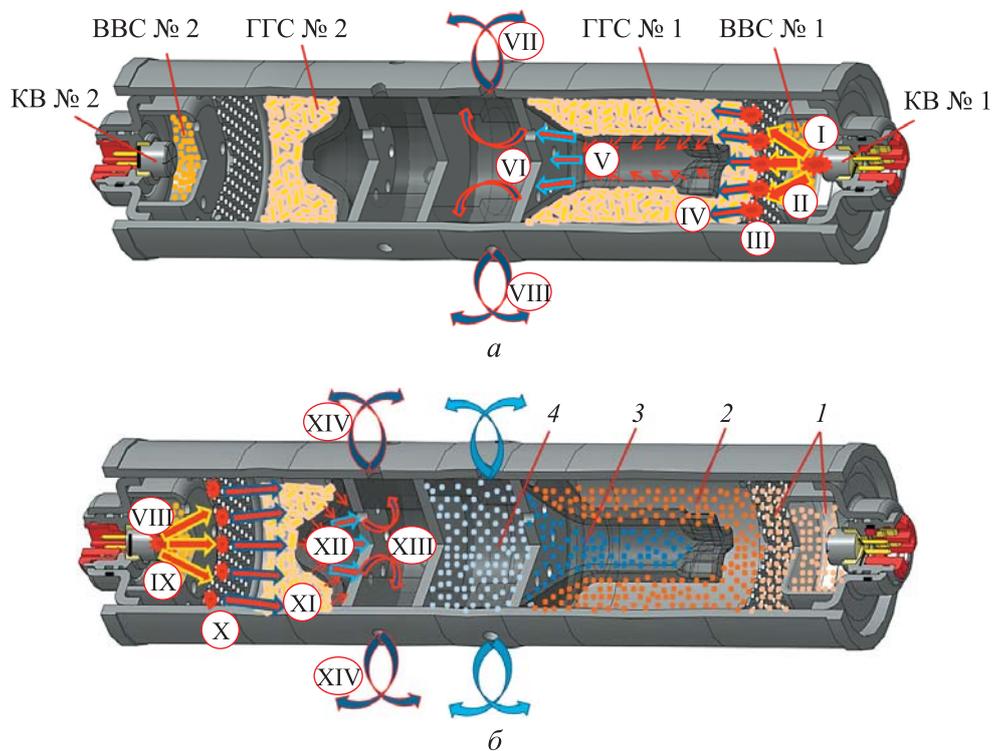


**Рис. 9.** Схема воспламенения пиротехнических составов и процесса течения генерируемого газа накачки фронтальной пассажирской ПБ с одноступенчатым срабатыванием:

1 — инициирование ВВС; 2 — КВ; 3 — сетка-фильтр; 4 — инициирование ГГС

Для анализа особенностей процесса газодинамического течения продуктов сгорания в объеме твердотопливного трубчатого ГГ с двухступенчатым срабатыванием в [13] проведено экспериментальное охлаждение типовой модели, используемой в автомобилях Volkswagen Jetta. На противоположных торцах трубчатого ГГ имеются втулки с двумя КВ (КВ №1, КВ № 2), которые обеспечивают управляемое с помощью электронного блока двухступенчатое последовательное срабатывание модуля с разновременностью, зависящей от фиксируемой датчиками степени перегрузки при ДТП. Пространственная модель двухступенчатого ГГ приведена в [13], а схемы воспламенения пиротехнических составов и процесса течения генерируемого газа накачки — на рис. 10.

При срабатывании первой ступени ГГ (рис. 10, а) после инициирования I ВВС № 1 горячие продукты сгорания II распространяются к сетке-фильтру и через его отверстия инициируют III горение ГГС № 1 в большой камере сгорания (первая ступень). После этого продукты сгорания ГГС № 1 IV фильтруются через стенку конического фильтра-диффузора в его полость, при этом несколько охлаждаются и приобретают более ламинарный характер течения V. Далее продукты сгорания (азот) поступают через отверстия перепускной перегородки в расширительную камеру VI, где дополнительно фильтруются через торовую сетку-фильтр, затем,



**Рис. 10.** Схемы воспламенения пиротехнических составов и процессов течения генерируемого газа накачки фронтальной пассажирской ПБ с двухступенчатым срабатыванием первой (а) и второй (б) ступеней:

1, 2 — продукты сгорания BBC № 1 и ГГС № 1; 3 — полость конического фильтра-диффузора; 4 — азот

прорывая тонкостенный лейнер на газовыделительных отверстиях корпуса ГГ, поступают в полость ПБ VII, накачивая последнюю.

В результате сгорания в полости ГГ образуются продукты сгорания BBC № 1, ГГС № 1, фильтрованные продукты сгорания (азот) в полости конического фильтра-диффузора и готовый для накачки ПБ азот. При этом продукты сгорания BBC № 1 и ГГС № 1 в определенной степени перемешиваются, однако на схеме (см. рис. 10) они разделены в целях идентификации их нахождения в полости ГГ после полного «автономного» выгорания.

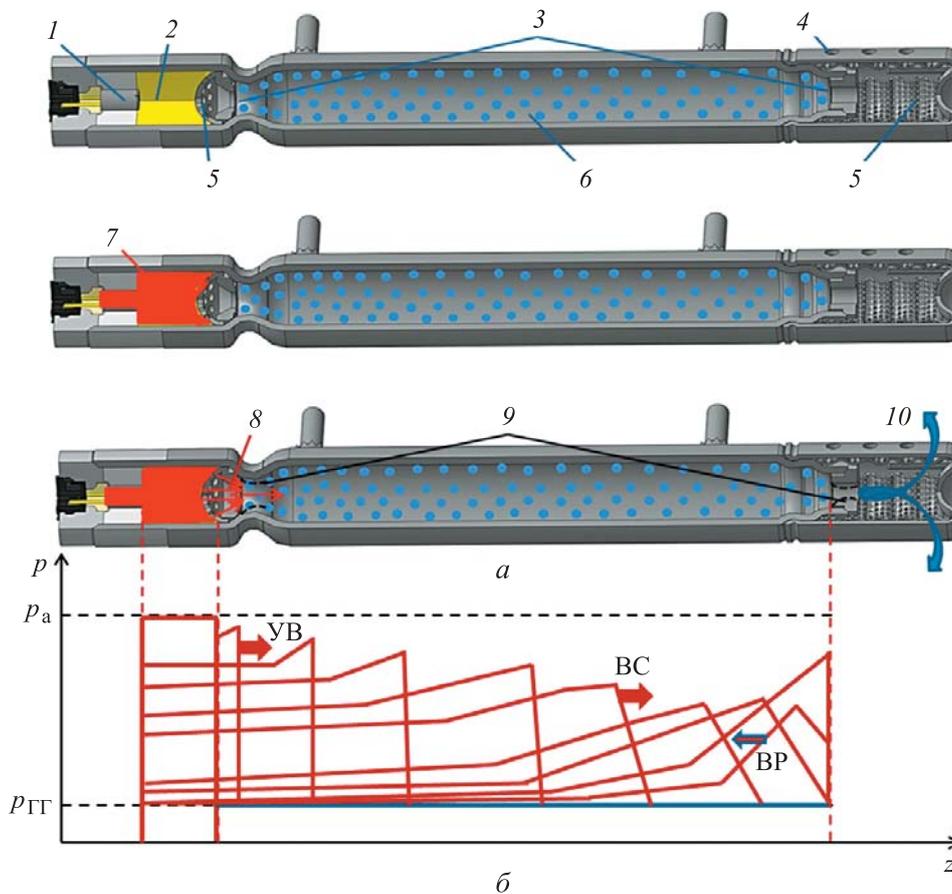
При срабатывании второй ступени ГГ (рис. 10, б) после инициирования VIII BBC № 2 продукты сгорания IX распространяются к сетке-фильтру и через отверстия инициируют X горение ГГС № 2 в малой камере сгорания (вторая ступень). После этого продукты сгорания ГГС № 1 XI фильтруются через стенку конического фильтра-диффузора в его по-

лость XII, поступают через отверстия перепускной перегородки в расширительную камеру XIII, где фильтруются через торовую сетку-фильтр, затем, прорывая тонкостенный лейнер на газовыделительных отверстиях корпуса ГГ, поступают в полость ПБ XIV, накачивая последнюю.

3D-Модели типовых модулей и ГГ головной, боковой и коленной ПБ, полученные на основе их экспериментальных натуральных испытаний и последующего детального реверс-инжиниринга, подробно рассмотрены в [14]. Согласно результатам детального анализа внутренней структуры конструкций ГГ установлено, что все они относятся к классу гибридных трубчатых ГГ с одноступенчатым срабатыванием, а их принципиальная схема включает в себя трубчатый отсек со сжатым нейтральным газом накачки, герметизированный с двух торцов запорными мембранами, пиротехнический активатор с КВ, металлическую цилиндрическую сетку-фильтр и газоотводную трубку. Под действием избыточного давления газообразных продуктов сгорания заряда-активатора запорные мембраны, первоначально закрывающие отсек со сжатым газом, вскрываются и нейтральный газ поступает во входную ПБ, обеспечивая ее быструю накачку.

В связи с принципиальным структурным подобием указанных гибридных ГГ газодинамические процессы их функционирования практически подобны и могут быть проиллюстрированы на примере ГГ коленной ПБ (рис. 11). Иницирование пиротехнического заряда-активатора, находящегося в замкнутом объеме корпуса активатора (камере сгорания), приводит к образованию в течение десятых долей миллисекунды продуктов сгорания. Пройдя через выпуклую сетку-фильтр, продукты сгорания формируют скачок давления — слабую ударную волну (УВ), разрушающую запорную мембрану, которая прилегает к заряду-активатору, и распространяющуюся по сжатому до давления  $p_{ГГ}$  нейтральному газу накачки. По мере распространения по длине отсека со сжатым газом УВ постепенно диссипирует и далее распространяется как волна сжатия (ВС). Эта ВС отражается от второй запорной мембраны и разрушает ее, а сжатый газ из отсека ГГ устремляется в ПБ. При этом ВС трансформируется в волну разрежения (ВР), распространяющуюся в обратном направлении.

Для определения газодинамических параметров функционирования гибридного ГГ оценим развиваемое при сгорании пиротехнического заряда-активатора давление по методике, приведенной в [15], на примере ГГ коленной ПБ. Давление должно быть достаточным, чтобы разрушить запорную мембрану на дне корпуса заряда-активатора с учетом противодействия газа накачки в отсеке ГГ, максимальное значение которого может достигать 60 МПа.



**Рис. 11.** Схемы:

*a* — газодинамических процессов функционирования гибридного ГГ коленной ПБ  
 (1 — КВ; 2 — заряд-активатор; 3 — запорные мембраны; 4 — газоотводная трубка;  
 5 — сетка-фильтр; 6 — отсек со сжатым газом; 7 — инициирование заряда-активатора;  
 8 — продукты сгорания; 9 — разрушенные мембраны; 10 — газ накачки);  
*б* — формирования УВ

Примем на основе справочных данных [16, 17], что плотность типичного пиротехнического заряда составляет  $\rho_3 \approx 1,4 \text{ г/см}^3$ , удельное газовыделение заряда-активатора —  $V_{уд} \approx 300 \text{ см}^3/\text{г}$ . С учетом объема заряда-активатора  $V_3 \approx 5,7 \text{ см}^3$  его масса равна  $m_3 \approx \rho_3 V_3 \approx 7,98 \text{ г}$ , объем выделяемого при сгорании газа —  $V_{Г} \approx V_{уд} m_3 \approx 2394 \text{ см}^3$ .

Используя уравнение политропы  $pV^k = \text{const}$ , где для продуктов сгорания типового пиротехнического заряда при высокой температуре горения  $k \approx 1,25$  [18], получаем давление активации  $p_a = p_{атм} (V_{Г} / V_3)^{1,25} \approx \approx 190 \text{ МПа}$ .

С учетом противодействия сжатого газа ( $p_{ГГ} \approx 20...40$  МПа), заполняющего отсек гибридного ГГ, давление на поверхности мембраны, прилегающей к заряду-активатору, составит  $p_m = p_a p_{ГГ} \approx 150...170$  МПа. При оценке абсолютной достаточности значения генерируемого давления активации для гарантированного вскрытия мембраны необходимо знать ее механические характеристики и провести ее сравнительный расчет на прочность для определения необходимого уровня давления вскрытия. Кроме того, столь высокое значение давления в практике проектирования сосудов давления всегда требует оценки прочностных характеристик конструкции для обеспечения ее эксплуатационной безопасности.

Результаты исследования элементного состава материала запорных мембран с применением лазерно-эмиссионной спектроскопии [19] показали, что этот состав соответствует нихрому ХН70Ю согласно ГОСТ 12766.4–77. Нихром ХН70Ю обычно подвергается закалке при температуре 1200 °С с охлаждением на воздухе, после чего имеет следующие механические характеристики:  $\sigma_{0,2} = 480$  МПа;  $\sigma_b = 780$  МПа;  $\delta_5 = 35\%$ .

Расчет напряженно-деформированного состояния запорных мембран замкнутого газонаполненного отсека гибридного ГГ проводился при его нагружении давлением нейтрального газа в диапазоне значений 20...60 МПа по методике, приведенной в [20]. Для последующего анализа исходное расчетное давление конкретизировано значениями 20, 40 и 60 МПа. Результаты анализа рассчитанных полей распределений пластических деформаций в запорных мембранах при различных значениях давления накачки показали следующее: при давлении 60 МПа пластические деформации превышают предельные значения и происходит разрушение детали; значения пластических деформаций в опасных сечениях не превышают 0,07 для 20 МПа и 0,2 для 40 МПа, что меньше их предельных значений.

Следовательно, результаты анализа напряженно-деформированного состояния запорных мембран при различных значениях давления газа накачки в отсеке ГГ показали, что максимальное значение давления  $p_{р.м}$ , необходимого для разрушения мембраны, находится в диапазоне значений 50...60 МПа. Поскольку рассчитанное с учетом противодействия сжатого газа накачки давление на поверхности мембраны находится в диапазоне значений 150...170 МПа, оно гарантированно обеспечивает вскрытие запорных мембран и последующее истечение сжатого газа из отсека ГГ в полость коленной ПБ, так как избыточное давление вскрытия существенно превышает давление, необходимое для разрушения нихромовой запорной

мембраны ( $p_{вс} = p_m \gg p_{р.м}$ ), а именно в соответствии с минимальной оценкой  $\min(p_{вс} - p_{р.м}) = 90$  МПа.

Результаты исследования материала корпуса отсека гибридных ГГ с применением лазерно-эмиссионной спектроскопии [19] показали, что его элементный состав практически соответствует стали 35ХМФЛ по ГОСТ 21357–87. Сталь 35ХМФЛ имеет два режима термической обработки, определяющих ее механические свойства: нормализация при температуре 920 °С с последующим отпуском при температуре 640...700 °С, что дает следующие значения характеристик:  $\sigma_{0,2} = 410$  МПа;  $\sigma_B = 620$  МПа;  $\delta_5 = 12$  %; закалка при температуре 910 °С с последующим отпуском при температуре 640...680 °С, что позволяет получить такие значения характеристик, как  $\sigma_{0,2} = 540$  МПа,  $\sigma_B = 880$  МПа,  $\delta_5 = 12$  %.

Расчет напряженно-деформированного состояния замкнутого газонаполненного отсека гибридного ГГ методом конечных элементов [20] показал, что его прочность обеспечивается во всем диапазоне давления газа накачки:

– максимальный уровень интенсивности напряжений в стенке корпуса отсека при давлении газа 20 МПа не превышает 125 МПа, т. е. материал работает в упругой области, пластические деформации отсутствуют, а коэффициенты запаса для пределов текучести 410 и 540 МПа равны 3,28 и 4,32;

– максимальный уровень интенсивности напряжений в стенке корпуса отсека при давлении газа 40 МПа не превышает 250 МПа, т. е. материал работает в упругой области, пластические деформации отсутствуют, а коэффициенты запаса для пределов текучести 410 и 540 МПа равны 1,64 и 2,16;

– максимальный уровень интенсивности напряжений в стенке корпуса при давлении газа 60 МПа не превышает 390 МПа, т. е. материал работает в упругой области, пластические деформации отсутствуют, а коэффициенты запаса для пределов текучести 410 и 540 МПа равны 1,05 и 1,385.

**Заключение.** По данным результатов натурных экспериментальных исследований динамики функционирования МПБ, инструментальной декомпозиции и реверс-инжиниринга основных конструктивных типов ГГ выполнены детальное описание и сравнительный анализ особенностей и характеристик внутрикамерных газодинамических процессов течения продуктов сгорания пиротехнических ГГС, а также приведено соответствующее графическое отображение основных этапов указанных процессов.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Кравец В.Н. Измерители эксплуатационных свойств автотранспортных средств. Н. Новгород, Изд-во НГТУ, 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 УлТГУ, 2011.
- [4] Савич Е.Л., Капустин В.В. Системы безопасности автомобилей. М., 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. EDN: AFJQYS
- [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://dx.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. EDN: SSWHLZ. DOI: <https://doi.org/10.20291/2311-164X-2020-2-70-73>
- [8] Андреев С.Г., Бойко М.М., Селиванов В.В. Экспериментальные методы физики взрыва и удара. М., ФИЗМАТЛИТ, 2013.
- [9] Орленко Л.П., ред. Физика взрыва. М., ФИЗМАТЛИТ, 2004.
- [10] 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>
- [11] Remote control unit — help file. Vision research-АМЕТЕК material analysis division, 2013.
- [12] Phantom video player help file. Vision research-АМЕТЕК material analysis division, 2013.
- [13] 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: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2023-2-29-46>
- [14] 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
- [15] 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.

[16] Мельников В.Э. Современная пиротехника. М., Наука, 2014.

[17] Шидловский А.А. Основы пиротехники. М., Машиностроение, 1973.

[18] Алешин А.В., Широкова Г.Н. Пиротехнические составы для получения азота на основе азидов. *Химическая физика*, 1999, т. 18, № 2, с. 72–79.

[19] 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://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2022-2-75-88>

[20] 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. EDN: YFGSOF

**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 внутрикамерных процессов в газогенераторах модулей подушек безопасности автомобиля. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки*, 2024, № 3 (114), с. 4–23.

EDN: PCFGYX

**STRUCTURAL AND FUNCTIONAL ANALYSIS  
OF THE INTERCHAMBER PROCESSES IN GAS GENERATORS  
OF THE VEHICLE AIRBAG MODULES**

**A.V. Gonsales Astua**

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

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

**Abstract**

In modern passenger vehicles, minimizing injuries to drivers and passengers and reducing mortality in the road accidents are largely ensured by the passive safety systems. The airbag modules of various types are important elements in such systems. Main parameters that determine these modules effectiveness directly depend on structural and functional diagrams of their actuators (gas generators) and on the features and parameters

**Keywords**

*Passive safety, gas generator, combustion chamber, pyrotechnic composition, combustion products*

of the gas-dynamic processes in the combustion products flow of the gas-generating pyrotechnic compositions. The paper presents results of experimental studies of the structure and parameters of gas-dynamic processes that appear during ignition and subsequent combustion of the nitrogen-containing pyrotechnic compositions used in the airbag module actuators, i.e. solid fuel and hybrid gas generators. High-speed registration of the airbag inflation processes, instrumental decomposition of the gas generators, determination of their structural layouts and 3D models were performed on the basis of the developed methodology using the tools of experimental physics of the fast processes. Based on the full-scale experiments published results, characteristic features description and comparative analysis were carried out of the intra-chamber gas-dynamic processes in combustion products flow of the gas-generating pyrotechnic compositions for various types of gas generators of the vehicle airbag modules. They included solid fuel pyrotechnic gas generators of the frontal (driver and passenger) modules with single-stage and controlled two-stage operation; hybrid gas generators of the head modules (curtains) positioned above the vehicle doors; side modules positioned in the vehicle seats, and knee modules positioned under the steering column

Received 16.10.2023

Accepted 07.11.2023

© Author(s), 2024

---

## REFERENCES

- [1] Kravets V.N. Izmeriteli ekspluatatsionnykh svoystv avtotransportnykh sredstv [Measuring performance properties of motor vehicles]. Nizhniy Novgorod, NTSTU 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, UITSU Publ., 2011.
- [4] Savich E.L., Kapustin V.V. Sistemy bezopasnosti avtomobiley [Safety systems of automobiles]. Moscow, 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.). EDN: AFJQYS
- [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 re-

- sponse 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://dx.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.). EDN: SSWHLZ. DOI: <https://doi.org/10.20291/2311-164X-2020-2-70-73>
- [8] 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.
- [9] Orlenko L.P., ed. Fizika vzryva [Physics of explosion]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2004.
- [10] 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>
- [11] Remote control unit — help file. Vision research-AMETEK material analysis division, 2013.
- [12] Phantom video player help file. Vision Research-AMETEK material analysis division, 2013.
- [13] 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: <http://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2023-2-29-46>
- [14] 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
- [15] 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. Sci. Conf. Student Spring]. Moscow, Nauchnaya biblioteka Publ., 2022, pp. 106–107 (in Russ.).
- [16] Melnikov V.E. Sovremennaya pirotekhnika [Modern pyrotechnics]. Moscow, Nauka Publ., 2014.
- [17] Shidlovskiy A.A. Osnovy pirotekhniki [Pyrotechnics basics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1973.
- [18] Aleshin A.V., Shirokova G.N. Pyrotechnic compositions for nitrogen production based on azides. *Khimicheskaya fizika*, 1999, vol. 18, no. 2, pp. 72–79 (in Russ.).
- [19] 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://dx.doi.org/10.18698/0236-3941-2022-2-75-88>

[20] Gonsales Astua A.V., Goncharov R.B., Petyukov A.V. The method of strength calculation of the automobile airbag gas generator body. *Vestnik MADI*, 2022, no. 1, pp. 3–11 (in Russ.). EDN: YFGSOF

**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 interchamber processes in gas generators of the vehicle airbag modules. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Natural Sciences*, 2024, no. 3 (114), pp. 4–23 (in Russ.). EDN: PCFGYX