

УДК 621.694.2

ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ И РАБОТЫ ГАЗОВОГО АСПИРАТОРА

К. Н. Кузьменко[†], Н. Ф. Юрченко, П. М. Виноградский, Ю. А. Парамонов

*Институт гидромеханики НАН Украины,
ул. Желябова, 8/4, 03680, Киев, Украина*

[†]E-mail: k_kuzmenko@ex.ua

Получено 15.12.2017

Критически важным элементом современных автомобильных систем безопасности пассажиров являются аспираторы, обеспечивающие максимальное наполнение подушек безопасности за минимальное время, не превышающее 30 мс. По сути, эти устройства представляют собой сверхзвуковые газовые эжекторы. Проведено комплексное численно-экспериментальное исследование моделей аспиратора с целью оптимизации его конструкции. С целью увеличения расхода и коэффициента аспирации выполнен анализ результатов численного моделирования по испытаниям трех вариантов конструкции аспиратора (включая модификацию камеры смешения). В статье представлены результаты экспериментов, проведенных на пневматической установке, специально созданной для данной работы. Ее отличительной особенностью является наличие системы измерения процесса эжекции на выходе и во внутреннем тракте аспиратора. В качестве ключевого элемента экспериментальной установки разработан, изготовлен и испытан новый универсальный высокоскоростной клапан UHSV16-1. Определены давления отрыва потока от стенки аспиратора в зависимости от давления на входе в него. Найдены оптимальные параметры работы аспиратора и вариант конструкции, удовлетворяющие условиям поставленной задачи. Показано, что при чрезмерном увеличении входного давления наблюдается отрыв потока, препятствующий увеличению расхода воздуха. Исходя из этого, рекомендуется режим работы при давлении на 1...2 бар ниже порога, при котором происходит отрыв. Оптимизированный аспиратор спроектирован в меньших габаритах по сравнению с исходной моделью. В частности, его диаметр и длина уменьшены на 10 мм.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: аспиратор, подушка безопасности, давление, расход воздуха

1. ВВЕДЕНИЕ

Сверхзвуковые газовые эжекторы применяются в различных отраслях промышленности. Их работа основана на передаче энергии сжатого газа внешнему потоку при низком давлении [1,2].

Целью настоящего исследования является оптимизация конструкции газового эжектора (асpirатора) [3], предназначенного для работы в системе автомобильной подушки безопасности нового поколения. В результате после срабатывания датчиков подушка емкостью 50 литров должна заполниться воздухом из салона автомобиля за время, не превышающее 30 мс.

Для этого была разработана и изготовлена экспериментальная установка с системой измерения процесса эжекции на выходе и во внутреннем тракте аспиратора. Варианты конструкции эжектора основывались на результатах численного моделирования в пакетах Fluent и OpenFOAM [4]. Полученные численные результаты определяли представление об оптимальной конфигурации щели и, соответственно, работе эжектора. Эти данные позволяли конкретизировать входные параметры в планируемых экспериментах.

Таким образом, стратегия данного исследования состояла в проведении согласованных компьютерных и лабораторных экспериментов, являющихся итерационными этапами работ, связанных с рассматриваемой конструкцией эжектора и его оптимизацией. В статье приведены описание и результаты только экспериментальной части исследования.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Описываемая экспериментальная установка была спроектирована и изготовлена для испытания разработанных эжекторных моделей в процессе их оптимизации (Рис. 1). В ее состав входят баллон высокого давления (объем 40 л, давление 250 атм), ресивер для средних и высоких давлений (150 атм), манометры, два быстродействующих клапана, информационно-измерительный комплекс, вспомогательный эжектор для определения объема воздуха в подушке безопасности, компрессоры высокого (PE110-TW, до 250 атм) и низкого давлений (FLV-50, до 12 атм). Пневматическая схема установки показана на Рис. 2.

Сжатый компрессором высокого давления воздух подается в 40-литровый баллон высокого давления до достижения давления 100 атм. Далее, через редукционный клапан РВ-90 воздух подается в ресивер низкого давления. Редукционный клапан настраивается на диапазон давлений для каждой продувки в отдельности. Давление в ресивере измеряется двумя манометрами. Первый из них имеет шкалу 0...40 атм, а второй — 0...100 атм. Показания обоих манометров при проведении эксперимента отличаются не более, чем на 0.5 атм. В установке предусмотрен дренажный клапан для выхлопа воздуха в случае превышения давления в ресивере. Из ресивера воздух может идти по одному из двух направлений, каждое из которых соединено с определенным быстродействующим клапаном. Испытания проводились на быстродействующем клапане КБ-20-70 [5]. За каждым клапаном для измерения давления и потерь на нем установлены быстродействующие датчики большого давления фирмы ORTrand (диапазон измеряемого давления 1...70 атм).

Диапазон допустимых рабочих давлений находится в пределах $P = 1...150$ атм с возможностью изменения в ходе эксперимента давления от высокого к низкому, или наоборот. Предусмотрено дистанционное или ручное управление экспериментальной установкой. К ее особенностям также следует отнести мобильность.

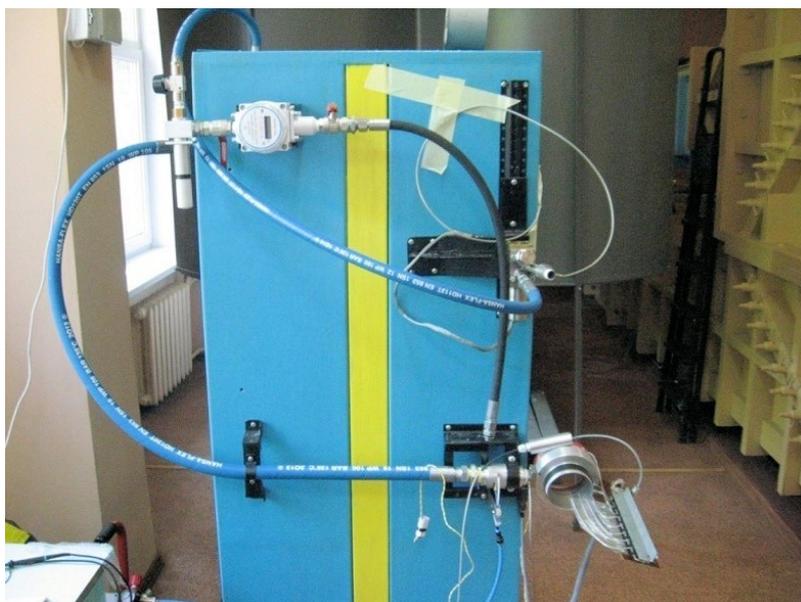


Рис. 1. Экспериментальная установка

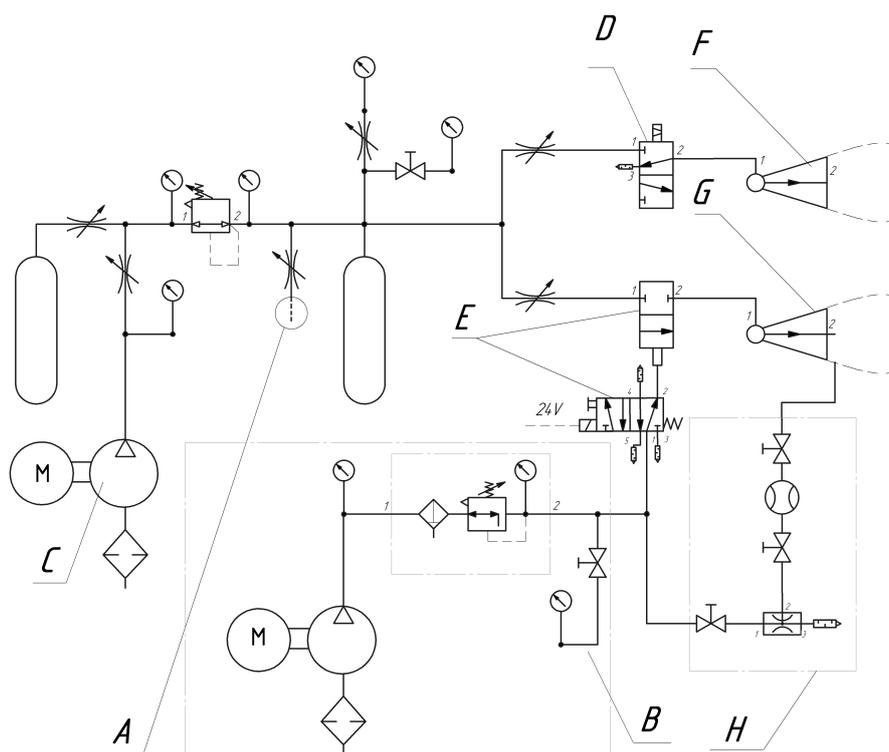


Рис. 2. Пневматическая схема установки:

A — дренажный кран; *B* — компрессор FLV-50; *C* — компрессор PE110-TW;
D — клапан UHSV16-1; *E* — клапан КБ-20-70; *F, G* — аспиратор; *H* — расходомер

В системе использован клапан КБ-20-70 с электропневматическим управлением, имеющий следующие параметры: диапазон рабочих давлений $P = 1 \dots 70$ атм, проходное сечение 20 мм, время открытия клапана $2 \dots 4$ мс, время закрытия клапана 4 мс. Максимальное время между подачей сигнала управления и полным открытием клапана составляет не более $t = 0.03$ с, а пилотное давление (давление управления) — $6 \dots 8$ атм.

Для независимой и более гибкой эксплуатации экспериментальной установки был разработан универсальный быстродействующий клапан UHSV16-1 с электрическим управлением, для которого клапан КБ-20-70 был взят в качестве прототипа. Среди параметров клапана UHSV16-1 перечислим диапазон рабочих давлений $P = 1 \dots 70$ атм, проходное сечение 20 мм, время открытия клапана $2 \dots 4$ мс, время закрытия клапана 3 мс. Максимальное время между подачей сигнала управления и полным открытием клапана составляет $t = 0.01$ с.

В ходе экспериментальных исследований было выполнено измерение потерь давления в клапанах UHSV 16-1 и КБ-20-70. Сравнительные измерения были выполнены на модели аспиратора № 2 (см. ниже) с шириной щели $s = 0.25$ мм, при давлении 34 атм. Показано, что разработанный клапан UHSV 16-1 вносит меньшие потери давления для одной и той же модели аспиратора при одинаковых параметрах. Определено, что минимальные потери давления наблюдаются в 16-ти сопловой модели аспиратора. Кроме того, для каждого из аспираторов меньшие потери имеют модели с минимальными значениями ширины щели.

3. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

Разработанная система сбора, обработки и презентации данных интегрирована в общий информационно-измерительный и управляющий комплекс лаборатории современной аэродинамики Института гидромеханики НАН Украины, используемый для выполнения ряда задач, включающих эксперименты в аэродинамических трубах [6, 7]. В его состав входят источник бесперебойного питания, промышленный компьютер, блок питания ATX 5V/12V, промышленный блок питания 24 В, необходимая электропроводка, клеммные терминалы и другое лабораторное оборудование.

Для измерений использована 16-канальная плата аналогового ввода с частотой опроса до 100000 опросов в секунду на канал вместе с материнской платой Advantech AIMB-841. Такая конфигурация позволяет информационно-вычислительной системе проводить измерения до 10 параметров с временным разрешением 0.1 мс. Считается достаточным обеспечить до 1000 измерений каждого параметра за один цикл работы аспиратора. Многофункциональная плата расширения PCI-1710 (для измерения и управления) совместно с платой ввода-вывода PCI 1747 (для измерения аналоговых сигналов) также интегрированы в информационно измерительный комплекс лаборатории.

Для отвода выделяемого оборудованием тепла промышленный компьютер оборудован несколькими охлаждающими вентиляторами, а шкаф, в котором он расположен, имеет собственную систему вытяжной вентиляции. Это стабилизирует температурный режим измерительной аппаратуры и источников питания, тем самым понижая температурный дрейф. Для обеспечения быстрого и удобного доступа к цифровым каналам и каналам управления панель подключения выполнена на верхней стенке

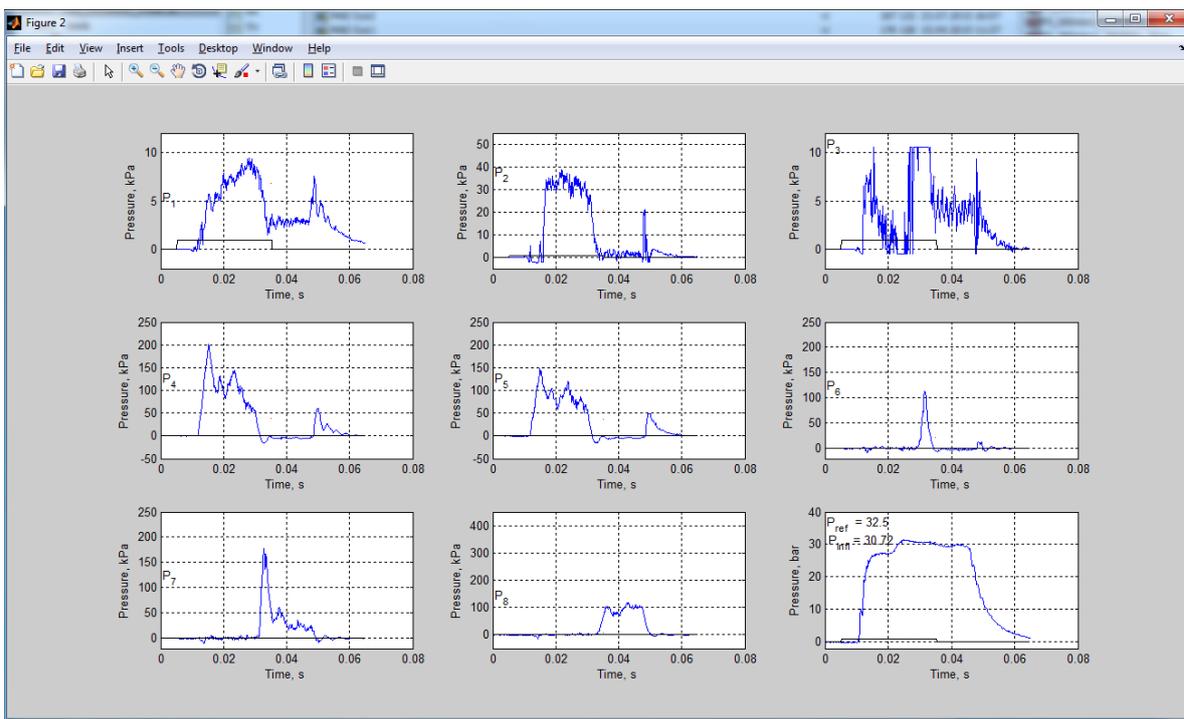


Рис. 5. Пример представления результатов эксперимента в среде Matlab:
данные с девяти датчиков давления

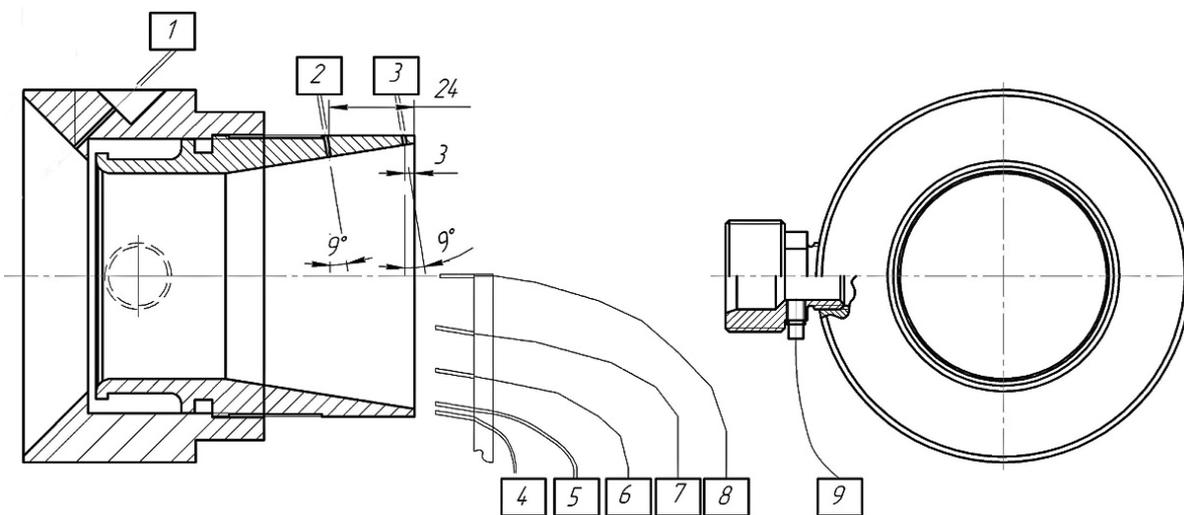


Рис. 6. Расположение датчиков давления для исследования эжектора фирмы EXAIR:
датчики № 1–3 — измеряют статическое давление;
датчики гребенки № 4–8 — измеряют полный напор;
датчик № 9 — измеряет давление на входе в эжектор EXAIR

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МОДЕЛИ АСПИРАТОРА

4.1. Базовый случай: EXAIR эжектор

Эжектор фирмы EXAIR показан схематически на Рис. 6. Используемая система измерения состоит из печатной платы с восемью датчиками давления. Три датчика MPXV-5004, которым присвоены номера № 1–3, измеряют статическое давления в разных сечениях на стенке аспиратора. Оставшиеся пять датчиков, собранные в гребенку, предназначены для измерения полного напора на выходе из аспиратора. Пять трубок для измерения полного напора установлены на державке. Генерируемые цифровые сигналы и аналоговые сигналы с датчиков поступают в измерительно-вычислительный комплекс, где обрабатываются с помощью специально созданного программного обеспечения. Приемники полного напора № 4 и № 5 установлены у самой стенки аспиратора для измерения пристеночных скоростей. Приемник № 8 расположен на оси аспиратора в его выходном сечении (см. Рис. 4). Датчик высокого давления № 9 расположен на входе между эжектором и быстродействующим клапаном.

4.2. Экспериментальная модель аспиратора № 1

Аспиратор состоит из двух частей, соединенных резьбой. Ширина щели регулируется и может быть увеличена. На Рис. 7 показана модель, установленная в экспериментальной установке с гребенкой приемников полного давления. Первый датчик давления ORTgrand установлен в штуцер, расположенный между клапаном КБ-20-70 и моделью аспиратора (Рис. 6, вид спереди). Второй датчик ORTgrand находится внутри аспиратора в его кольцевом канале, показанном на Рис. 3 (позиция D).

Аспиратор № 1 имеет следующие параметры: внешний диаметр 130 мм, длину 70 мм, диаметр входного отверстия 13 мм, ширину внутреннего кольцевого канала 6 мм, угол раскрытия диффузора 5° . Самое узкое место во внутреннем тракте аспиратора находится сразу за щелью и имеет диаметр 80 мм. Контур входной части аспиратора имеет криволинейный профиль для обеспечения более плавного невозмущенного всасывания воздуха.

При проведении исследований особое внимание обращалось на появление отрыва струи, ограничивающего рост давления для увеличения расхода воздуха. Ввиду этого

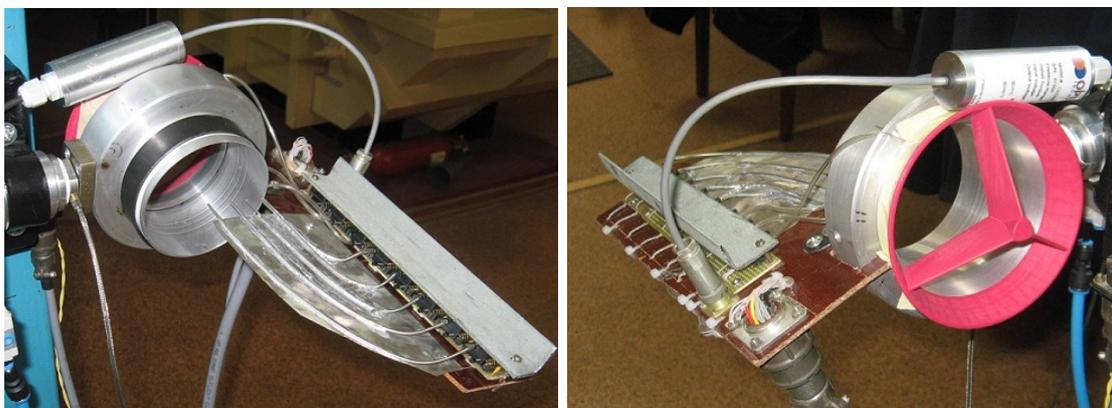


Рис. 7. Модель аспиратора № 1, установленная в экспериментальной установке

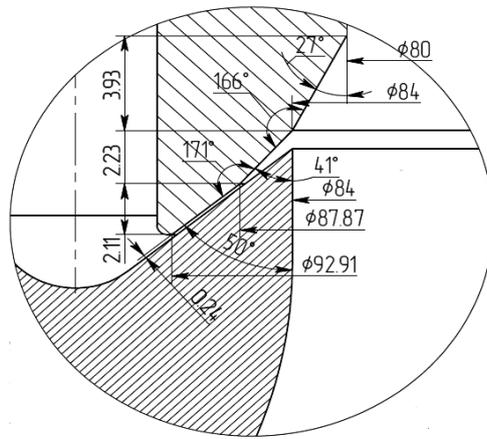


Рис. 8. Модель аспиратора № 1. Начальная геометрия щели

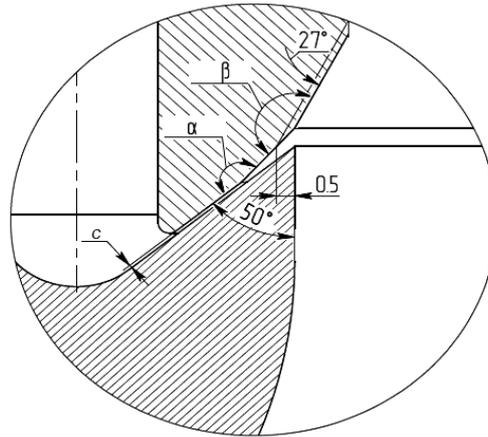


Рис. 9. Первая модификация параметров щели: $H = -0.5$ мм, $\alpha = 9^\circ$, $\beta = 23^\circ$

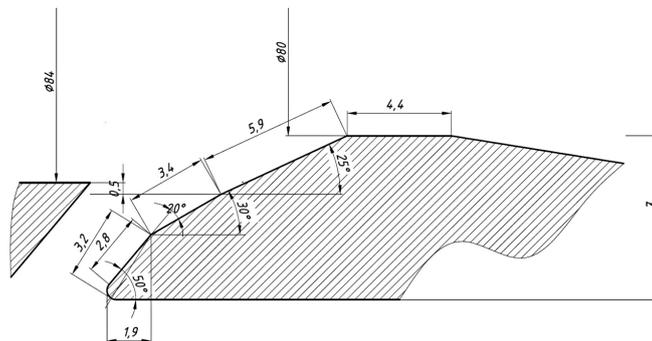


Рис. 10. Вторая модификация щели: $H = -0.5$ мм, $\alpha = 20^\circ$, $\beta = 25^\circ$

основные усилия были направлены на поиск таких условий, при которых отрыв происходил как можно позже, т.е. при как можно большем давлении.

Ситуация отрыва струи от стенки aspirатора с последующей регистрацией наличия струи на приемниках расположенных вблизи оси aspirатора (например, № 7 и № 8) условно именовалась «полным отрывом».

4.3. Модификации щели aspirатора № 1

Модификации щели были направлены на оптимизацию работы щели исходя из результатов численного моделирования и экспериментальных данных предыдущей конфигурации щели. Изменение геометрии щели при модификации показаны Рис. 8–10.

Новый параметр H был введен для связки двух угловых точек щели. Модификация щели заключалась в перемещении точки перегиба, т.е. начала угла β (Рис. 8, точка А) под острую кромку переднего фланца aspirатора (Рис. 8, точка В). В результате, углы α, β были изменены с 9° и 23° до 20° и 25° , соответственно.

4.4. Экспериментальная модель aspirатора № 2



Рис. 11. Модели aspirатора № 2 (слева) и № 1 (справа)

Aspirатор состоит из корпуса, переднего фланца, входного обтекателя и двух мембран. Корпус и передний фланец являются двумя частями aspirатора в то время как обтекатель и мембраны являются частью обратного клапана. Передний фланец позволяет регулировать ширину щели aspirатора путем вставки внутренних кольцевых прокладок, выполненных из тонкого листа и расположенных между фланцем и корпусом.

Для соединения двух частей aspirатора вместо резьбового соединения (как в aspirаторе № 1) было применено соединение с помощью шести болтов (Рис. 11). Для изменения ширины щели были использованы кольца диаметром 84 мм и толщинами 0.05, 0.08, 0.1 мм.

Одна из целей модификации aspirатора состояла в минимизации его габаритов. По сравнению с моделью № 1, длина модели № 2 была уменьшена с 70 мм до 64 мм. За счет отказа от входного обтекателя, диаметр изделия уменьшился со 130 мм до 120 мм. Также был изменен внутренний контур aspirатора, см. Рис. 12. Так, угол щели aspirатора β возрос с 10° до 25° , а угол $\alpha = 20^\circ$ и угол раскрытия диффузора 5° остались прежними.

4.5. Экспериментальная модель aspirатора № 3

Экспериментальная модель № 3 со входным конфузуром и без него показана на Рис. 13. Она стала результатом процесса оптимизации предыдущих моделей. При этом были выполнены следующие изменения:

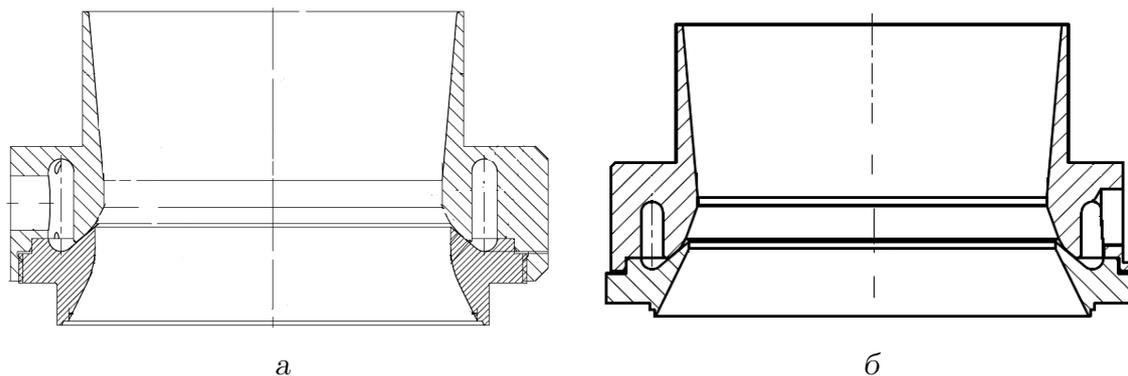


Рис. 12. Внутренний контур аспиратора:
а — аспиратор № 1; б — аспиратор № 2



Рис. 13. Аспиратор № 3:
а — без конфузора; б — с входным конфузуром

- ширина цилиндрического участка диаметром 80 мм, предшествующего диффузору, увеличена с 1.91 мм до 30 мм;
- угол раскрытия диффузора увеличен с 5° до 16.35° ;
- ширина щели увеличена до 0.25 мм;

В остальном конструкция аспиратора, его соединение, материал, технология сборки, шероховатость остались без изменений.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

5.1. Эжектор EXAIR. Базовый случай

С целью обеспечения основы для достоверного сравнительного анализа результатов экспериментального и численного моделирования была выполнена верификация постановки и результатов численного моделирования на основе стандартного эжектора No. 6043 фирмы EXAIR. Для этого был точно измерен внутренний контур эжектора с

дальнейшим использованием данной геометрии при численном моделировании работы aspirатора. Расчет проведен для четырех значений давления $P = 2.5, 5, 10$ и 15 атм для щели толщиной $c = 0.125$ мм, 0.1875 мм или 0.25 мм.

Численные результаты показывают, что EXAIR эжектор No. 6043 с шириной щели $c = 0.25$ мм является оптимальным только для значений давления около 6 бар. Для более узкой щели $c = 0.1875$ мм максимальный расход происходит при давлении, $P = 7 \dots 8$ бар, но соответствующий ему коэффициент аспирации, оказывается значительно ниже. Aspirатор с шириной щели $c = 0.125$ мм, показывает неудовлетворительные результаты во всем диапазоне входного давления, сохраняя при этом величину коэффициента аспирации около 10. В то же время, общий расход возрастает с увеличением входного давления, но остается ниже, чем для эжектора с параметрами $c = 0.25$ мм и $P = 5 \dots 6$ атм.

Сопоставление рассчитанных характеристик эжектора EXAIR с его паспортными данными было признано удовлетворительным, а полученные расхождения использовались для коррекции численной реализации задачи. Это позволило заключить, что методика расчета и результаты, полученные для новых конструкций aspirатора, могут считаться достаточно надежными для выдачи рекомендаций по физическому моделированию.

5.2. Экспериментальное исследование модели aspirатора № 1

5.2.1. Начальная геометрия щели

Были проведены три серии экспериментов для щели шириной $c = 0.08$ мм, 0.125 мм и $c = 0.25$ мм. Оказалось, что при $c = 0.25$ и $c = 0.125$ мм отрыв потока происходит при давлениях $P = 14.5$ атм и $P = 17.8$ атм соответственно. При уменьшении щели до $c = 0.08$ мм отрыв струи от стенки начинается при 25 атм, в то время, как полный отрыв происходит при 29 атм. Вакуумметрическое давление на входе в aspirатор (датчик № 1) достигает своего максимального значения 2.5 кПа при давлении 29 атм.

5.2.2. Первая модификация щели

Для щели шириной 0.1 диапазон давления составил $P = 20 \dots 45$ атм, длительность $t = 30$ мс. Отрыв потока происходил при $P_{\text{ref}} = 27$ атм (где P_{ref} — давление в ресивере, т.е. на входе в быстродействующий клапана) и $P_{\text{инф}} = 29$ атм (где $P_{\text{инф}}$ — давление в aspirаторе, т.е. после быстродействующего клапана). Вакуумметрическое давление на входе в aspirатор достигало своего максимального значения в 8 кПа при давлении 32 атм.

Для щели $0.095 \dots 0.1$ мм отрыв потока наблюдался при давлениях свыше 30 атм, а при $P = 30.36$ атм струя находилась у стенки. В момент увеличения давления до 30.57 атм происходил отрыв потока, а при $31 \dots 32$ атм — полный отрыв.

Для щели 0.14 мм диапазон давления был $P = 20 \dots 40$ bars, длительность $t = 30$ мс. Отрыв потока происходил при $P_{\text{ref}} = 28.2$ атм. При увеличении щели до 0.25 мм отрыв потока наблюдался уже при $P_{\text{ref}} = 20 \dots 21$ атм.

5.2.3. Вторая модификация щели

Приведем результаты, полученные для щели 0.1 мм. Для нее диапазон давления составил $P = 22 \dots 42$ атм, длительность $t = 30$ мс. Отрыв происходил при $P_{\text{ref}} = 40.5$ атм ($P_{\text{inff}} = 38.18$ атм). При давлении $P_{\text{ref}} = 40$ атм ($P_{\text{inff}} = 37.8$ атм) отрыв потока не наблюдался. Это позволило заключить, что данная геометрия дает отрыв потока в диапазоне $40 \dots 40.5$ атм. Напомним, что результатом первой модификации явилось повышение давления отрыва до 30.5 атм при данной ширине щели. Максимальное значение вакуумметрического давления на входе в аспиратор достигало $14 \dots 15$ кПа при $P = 40$ атм. Средняя скорость воздушной струи выходящей из щели составила 150 м/с, а максимальная скорость — 300 м/с, что приближается к скорости звука.

Для щели шириной 0.21 мм диапазон давления составил $P = 22 \dots 30$ атм, длительность $t = 30$ мс. Отрыв потока происходил при $P_{\text{ref}} = 26 \dots 29$ атм ($P_{\text{inff}} = 20 \dots 21$ атм).

5.3. Результаты экспериментов для модели аспиратора № 2

5.3.1. Влияние ширины щели

Для щели 0.11 мм диапазон давлений составил $P = 25 \dots 47$ атм, длительность $t = 30$ мс. Отрыв потока происходил при $P_{\text{ref}} = 44 \dots 45$ атм ($P_{\text{inff}} = 41.27 \dots 41.37$ атм). Напомним, что лучшие результаты для модели аспиратора № 1 со щелью той же ширины были получены при давлении отрыва порядка 40 атм.

Для щели 0.16 мм получен диапазон давлений $P = 23 \dots 41$ атм, длительность $t = 30$ мс. Отрыв потока происходил при $P_{\text{ref}} = 39 \dots 40$ атм ($P_{\text{inff}} = 34 \dots 34.57$ атм). Этот результат является промежуточным, по сравнению с данными, полученными для предыдущей модели аспиратора со щелями $c = 0.11$ мм и 0.21 мм.

Специальный интерес представлял случай щели с переменной по азимуту толщиной: $c = 0.21$ мм вдоль половины окружности и $c = 0.15$ мм вдоль второй ее половины. При этом диапазон давлений составил $P = 32 \dots 37$ атм, длительность $t = 30$ мс. Давление отрыва потока увеличилось до $P_{\text{ref}} = 36.75 \dots 37$ атм ($P_{\text{inff}} = 31.16 \dots 31.5$ атм).

5.3.2. Влияние длительности аспирации

Для щели с шириной $c = 0.16$ мм диапазон давлений был $P = 34 \dots 46$ атм, длительность $t = 30$ мс. Отрыв потока происходил при $P_{\text{ref}} = 45$ атм ($P_{\text{inff}} = 40$ атм).

Еще одной целью исследования было выявление влияния обратного клапана на давление отрыва. Установлено, что при наличии обратного клапана, давление отрыва увеличилось на $1 \dots 2$ атм.

Длительность продувки была уменьшена до 16 мс, что привело к заклиниванию аспиратора при $44 \dots 46$ атм. Стоит отметить, что давление в аспираторе остается постоянным при увеличении давления в ресивере, т.е. перед быстродействующим клапаном.

Рис. 14 показывает, что пристеночные датчики № 4 и № 5 регистрируют лежащую на стенке аспиратора струю. При этом максимальное значение показывает датчик № 4, а поток на датчиках № 6–8 отсутствует.

Приведем результаты для щели 0.25 мм.

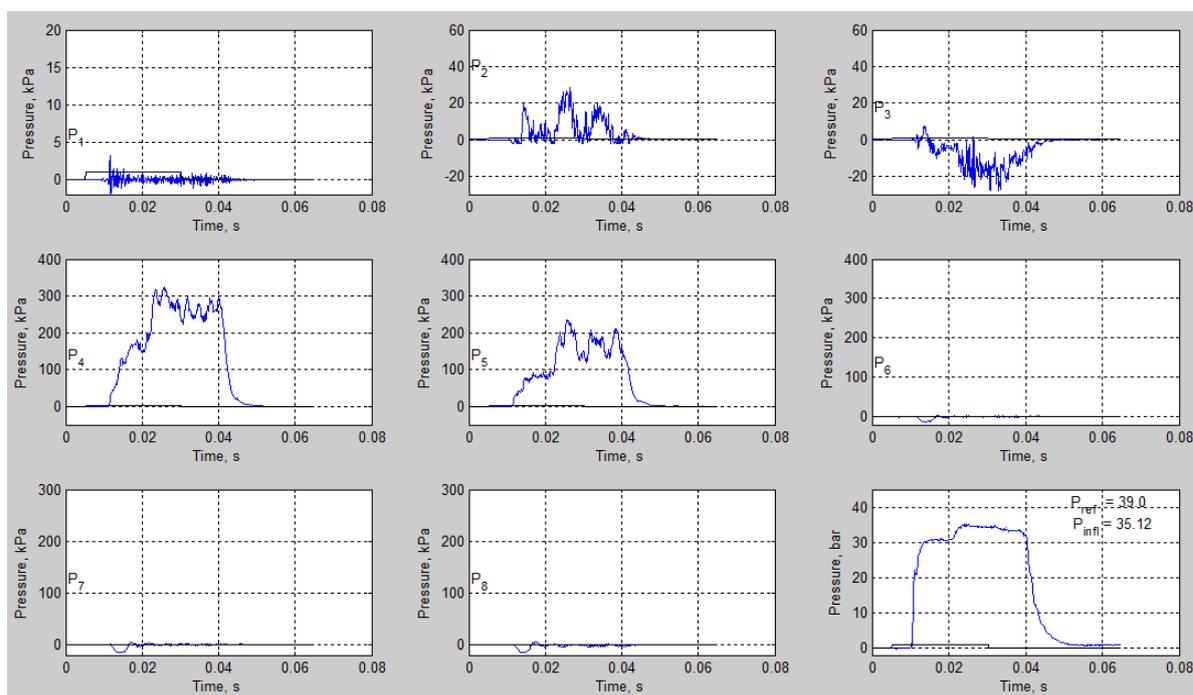


Рис. 14. Результаты для модели аспиратора № 2:
 $c = 0.16$ мм, $t = 30$ мс, $P_{ref} = 39$ атм, $P_{inf} = 35.12$ атм

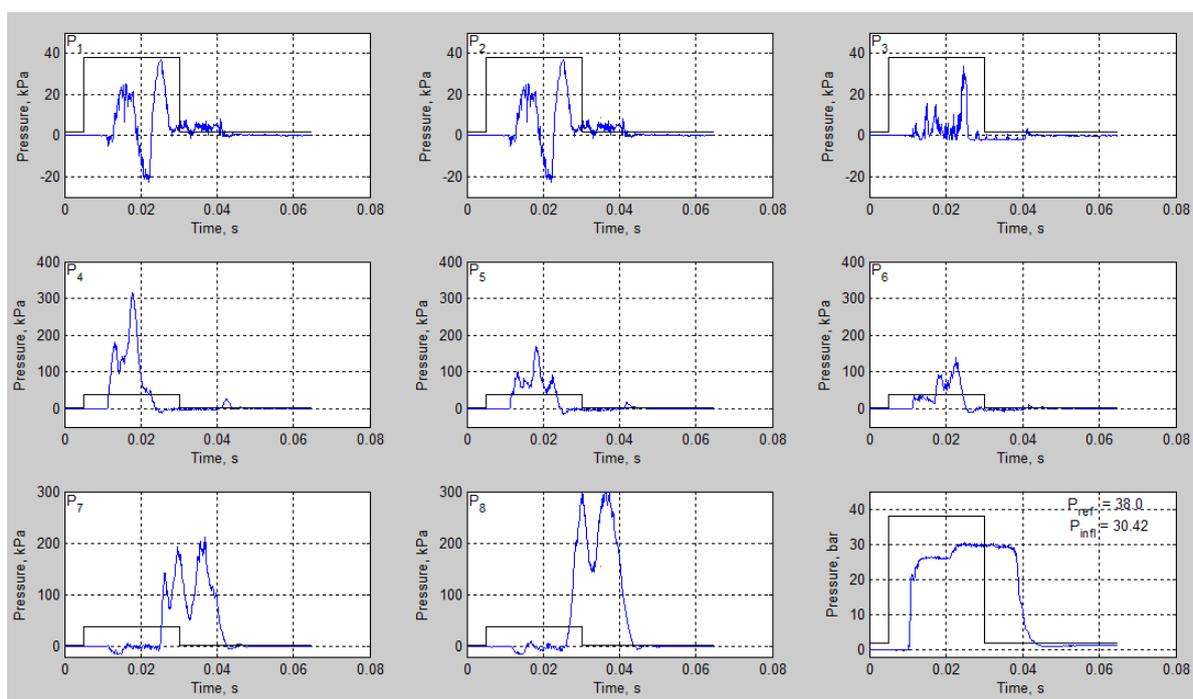


Рис. 15. Результаты для модели аспиратора № 2:
 $c = 0.25$ мм, $t = 30$ мс, $P_{ref} = 38$ атм, $P_{inf} = 30.42$ атм

1. $P = 20 \dots 38$ атм, $t = 30$ мс. Отрыв потока происходит при $P_{\text{ref}} = 36$ атм ($P_{\text{инф}} = 28.51$ атм).
2. $P = 20 \dots 37$ атм, $t = 15$ мс. Отрыв потока происходил при $P_{\text{ref}} = 34$ атм ($P_{\text{инф}} = 26.46$ атм).

Следует отметить, что наличие обратного клапана не повлияло на величину давления отрыва потока.

Рис. 15 иллюстрирует отрыв потока для щели 0.25 мм. Датчики № 4–6 показывают, что струя лежит на стенке аспиратора в течение 0.01 мс — до момента 0.022 мс, когда происходит отрыв. Струю, оторвавшуюся от стенки, обнаруживают датчики № 7 и № 8, расположенные на оси аспиратора.

5.4. Результаты для модели № 3

Основными задачами исследования были определение давления отрыва, а также исследование влияния конфузора с установленным в нем обратным клапаном.

При отсутствии входного конфузора диапазон давления был $P = 30 \dots 38$ атм, длительность $t = 30$ мс. Струя оставалась присоединенной при $P_{\text{ref}} = 36$ атм ($P_{\text{инф}} = 29.1$ атм). Стоит отметить, что при этом давлении на аспираторе № 2 уже происходил отрыв потока. В аспираторе № 3 с входным конфузуром струя оставалась присоединенной при $P_{\text{ref}} = 38$ атм и $P_{\text{инф}} = 31.31$ атм.

При отсутствии конфузора были зафиксированы большие значения статического давления за щелью, достигавшие 0.5 атм при давлении в ресивере 36 атм. В аспираторе с установленным входным конфузуром давление разрежения на входе является большим и достигало -0.6 атм при давлении в ресивере 37 атм.

На Рис. 16 представлено наполнение подушки при аспираторе № 3 при щели $s = 0.25$ мм и давлении $P_{\text{ref}} = 36$ атм.

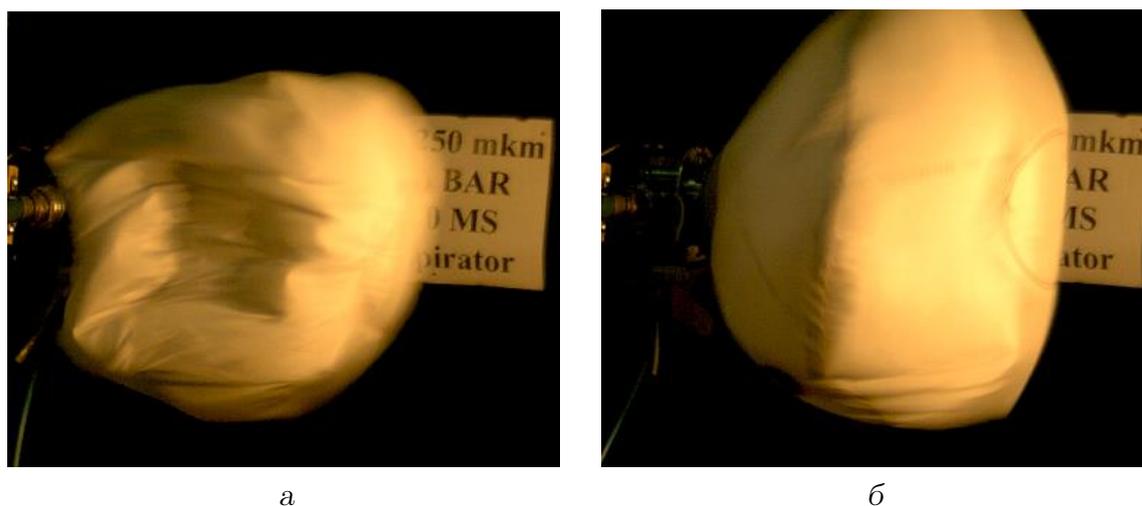


Рис. 16. Наполнение подушки при аспираторе № 3:
а — $t = 20$ мс; б — $t = 40$ мс

Сравнительный анализ процесса наполнения подушки при испытаниях аспираторов № 3 и № 2 позволяет сделать следующие выводы:

- при использовании аспиратора № 3 наполнение подушки происходит быстрее;
- при использовании аспиратора № 3 подушка имеет более округлую форму ввиду более полного наполнения ее воздухом.

При этом в аспираторе № 3 толщина щели была изменена с 0.25 мм до 0.15 мм для обеспечения возможности ее сравнения с ранее полученными результатами для других моделей.

Сравнение аспираторов № 2 и № 3 с одной и тоже шириной щели $c = 0.25$ мм показывает, что модель № 3 обеспечивает более низкие потери во всем диапазоне давления.

6. ВЫВОДЫ

1. Спроектирована, изготовлена и введена в эксплуатацию система для исследования сверхзвуковых аспираторов с внутренним расположением щели для аварийного наполнения подушек безопасности.
2. В качестве ключевого элемента экспериментальной установки разработан, изготовлен и испытан новый универсальный высокоскоростной клапан UHSV16-1.
3. По испытаниям трех вариантов конструкции аспиратора Выполнен анализ результатов численного моделирования, включая модификацию камеры смещения, направленную на увеличение расхода и коэффициента аспирации.
4. Показано, что отрыв потока препятствует увеличению расхода воздуха при увеличении давления. В качестве наилучшего режима можно было бы рекомендовать давление на 1...2 бар ниже величины, при которой происходит отрыв.
5. Найдено, что конструкция щелевого аспиратора № 3 полностью удовлетворяет поставленным техническим условиям по наполнению 50-литровой подушки в течение 30...35 мс с коэффициентом аспирации $A_{max} = 4$.
6. Согласно экспериментальным данным, наиболее эффективное наполнение подушки безопасности достигнуто при использовании аспиратора № 3 с шириной щели 0.25 мм при давлении $P_{asp} = 36$ атм (лучший результат) и $P_{asp} = 40$ атм (результат, ближайший к лучшему).
7. Аспиратор № 3 спроектирован в меньших габаритных размерах по сравнению с моделью аспиратора № 1: его диаметр и длина были уменьшены на 10 мм.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают искреннюю признательность компании ATI в лице ее президента David S. Breed за оказанную финансовую поддержку, а также регулярные обсуждения проблемы, без чего выполнение данной работы было бы невозможным.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Соколов Е. Я., Зингер Н. М. Струйные аппараты. — Москва : Энергоатомиздат, 1989. — 352 с.
- [2] Аркадов Ю. К. Новые газовые эжекторы и эжекционные процессы. — Москва : Физматлит, 2001. — 336 с.
- [3] Абрамович Г. Н. Прикладная газовая динамика. — Наука, 1969. — Т. 1. — С. 149–168.
- [4] Димитриева Н. Ф., Загуменный Я. В. Численное моделирование стратифицированных течений с использованием OpenFOAM // Труды ИСП РАН. — 2014. — Т. 26, № 5. — С. 187–200.
- [5] Пневмоклапаны : ООО НПП «ИСТА». — Санкт-Петербург. — Режим доступа: <http://www.ista-pneumatics.ru/ru/kv.shtml>.
- [6] Aerodynamic facility with MW-systems for flow control based on localized plasma generation / Vynogradskyy P., Yurchenko N., Pavlovsky R., and Zhdanov O. // AIAA Paper. — 2008. — no. 3939.
- [7] Аэродинамический комплекс для междисциплинарных исследований / Юрченко Н. Ф., Парамонов Ю. А., Жданов О. И., Виноградский П. М., Павловский Р. Н., Есаков И. И., Ходатаев К. В., Грачев Л. П., Раваев А. А. и Александров К. В. // Труды VII международной школы-семинара «Модели и методы аэродинамики». — Евпатория, Украина. — 2008.

REFERENCES

- [1] E. Y. Sokolov and N. M. Zinger, *Jet devices*. Moscow: Energoatomizdat, 1989.
- [2] Y. K. Arkadov, *New gas ejectors and ejection processes*. Moscow: Fizmatlit, 2001.
- [3] G. N. Abramovich, *Applied gas dynamics*, vol. 1. Nauka, 1969.
- [4] N. F. Dimitrieva and Y. V. Zagumennyi, “Numerical simulation of stratified flows using OpenFOAM package,” *Proceedings of ISP RAS*, vol. 26, no. 5, pp. 187–200, 2014.
- [5] “Pneumatic valves [electronic resource]. Saint-Petersburg, Russian Federation: RPE “ISTA”. URL: <http://www.ista-pneumatics.ru/en/main-ista/production/pneumatic-valves-of-the-kb-series/>.”
- [6] P. Vynogradskyy, N. Yurchenko, R. Pavlovsky, and O. Zhdanov, “Aerodynamic facility with MW-systems for flow control based on localized plasma generation,” *AIAA Paper*, no. 3939, 2008.
- [7] N. F. Yurchenko, Y. A. Paramonov, O. I. Zhdanov, P. M. Vynogradskyy, R. N. Pavlovsky, I. I. Esakov, K. V. Khodataev, L. P. Grachev, A. A. Ravaev, and K. V. Aleksandrov, “Aerodynamic complex for interdisciplinary studies,” in *Proceedings of VII International Workshop “Models and Methods of Aerodynamics”*, (Yevpatoriya, Ukraine), 2008.

**К. Н. Кузьменко, Н. Ф. Юрченко,
П. М. Виноградський, Ю. О. Парамонов**

Оптимізація конструкції і роботи газового аспіратора

Критично важливим елементом сучасних автомобільних систем безпеки пасажирів є аспіратори, які забезпечують максимальне наповнення подушок безпеки за мінімальний час, що не перевищує 30 мс. По суті, ці пристрої являють собою надзвукові газові ежектори. Проведено комплексне чисельно-експериментальне дослідження моделей аспіратора з метою оптимізації його конструкції. Задля збільшення витрати та коефіцієнта аспірації виконано аналіз результатів чисельного моделювання за випробуваннями трьох варіантів конструкції аспіратора (включаючи модифікацію камери змішування). У статті подано результати експериментів, проведених на пневматичній установці, спеціально створеній для даної роботи. Її суттєвою особливістю є наявність системи вимірювання процесу ежекції на виході й у внутрішньому тракті аспіратора. У якості ключового елемента експериментальної установки розроблено, виготовлено та випробувано новий універсальний високошвидкісний клапан UHSV16-1. Визначений тиск відриву потоку від стінки аспіратора в залежності від тиску на вході в нього. Знайдено оптимальні параметри роботи аспіратора та варіант конструкції, які задовольняють умови поставленого завдання. Показано, що за надмірного збільшення вхідного тиску спостерігається відрив потоку, який перешкоджає збільшенню витрати повітря. Виходячи з цього, рекомендується режим роботи за тиску на 1...2 бар нижче порога, при якому відбувається відрив. Оптимізований аспіратор спроектовано в менших габаритах, у порівнянні з вихідною моделлю. Зокрема, його діаметр і довжину зменшено на 10 мм.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: аспіратор, подушка безпеки, тиск, витрата повітря

**K. N. Kuzmenko, N. F. Yurchenko,
P. M. Vinogradskii, Yu. O. Paramonov**

Optimization of construction and work of gas aspirator

Aspirators are critical elements of modern automotive passenger safety systems, providing maximum airbag inflation in a minimum time not exceeding 30 ms. In fact, these devices are supersonic gas ejectors. A comprehensive numerical-experimental study of aspirator models was done to optimize its design. To increase the flow rate and the aspiration coefficient, the results of numerical simulation of the tests of three variants of the aspirator design were analyzed, including the modification of the mixing chamber. The article presents the results of experiments on a pneumatic installation designed especially for this work. Its distinguishing feature is the presence of a system for measuring the ejection process at the outlet and in the internal path of the aspirator. A new universal high-speed valve UHSV16-1, the central element of the experimental setup, was developed, manufactured, and tested. The pressures of flow separation from the aspirator's wall are recorded depending on the pressure at its inlet. The optimal parameters of the aspirator operation and the design variant that satisfy the task conditions were found. It is shown that flow separation preventing an increase in air flow occurs with excessive inlet pressure. Therefore, operation at a pressure 1...2 bar below the breakaway threshold is recommended. The optimized aspirator is designed to be smaller than the original model. In particular, its diameter and length are reduced by 10 mm.

KEY WORDS: aspirator, airbag, pressure, airflow