

ГРАНИЦЫ ОБЛАСТЕЙ РЕГУЛИРОВАНИЯ СВЕРХЗВУКОВЫХ ВОЗДУХОЗАБОРНИКОВ

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики:
Павел Викторович Булат, к.э.н., к.ф.-м.н., руководитель Международной лаборатории "Механики и энергетических систем"
Николай Васильевич Продан, инженер Международной лаборатории "Механики и энергетических систем"
Владимир Владимирович Упырев, инженер Международной лаборатории "Механики и энергетических систем"

В работе рассмотрена проблема оптимального регулирования сверхзвукового воздухозаборника в широком диапазоне скоростей. Приведены сведения об оптимальных ударно-волновых структурах воздухозаборников внешнего и смешанного сжатия. Даны результаты расчетов границ областей оптимального регулирования для каждого типа воздухозаборников. Изучается перестройка ударно-волновой структуры в воздухозаборнике внешнего сжатия по мере увеличения числа Маха полета.

The paper considers the problem of optimal control of a supersonic air intake in a wide range of speeds. Optimal shock-wave structures for mixed and external compression air intake are studied. The boundaries of the regions of existence of optimal shock-wave structures studied. We study the transformation of the shock wave in the air intake structure of external compression by increasing the speed of flight.

Ключевые слова: скачок уплотнения, ударная волна, ударно-волновая структура, воздухозаборник, оптимальное регулирование воздухозаборника, оптимальная ударно-волновая структура.

Keywords: shock wave, shock wave structure, air intake, optimal regulation of air intake, optimal shock-wave structure.

Введение

Первые сверхзвуковые самолеты оснащались сверхзвуковыми воздухозаборниками (ВЗ) внешнего сжатия (рис. 1,а) в системе скачков уплотнения одного направления (догоняющих скачков - ДСУ) [1, 2]. При скорости полета до чисел Маха $M = 2$ такое решение является оптимальным, но при дальнейшем увеличении скорости поперечные габариты таких устройств значительно растут, что увеличивает массу и лобовое сопротивление самолета. Выход был найден в использовании смешанного или комбинированного сжатия, когда головной косой скачок или система скачков отражается от стенки воздухозаборника в виде косого скачка противоположного направления (рис. 1,б). Внутреннее переотражение скачков перед замыкающим прямым скачком позволяет уменьшить длину ВЗ и увеличить коэффициент восстановления полного давления. Первым серийным самолетом, на котором был установлен ВЗ смешанного сжатия, стал американский стратегический разведчик SR-71, которому до сих пор принадлежит мировой рекорд скорости полета - 3650 км/ч. Ниже рассмотрены оптимальные ударно-волновые структуры (УВС) для воздухозаборников внешнего и смешанного сжатия.

Оптимальная ударно-волновая структура для воздухозаборника смешанного сжатия

Простейшим вариантом для такого воздухозаборника может быть УВС, состоящая из падающего на твердую поверхность скачка, отраженного от этой поверхности скачка и замыкающего прямого скачка (рис. 1,б). Отражение скачка от стенки [3] является частным случаем интерференции встречных косых скачков [4]. Давление торможения за прямым скачком уплотнения увеличивается, если перед ним произойдет регулярное отражение скачка уплотнения от стенки (или плоскости симметрии). Существует интенсивность приходящего скачка уплотнения, при которой это увеличение будет наибольшим, соответствующая структура будет оптимальной.

Используя методику расчета полного давления за серией скачков [5], рассчитана зависимость отношения степени восстановления полного давления $s = I_{03}/I_{01}$ в оптимальной системе из трех скачков (падающего косого, отраженного и прямого) с коэффициентом восстановления I_{03} к коэффициенту восстановления в прямом скачке I_{01} . Линией "max" отмечены углы наклона скачка, соответствующие оптимальным УВС, обеспечивающим наибольший коэффициент восстановления полного давления. Заметим, что если один косой скачок перед прямым дает увеличение p_{01} , например, при $M = 3$ в 1,8 раза, то отражение от стенки косого скачка перед прямым увеличивает p_{03} в 2,25 раза. Как известно [3], отражение косого скачка от стенки может происходить не только регулярным, но и маховским образом, с образованием на стенке ножки Маха.

Путем сравнения результатов численных расчетов с экспериментом было показано, что переход от регулярного отражения к маховскому отражению и обратно, в зависимости от направления изменения M и β , происходит в условиях близких к двум критериям, сформулированным von Neumann [6]: "критерию отсоединения" (criterion detaching) и "критерию меха-

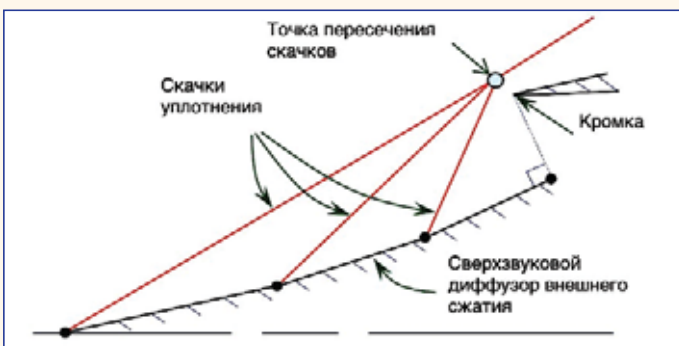


Рис. 1а Схема сжатия потока и ударно-волновой структуры в воздухозаборнике внешнего сжатия



Рис. 1б Схема сжатия потока и ударно-волновой структуры в воздухозаборнике смешанного сжатия

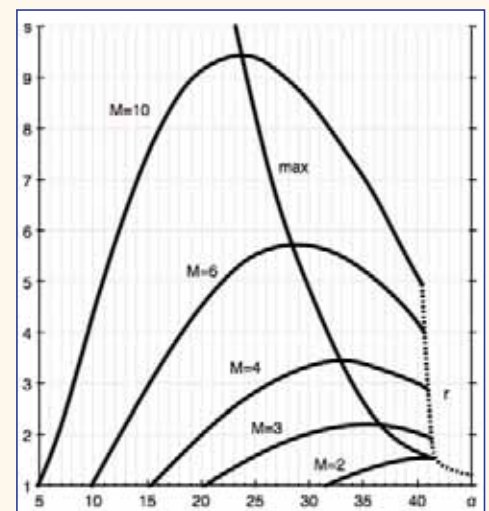


Рис. 2 Зависимость степени увеличения давления торможения s за системой из трех скачков по сравнению с давлением торможения за одним прямым скачком от угла наклона α первого скачка и числа Маха M

нического равновесия" (mechanical equilibrium), последний позднее был назван В.Н. Усковым "критерием стационарной маховской конфигурации (СМК)". Был обнаружен гистерезис при изменении числа Маха потока, а также при изменении углов клина воздухозаборника, т.е. при одних и тех же параметрах оказалось возможным существование УВС двух различных типов. Наибольший вклад в изучение этого важного для практики феномена внесли Е.И. Васильев [7], М.С. Иванов, А.Н. Кудрявцев, Д.В. Хотяновский [8, 9], а также Ben-Dor G. [10].

Маховское отражение является нежелательным и, часто, аварийным для ВЗ. Пунктирной линией Γ на рис. 2 отмечены углы наклона первого скачка, при которых происходит переход от регулярного к маховскому отражению скачка от стенки. Видно, что при $M < 2$ оптимальная УВС лежит довольно близко к области маховского отражения косого скачка от стенки. Это говорит о том, что применять воздухозаборники смешанного сжатия на таких скоростях нерационально. Ярко выраженный максимум имеет место, начиная с $M = 3,5$.

Оптимальная область регулирования воздухозаборника внешнего сжатия

Воздухозаборник внешнего сжатия сжимает газ в серии косых скачков одного направления и замыкающем прямом скачке (рис. 1,а). Из точки пересечения ДСУ исходит тангенциальный разрыв, основной исходящий разрыв, который всегда является скачком уплотнения, а также отраженный разрыв, который может быть скачком уплотнения, слабым разрывом и волной разрежения. Волна разрежения является нежелательной, т.к. её наличие приводит к снижению степени сжатия в ВЗ и возможности появления неустойчивых режимов работы.

Большой вклад в развитие теории догоняющих скачков уплотнения, в выявление областей существования различных ударно-волновых структур с их участием внесли В.Н. Усков [5] и А.Л. Старых [2]. А.В. Омельченко и В.Н. Усковым было исследовано на экстремум поведение газодинамических переменных за УВС с косыми догоняющими скачками уплотнения [11].

Первым задачу построения оптимальной системы скачков одного направления решил К. Осватич [12]. Система с максимальным значением коэффициента сохранения полного давления обладает тем свойством, что нормальная составляющая числа Маха перед всеми скачками одинакова. Следовательно, отношения полных давлений, а также статических давлений, плотностей и температур во всех косых скачках уплотнения также одинаковы. Замыкающий прямой скачок оптимальной системы при $1,5 < M < 5$ немного слабее косых скачков, поэтому с небольшой долей погрешности можно считать, что все скачки оптимальной УВС в данном случае должны иметь равную интенсивность. Коэффициент восстановления полного давления растет по мере увеличе-

ния количества скачков в УВС (рис. 3). В пределе, когда система, состоящая из серии косых скачков одного направления и замыкающего прямого скачка, заменяется изоэнтропической волной сжатия, прямой скачок вырождается в разрывную характеристику с $J = 1$ и тогда $I = 1$. Сравнивая кривую 3 воздухозаборника с тремя клиньями сжатия с кривой 2 двухскачкового воздухозаборника, нетрудно заметить, что до $M = 2,5$ их характеристики близки и, следовательно, конструкция себя не оправдывает. Именно поэтому, на большинстве современных сверхзвуковых самолетов используется более простой двухскачковый воздухозаборник.

Для ВЗ внешнего сжатия также, как и для ВЗ смешанного сжатия, возможен нештатный режим работы в условиях маховской интерференции догоняющих скачков (рис. 4).



Рис. 4 Маховская интерференция догоняющих скачков [13]

В процессе изменения скорости полета УВС в ВЗ трансформируется и перестраивается. Рассмотрим, для примера, типичный сверхзвуковой пассажирский самолет, рассчитанный на крейсерскую скорость полета $M = 2,2...2,5$. Будем считать, что он оснащен двухскачковым воздухозаборником. Выберем угол первого клина $\beta_1 = 20^\circ$, угол второго клина $\beta_2 = 10^\circ$, которые обеспечивают структуру скачков, близкую к оптимальной в диапазоне чисел Маха $M = 2,4...2,5$. Рассмотрим, как трансформируется УВС при изменении числа Маха от $M = 2,3$ до $M = 2,45$ (рис. 5). На рис. 5 для каждого числа Маха слева показан результат численного расчета по схеме идеального газа, а справа - решение на плоскости ударных поляр - кривых, связывающих логарифм интенсивности скачка уплотнения $\Lambda = \ln J$ и угол разворота потока на этом скачке β .

Черная поляра соответствует числу Маха невозмущенного потока, красная - числу Маха за первым скачком, синяя - за вторым скачком. При регулярной интерференции ДСУ пересекаются левая

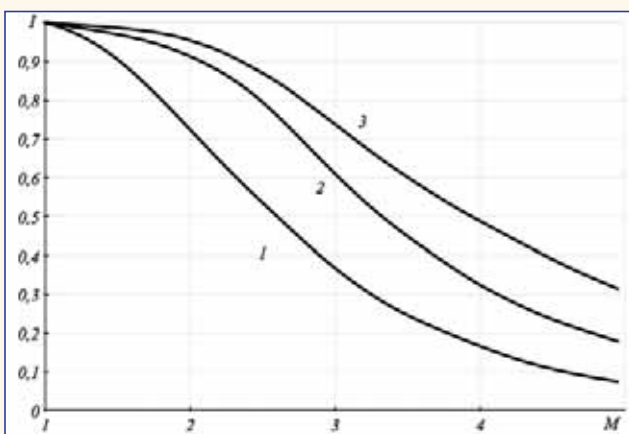


Рис. 3 Коэффициент восстановления полного давления за системой скачков: 1 - прямой скачок, 2 - один косой и один прямой скачок, 3 - два косых и один прямой скачок

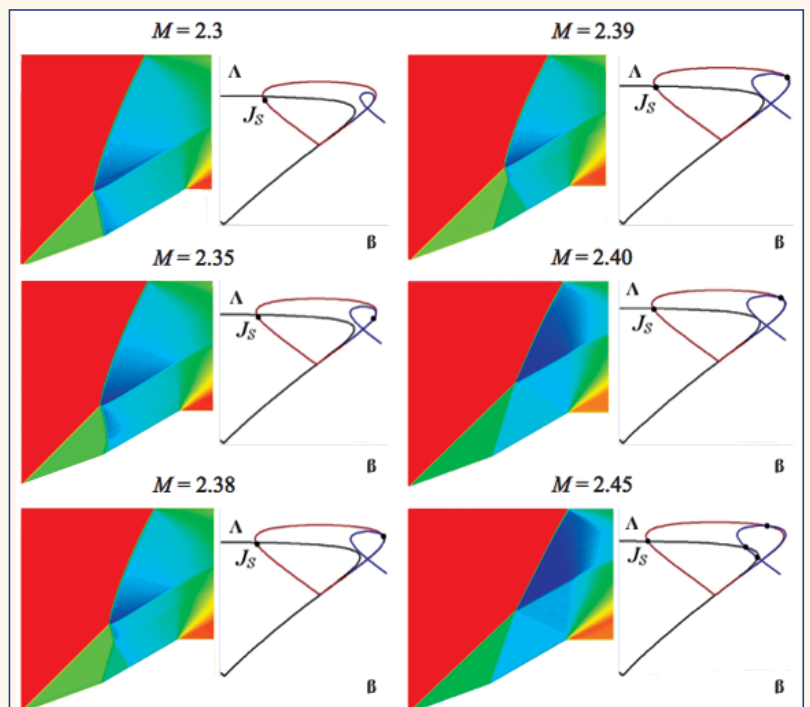


Рис. 5 Трансформация УВС в двухскачковом воздухозаборнике при изменении числа Маха полета

ветвь синей поляры и правая ветвь черной поляры. При $M = 2,3$ синяя поляра не пересекается ни с черной, ни с красной. Красная поляра пересекается с черной в точке с интенсивностью, большей звуковой ($J > J_s$), т.е. течение за УВС - дозвуковое. Под воздействием возмущений, передающихся через дозвуковой поток, второй скачок искривляется и из догоняющего становится встречным. Решению соответствует точка пересечения красной и черной поляры.

При увеличении числа Маха до $M = 2,35$ появляется точка пересечения синей и красной поляры правыми ветвями, что соответствует образованию λ -образной структуры с двумя догоняющими скачками, приходящими в тройную точку от второго клина (рис. 5, $M = 2,3...2,39$). При дальнейшем увеличении M тройные точки сближаются, пока не сливаются в одну при $M = 2,4$ с превращением третьего скачка в отраженный скачок, исходящий из точки интерференции ДСУ. На плоскости поляр этому соответствует касание синей поляры с черной. Таким образом, на достаточно узком отрезке изменения параметра M от $M = 2,3$ до $M = 2,4$ УВС проходит целый ряд любопытных перестроек. Сначала имеет место интерференция встречных скачков уплотнения, затем второй скачок расщепляется на два догоняющих. Главный скачок, исходящий из тройной точки пересечения ДСУ, является для головного скачка, распространяющегося от первого клина, приходящим встречным скачком. Постепенно он укорачивается и исчезает совсем. Второй приходящий ДСУ при этом трансформируется в отраженный разрыв, а сама тройная конфигурация скачков проходит стадию, когда второй ДСУ становится прямым (см. фрагмент с $M = 2,45$ на рис. 5). Понятно, что, проектируя оптимальную УВС и задавая законы их трансформации, необходимо знать границы областей существования УВС соответствующих типов.

Ниже построены трехмерные (J_1 - J_2 - M) области существования УВС различного типа, возникающие при интерференции двух догоняющих скачков (рис. 6-8). Оранжевым цветом выделена наиболее интересная для регулирования воздухозаборников область, в которой происходит регулярная интерференция двух ДСУ с образованием отраженного разрыва - скачка уплотнения.

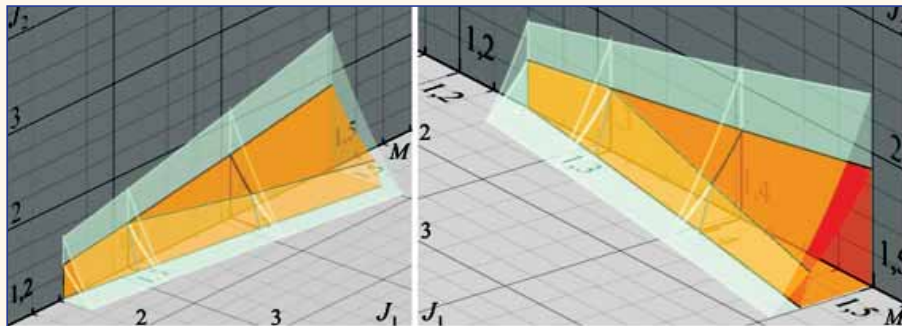


Рис. 6 Область существования регулярной УВС с ДСУ с отраженным разрывом - скачком уплотнения. $M = 1,2...1,5$

На рис. 6 объем, соответствующий интерференция ДСУ с образованием отраженного скачка уплотнения, ограничен координатными плоскостями J_1 - M , J_2 - M , первой ветвью характеристического решения, когда отраженный разрыв - слабый разрыв, и поверхностью, ограничивающей область регулярной интерференции ДСУ. Светло-зеленая поверхность соответствует границе существования УВС с отраженным разрывом ($J_2 = J_s$), когда течение за вторым приходящим скачком становится дозвуковым и отраженный разрыв образовываться не может.

Видно, что в диапазоне $M = 1,245...1,5$ оптимальное регулирование двухскачковых воздухозаборников с внешним сжатием не должно вызывать никаких затруднений. При $M < 1,245$ существование УВС с отраженным скачком невозможно.

На рис. 7 показаны области существования различных УВС в диапазоне $M = 1,8...2,55$. Внутренняя граница области интерференции ДСУ с отраженным разрывом - скачком уплотнения образована характеристической поверхностью и

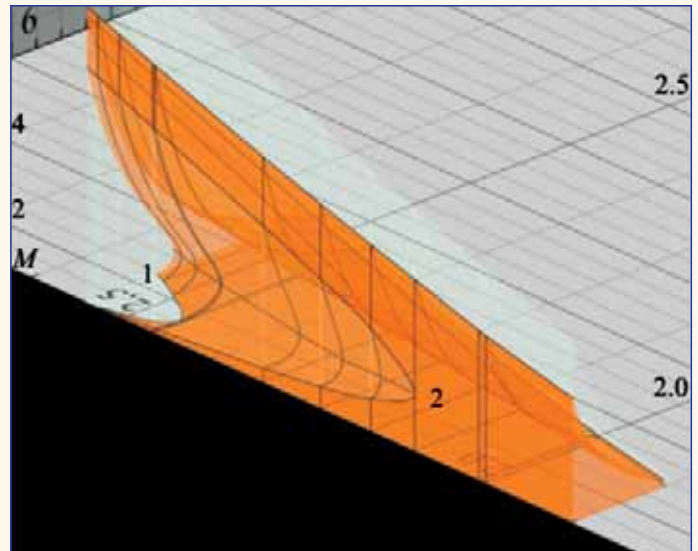


Рис. 7 Область существования регулярной УВС с ДСУ с отраженным разрывом - скачком уплотнения. $M = 1,8...2,55$

координатными плоскостями, на которых характеристическая поверхность отсекает области, показанные на рис. 7 линиями 1 и 2. При $M < 2,089$ регулирование воздухозаборника не вызывает затруднений, т.к. область с отраженной волной разрежения отсутствует. При $M > 2,089$ область с отраженным скачком сужается, но оптимальную УВС - такую, что $J_1 = J_2$, построить можно без проблем вплоть до $M = 2,204$. Далее нужно следить за появлением нерегулярной интерференции.

На рис. 8 видно, что в диапазоне $M = 3,8...5$ область с отраженным скачком очень узкая. Она образована нижней поверхностью, из которой область с отраженной волной разрежения вырезает поверхность, ограниченную подковообразной кривой 1. Нижняя поверхность этой области пересекается с координатными плоскостями по кривым 2 и 3. Верхняя поверхность пересекается с координатными плоскостями по линиям 4 и 5 и с нижней поверхностью по линии 1. Вершина линии 1 соответствует числу Маха $M = 3,82$. При $M < 3,82$ объем области с отраженным скачком ограничен верхней поверхностью, опирающейся на линии 4 и 5, и нижней поверхностью, опирающейся на линии 2 и 3. Две светло-зеленые поверхности - это граница регулярной и нерегулярной интерференции, а также граница существования отраженных разрывов ($J_2 = J_s$).

При $M > 3,82$ оптимальное регулирование воздухозаборников внешнего сжатия невозможно, а при $M < 3,82$ оно возможно, но диапазон регулирования очень и очень узкий.

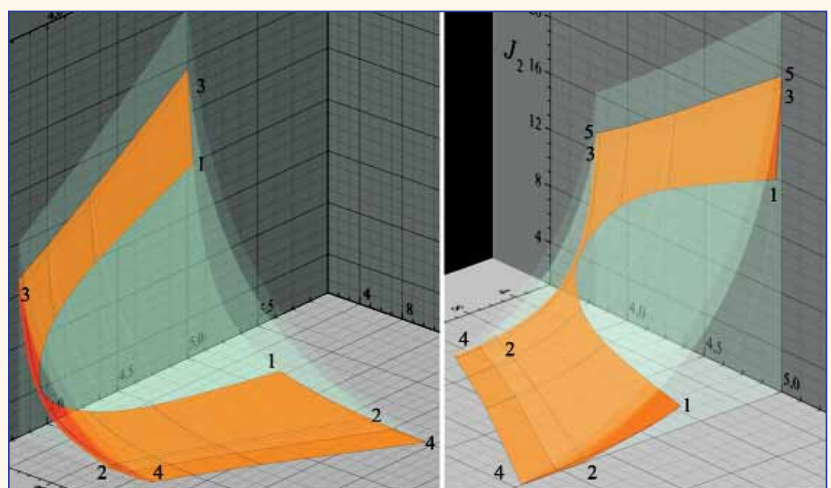


Рис. 8 Область существования регулярной УВС с ДСУ с отраженным разрывом - скачком уплотнения. $M = 3,8...5$

Таким образом, проведенный анализ показал, что в диапазоне $M = 1,245...2,089$ воздухозаборник, основанный на ДСУ будет работать оптимально, в диапазоне $M = 2,089...2,55$ оптимальное регулирование воздухозаборника внешнего сжатия возможно, но диапазон регулирования существенно сужается.

Заключение

В работе представлены результаты расчетного исследования оптимальных ударно-волновых структур в воздухозаборнике внешнего сжатия в системе скачков уплотнения одного направления, а также смешанного сжатия в системе скачков, образованных отражением косого скачка от стенки. Выявлены области, в которых возможно получение максимального коэффициента восстановления полного давления.

Показано, что в диапазоне $M = 1,245...2,089$ воздухозаборник внешнего сжатия работает в оптимальных условиях. В диапазоне $M = 2,089...2,55$ оптимальный диапазон, в котором интенсивности двух догоняющих и одного замыкающего скачка одинаковые, сужается, но оптимальную УВС, такую, что $J_1 = J_2$, построить можно без проблем вплоть до $M = 2,204$. Далее нужно следить за появлением нерегулярной интерференции. При более высоких числах Маха построение оптимальной УВС с ДСУ и отраженным разрывом скачком уплотнения практически невозможно.

Самым проблемным диапазоном скоростей является диапазон $M = 2,55...3,8$, когда область оптимального регулирования ВЗ внешнего сжатия очень узкая, а ВЗ смешанного сжатия работает близко к границе маховского отражения скачка от стенки. □

Литература

1. Росляков Г.С. Взаимодействие плоских скачков уплотнения одного направления // Численные методы в газовой динамике. М.:Изд-во Моск. ун-та, 1965. С. 28-51.
2. Росляков Г.С., Старых А.Л., Усков В.Н., 1987. Интерференция стационарных скачков уплотнения одного направления. Изв. АН СССР. МЖГ, №4: С. 143-52.
3. Булат П.В., Упырев В.В., Денисенко П.В. Отражение косого скачка уплотнения от стенки // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Том 15. № 2. С. 338-345.

4. Булат П.В., Денисенко П.В., Продан Н.В. Интерференция встречных скачков уплотнения. // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. - 2015 - Т.15, №2. - 346-55 С.

5. Усков В.Н., Адрианов А.Л., Старых А.Л., Монография. Интерференция Стационарных Газодинамических Разрывов, Новосибирск: ВО "Наука". Сибирская издательская фирма. 1995. С. 180.

6. Усков В.Н., Булат П.В., Продан Н.В. История изучения нерегулярного отражения скачка уплотнения от оси симметрии сверхзвуковой струи с образованием диска Маха. Фундаментальные исследования. 2012. № 9-2. С. 414-420.

7. G. Ben-Dor, M. Ivanov, E.I. Vasilev, T. Elperin. Hysteresis processes in the regular reflection-Mach reflection transition in steady flows / Progress in Aerospace Sciences 38 (2002) 347-387.

8. М.С. Иванов, А.Н. Кудрявцев, С.Б. Никифоров, Д.В. Хотяновский. Переход между регулярным и маховским отражением ударных волн: новые численные и экспериментальные результаты // Аэромеханика и газовая динамика, 2002, №3, С. 73-15.

9. Ivanov M.S., Ben-Dor G., Elperin T., Kudryavtsev A., Khotyanovsky D. Mach number variation induced hysteresis in steady flow shock wave reflections. AIAA 2001; 39(5): 972-4.

10. Ben-Dor G. Shock Wave Reflection Phenomena, 2nd Ed. Springer-Verlag, NewYork, 2007, 342 p.

11. Омельченко А.В., Усков В.Н. Оптимальные догоняющие скачки уплотнения с ограничениями на суммарный угол поворота потока // Прикладная механика и техническая физика. 1999. Т. 40. № 4. С. 99-108. <http://www.sibran.ru/upload/iblock/14b/14ba22327da0493c2737be7e56037ee3.pdf>.

12. Осватич Клаус, Шварценбергер Рудольф. Сборник задач и упражнений по газовой динамике. Перевод с немецкого В.А. Котопова. М. Мир. - 1967. - 271 с.

13. Аэротермодинамика летательных аппаратов в фотографиях // Составитель Г.Ф. Готов. Жуковский, ЦАГИ, 2003. -173 с.

14. Булат П.В., Денисенко П.В. Интерференция скачков уплотнения одного направления // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 3. С. 500-508.

Связь с авторами: pavelbulat@mail.ru



СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ ВЫСТАВКИ

- MetrolExpo
- Control&Diagnostic
- ResMetering
- LabTest
- PromAutomatic

20 мая - Всероссийский съезд метрологов

ВСЕРОССИЙСКИЙ СЪЕЗД МЕТРОЛОГОВ И ПРИБОРОСТРОИТЕЛЕЙ

ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

Консолидация усилий власти, науки и бизнеса в развитии отечественного приборостроения для обеспечения нужд промышленности и оборонного комплекса страны, а также повышение эффективности российской системы измерений, совершенствование нормативной базы метрологии с учетом международных тенденций в целях поддержки инноваций и их продвижения.

ДИРЕКЦИЯ ФОРУМА
 129344, Москва, ул. Искры 31, корп. 1, Технопарк ВДНХ
 Тел./Факс: +7 (495) 937-40-23 (многоканальный)
www.metrolxproprom.ru
 E-mail: metrol@exproprom.ru

XIII МОСКОВСКИЙ МЕЖДУНАРОДНЫЙ ИННОВАЦИОННЫЙ ФОРУМ

ТОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ — ОСНОВА КАЧЕСТВА И БЕЗОПАСНОСТИ

проводится в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации от 5 апреля 2014 г. № 541-р

17-19 мая 2017 г., Москва, ВДНХ, павильон 75, «Россия»

ПРОГРАММА ФОРУМА

-  **METROLEXPO-2017**
Метрология и Измерения
13-я выставка средств измерений, испытательного оборудования и метрологического обеспечения.
-  **CONTROL&DIAGNOSTIC-2017**
Контроль и Диагностика
6-я выставка промышленного оборудования и приборов для технической диагностики и экспертиз.
-  **RESMETERING-2017**
Учёт энергоресурсов
6-я выставка технологического и коммерческого учёта энергоресурсов.
-  **LABTEST-2017**
Лабораторное оборудование
5-я выставка аналитических приборов и лабораторного оборудования промышленного и научного назначения.
-  **PROMAUTOMATIC-2017**
Автоматизация
5-я выставка оборудования и программного обеспечения для производственных процессов.
-  **WEIGHT SALON 2017**
Весовой салон
Выставка весового оборудования.

Организаторы

 МИНПРОМТОРГ РОССИИ

 РОССТАНДАРТ

Поддержка

 ДОПЛАТ ПИИ И НИИ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ РОССИЙСКОЙ АРМИИ

Стратегический партнер

 Роснано

Генеральный спонсор

 KEYSIGHT TECHNOLOGIES

Ключевые партнеры выставки

 Роснано

 Росатом

 КРЭТ

 Росатом

Международные партнеры

 Bureau International des Poids et Mesures

 OIML

 COOMET

Устроитель и выставочный оператор

 Exproprom