

УДК 532.522:533.6.011.55 (575.2) (04)

СИЛОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СТРУЙ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ СО СВЕРХЗВУКОВЫМ ПОТОКОМ

А.К. Тыныбеков – канд. техн. наук

In this article results of researches of interaction of high-temperature streams with supersonic flow are presented.

Развитие авиационной и космической техники в конце 50-х и начале 60-х годов XX в. привело к рождению идеи создания прямоточного воздушно-реактивного двигателя со сверхзвуковым горением, что в значительной степени стимулировало развитие фундаментальных исследований смещения, горения и теплообмена в сверхзвуковых потоках.

Привлекательность схем внешнего горения (рис. 1) заключается в относительной простоте конструкции, потенциальной возможности исключения термического воздействия пламени на аппарат, малой инерционности процесса.

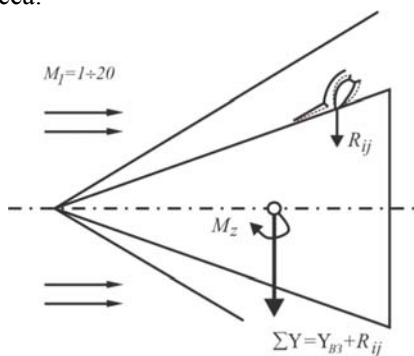


Рис. 1.

Новое направление исследований – горение во внешнем потоке. Одним из наиболее важных аспектов проблемы горения в сверхзвуковом потоке является стабилизация пламени по крайней мере в случаях относительно

низких температур и давлений, когда не обеспечиваются условия самовоспламенения при смешении различного рода топлива с окислителем. Естественным решением этой проблемы является использование рециркуляционных зон, так как в этом случае увеличивается время пребывания реагентов в зоне реакции. Поэтому в случае использования в качестве рабочего тела продуктов неполного сгорания различных твердых топлив в зонах рециркуляции возможно их дальнейшее догорание, что повышает импульс системы в целом.

В настоящей статье представлены результаты исследований отрывных течений с тепломассоподводом. Опыты по сверхзвуковому горению (рис. 1 и 2) [1], проведенные в Институте механики МГУ, показали, что при вдуве струи продуктов сгорания смешанного топлива с поверхности пластины в сверхзвуковой поток в области за отверстием вдува происходит значительное повышение давления (рис. 3). В Институте механики в различные годы были проведены исследования структуры зон отрыва при наличии процессов горения и влияние горения на сопротивление тел в высокоскоростных потоках [1–5].

Первая из названных проблем решает ряд задач, связанных с управлением движением летательным аппаратом посредством вдува на его поверхность струи продуктов сгорания ТТ (твердых топлив). В этом случае наилучшие показатели эффективности будут определяться,

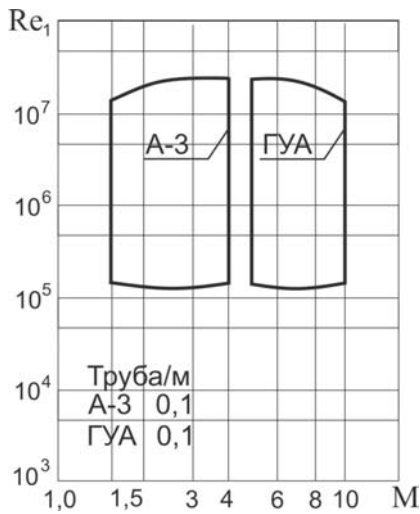


Рис. 2.

в первую очередь, способом организации вдува управляющей струи и природой вдуваемого газа, которая зависит от типа используемого топлива. Ниже приведены основные результаты исследований влияния вдува продуктов сгорания твердых топлив (ТТ) и пиротехнические составы (ПС) на характеристики зоны отрыва распределения давлений в ней и коэффициент усиления (K).

Эксперименты проводили на установке А-3 [1–5] при числе Маха $M_\infty=3$. Рассмотрим наиболее показательные результаты, полученные при исследовании вдува продуктов сгорания топлив различного состава, существенно отличающихся друг от друга физико-химическими и энергетическими характеристиками.

Распределение давлений и величины давлений в области перед струей полностью совпадают с аналогичными величинами при выдуве воздушной поперечной струи в сносящий поток (рис. 2).

При этом наблюдается подобие в положении характерных давлений, если в качестве масштабного параметра взять длину зоны отрыва l_s . Подобие, так же, как и на воздухе, распространяется до углов $\varphi=135\div 140^\circ$ (рис. 3).

Это свидетельствует об автомодельности в картине распределения давлений в зоне отрыва при выдуве различных поперечных струй, включая химически активные [5]. Влияние же конденсированной фазы, состава струи и догорания ее продуктов при взаимодействии с основным потоком сказывается, в первую очередь, на масштабах и форме отрывной зоны.

На рис. 4 показаны схема экспериментальных исследований высокотемпературных струй.

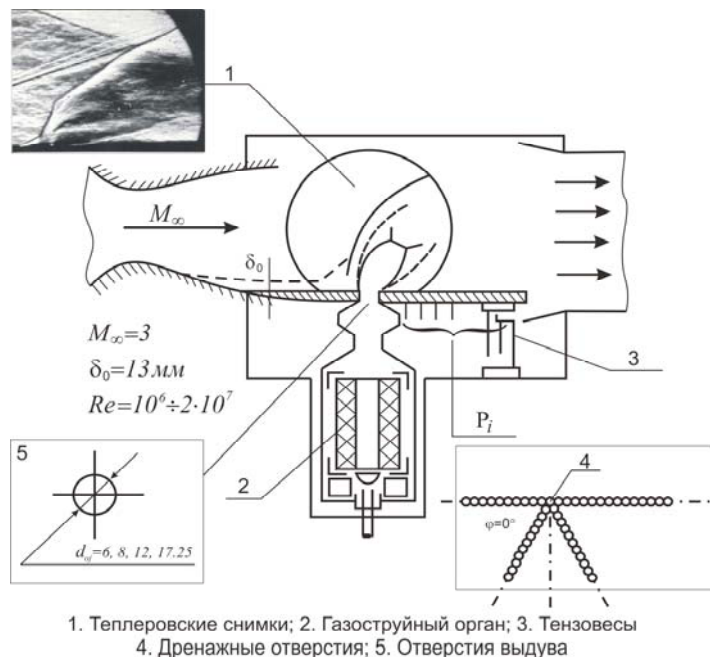


Рис. 3.

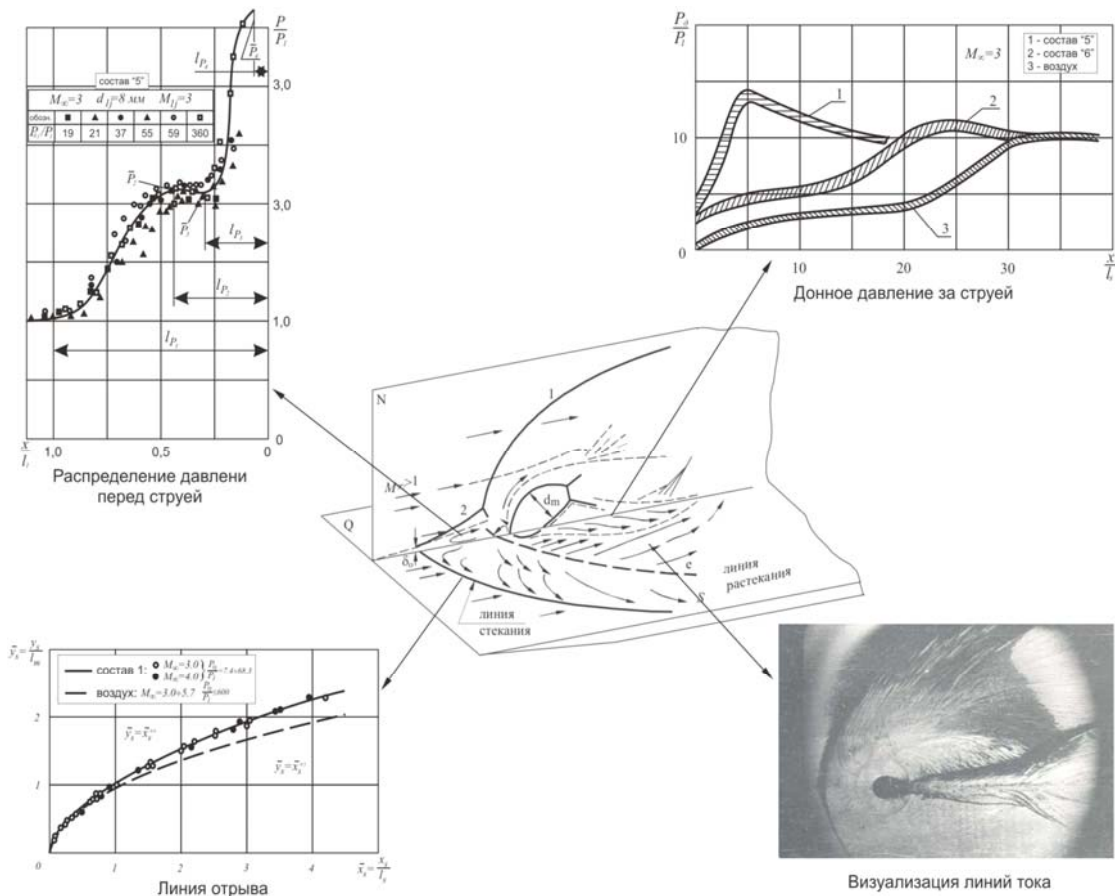


Рис. 4.

При обработке опытных данных влияние содержания конденсированной фазы на относительную длину зоны отрыва устраняется введением условной газовой постоянной смеси $R_{CM} = R_r(1-z)$, где R_r – газовая постоянная газовой смеси; z – относительное содержание твердой и конденсированной фаз в смеси. Обобщение опытных данных о величине зоны отрыва приведено на рис. 5 в виде зависимости:

$$\frac{l_s}{d_{1j}} = \sqrt{\frac{R_r(1-z)}{(RT)_b}} \cdot \frac{P_{oj}}{P_1}$$

Из рис. 4 видно, что экспериментальные точки, относящиеся к продуктам сгорания твердых топлив трех составов, группируются около единой кривой, а результаты экспери-

ментов при выдуве воздуха располагаются на кривой, расположенной ниже. Это позволяет утверждать, что увеличение масштаба l_s связано, в первую очередь, не с характером конденсированной фазы, поступающей в поток, и не с величиной RT , а с составом вдуваемого газа и возможным его догоранием при взаимодействии с кислородом воздуха. Как следует из характеристик топлив, химическая активность продуктов сгорания пиротехнического состава (ПС) и твердого ракетного топлива (ТРТ) значительно отличаются друг от друга. Так, например, в продуктах сгорания ТРТ содержится магний, потенциально способный к догоранию с использованием кислорода внешнего потока, а в продуктах сгорания топлива ПС он отсутствует. Это, в первую очередь, сказывается на распределении давлений за струей (рис. 5).

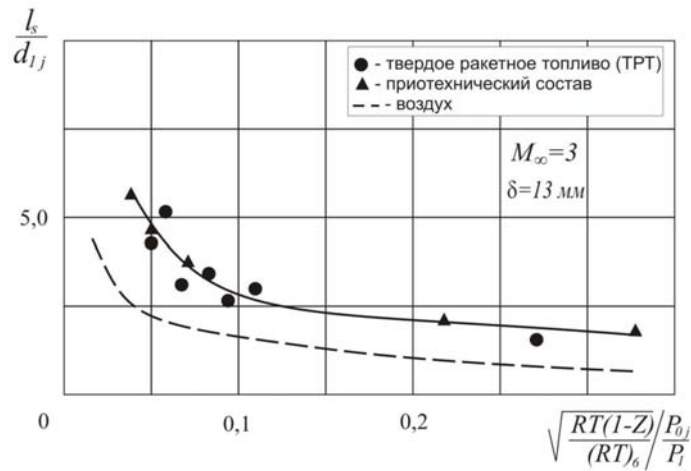


Рис. 5.

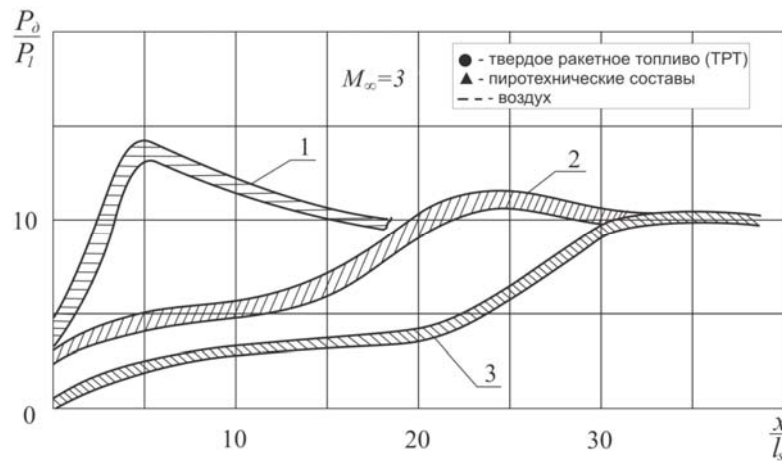


Рис. 6.

Приведенные на рис. 6 распределения давления при $\varphi=180^\circ$ для выдува воздуха и продуктов сгорания ПС и ТРТ четко иллюстрируют это положение.

Для воздуха и состава ПС за выдуваемой струей наблюдается резкое снижение давления, затем незначительный по величине подъем и на расстоянии, равном $(2,0 \div 3,0)l_s$, устанавливается давление, практически равное давлению в невозмущенном потоке P_1 . При выдуве продуктов сгорания ТРТ с расстояния $0,5l_s$ устанавливается давление, превышающее значение P_1 , которое сохраняется до края пластины.

Очевидно, что подготовка смеси в случае выдува продуктов сгорания ПС происходит

быстрее, чем при выдуве продуктов сгорания состава ТРТ, что и находит свое количественное выражение в распределении давления.

В качестве основного показателя эффективности струйного вдува принят коэффициент усиления, определенный по формуле:

$$K_y = 1 + \frac{F}{R},$$

где F – сила, вызванная взаимодействием струи с потоком; R – сила реакции вдуваемой струи.

Опираясь на исследования физических особенностей течения при взаимодействии высокоэнергетических струй с внешним потоком, отметим, что коэффициент усиления нормальной силы зависит от тех же характеристик топлив, что и геометрические размеры зоны отрыва, распределение давлений и т.д.

Полученное существенное различие между K_y при переходе от одного газа к другому свидетельствует о заметном влиянии природы выдуваемого рабочего тела на характер взаимодействия [1–2] (рис. 7, 8).

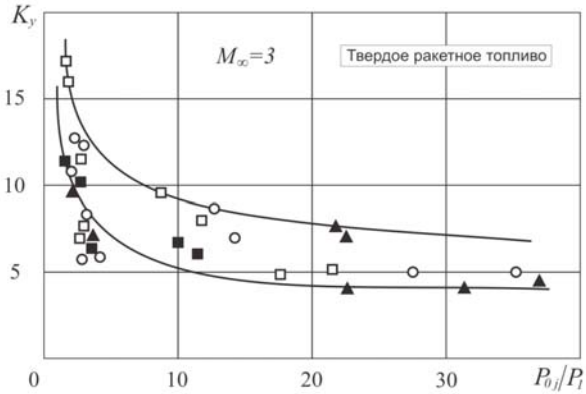


Рис. 7.

На рис. 9 показаны расчетные и экспериментально полученные данные величины коэффициента усиления K от величины нерасчетности n . Величина n рассчитывается как отношение статического давления на среде сопла вдува струи к величине статического давления набегающего потока.

Как видно из рис. 6–9, наибольшая величина коэффициента усиления наблюдается для вдува ТРТ.

В понятие природы взаимодействия струи и потока прежде всего следует включить химический и фазовый составы. Химический состав определяет такие характеристики, как способность к догоранию при взаимодействии

с кислородом воздуха, а фазовый – содержание твердой фазы и ее характер.

Согласно [2], более легкие газы обеспечивают несколько больший коэффициент усиления по сравнению с воздухом. Однако различие значительно меньшее, чем в рассматриваемом случае. Кроме того, перенесение результатов, полученных при выдуве холодных газов на выдув горячих, полностью невозможно, так как здесь могут проявиться такие особенности, как различная теплоемкость и т.д. Поэтому, не исключая возможности влияния и на коэффициент усиления, главное внимание при выдуве продуктов сгорания твердых ракетных топлив следует обратить на способность к догоранию, наличие конденсированной фазы и ее характер.

Горение происходит за пределами пластины и никак не сказывается на давлении за струей и коэффициенте усиления. Некоторый прирост продольного размера зоны отрыва компенсируется снижением отношения ($l_m/l_s=1,1+1,2$), что при сохранении постоянными величин характерных давлений в зоне отрывного течения приводит к значениям K_y , равным полученным на воздухе.

Выводы:

1. При вдуве продуктов сгорания твердого топлива сохраняется ряд закономерностей в геометрической форме и распределении давлений в зоне отрыва, связанные, очевидно, непосредственно с процессом отрыва турбулентного пограничного слоя.

Практически не изменяется форма линии отрыва, величины характерных давлений и их взаимное расположение на пластине.

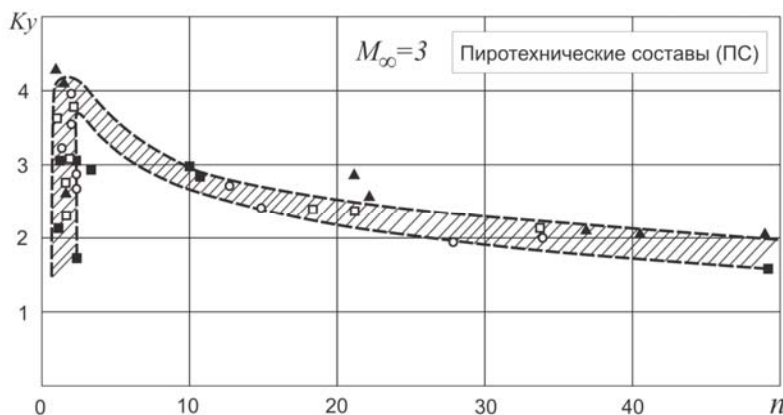


Рис. 8.

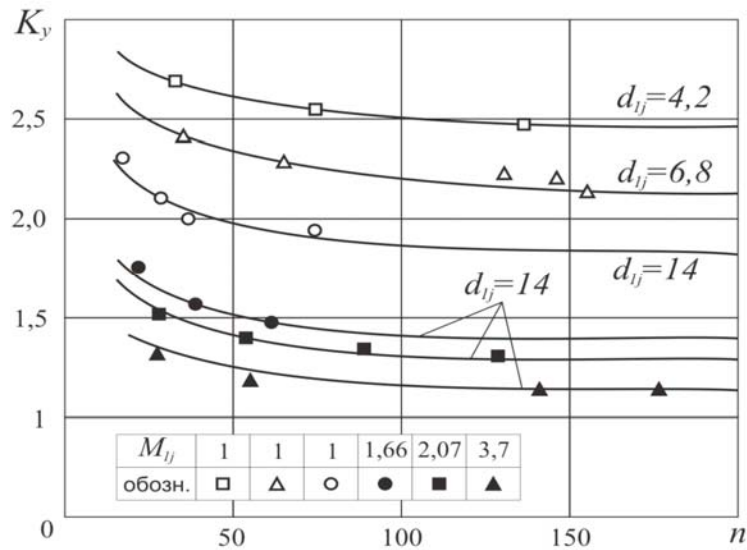


Рис. 9.

2. Влияние химического состава рабочего тела струи, наличие конденсированной фазы и дожигание продуктов струи в воздушном потоке проявляются в существенном изменении масштаба отрывной зоны (в первую очередь, размер l_s) и соотношении размеров $\frac{l_m}{l_s}$.

3. В зоне, расположенной за вдуваемой струей в пределах, ограниченных лучами, идущими из центра отверстия под углом $\pm 120^\circ$, наблюдается заметное отклонение в распределении давлений по сравнению с выдувом инертных струй, что может быть объяснено влиянием догорания вдуваемых продуктов.

При этом способность к догоранию продуктов сгорания различных топлив может быть различной.

4. Качественные и количественные изменения в характере течения в возмущенной области при вдуве химически активных струй в сносящий воздушный поток находят выражение в заметном изменении нормальной силы, возникающей при вдуве и, следовательно, эффективности газоструйных органов управления.

5. Состав рабочего тела оказывает существенное влияние на величину коэффициента усиления K_y при вдуве продуктов сгорания твердых ракетных топлив в сверхзвуковой сносящий воздушный поток.

6. При наличии догорания вдуваемых продуктов у поверхности летательного аппарата могут быть достигнуты значительные по величине коэффициенты усиления и удельные импульсы вдуваемой струи.

7. Величина K_y зависит от фазового состава вдуваемых продуктов и характера твердой фазы, а также от организации вдува.

Литература

1. Аэродинамическая установка Института механики МГУ / Под ред. Г.Г. Черного, А.И. Зубкова, Ю.А. Панова. – М.: Изд-во МГУ, 1985. – С. 3–12.
2. Тыныбеков А.К. Истечение в сверхзвуковой поток высокоэнергетических гетерогенных струй // Наука и новые технологии. – 1998. – №4. – С. 89–95.
3. Тыныбеков А.К. Исследование струйных отрывных течений. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 2007. – 146 с.
4. Тыныбеков А.К., Орозалиев Т.С. Экспериментальные методы исследований сверхзвуковых течений. – Бишкек: Изд-во КРСУ, 2008. – С. 228.
5. Тыныбеков А.К. Реагирующие струи в сверхзвуковом потоке // Наука и новые технологии. – 2008. – №1–2.