

Тыныбеков А.К.

РЕАГИРУЮЩИЕ СТРУИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ

А.К. Тыныбеков

REACTING JETS IN THE SUPERSONIC STREAM

УДК: 532.522: 533.6.011.55

В настоящей работе представлены результаты исследований взаимодействия высокотемпературных струй со сверхзвуковым потоком.

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

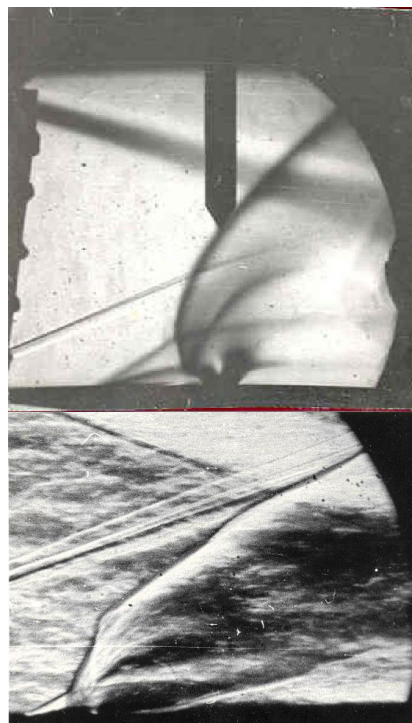
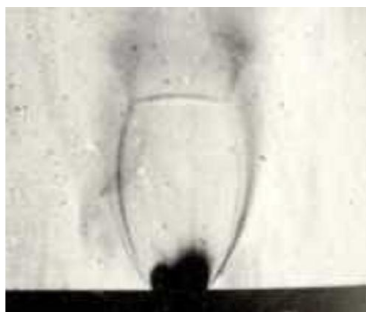
Развитие авиационной и космической техники в конце 50-х и начале 60-х годов привело к рождению идеи создания прямоточного воздушно-реактивного двигателя со сверхзвуковым горением, что в значительной степени стимулировало развитие фундаментальных исследований смещения, горения и теплообмена в сверхзвуковых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

Привлекательность схем внешнего горения заключается в относительной простоте конструкции, потенциальной возможности исключения термического воздействия пламени на аппарат, малая инерционность процесса.

Указанные обстоятельства привели к рождению нового направления исследований - горение во внешнем потоке. Одним из наиболее важных аспектом 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 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) [2-4], 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.2). Это послужило основой для постановки в Институте механики исследований структуры зон отрыва при наличии процессов горения и влияние горения на сопротивление тел в высокоскоростных потоках [2-4].



На рис.2 показаны Теплеровские снимки вдува: а) струи в затопленные пространство, б) не реагирующей струи в сверхзвуковой поток, в) струи с горением в сверхзвуковой поток.

На рис.3 представлены зависимости удельного импульса гетерогенных струй от статического давления вдува [2].

1. “1” – магний МПФ-3 в % по весу 50±3, теплотворная способность 1840 (кал/г), относительное содержания твердой фазы 0,42.

2. “2” – магний МПФ-3 в % по весу 40±3, теплотворная способность 1917 (кал/г), относительное содержания твердой фазы 0,45.

3. “3” – магний МПФ-3 в % по весу 60±3, теплотворная способность 1485 (кал/г), относительное содержания твердой фазы 0,38.

4. “4” – магний МПФ-3 в % по весу 30±3, теплотворная способность 1917 (кал/г), относительное содержания твердой фазы 0,50.

5. “5” – пиротехнический состав с большим отрицательным кислородным балансом и высоким содержанием твердой фазы в продуктах сгорания. $T_0=2100\pm 2300^{\circ}\text{K}$; $\gamma=1,3$; $R=19,6$ кгм/кг·град; $Z=0,61$; продукты сгорания: Mg, Na, NaH, N_2, HN и др.

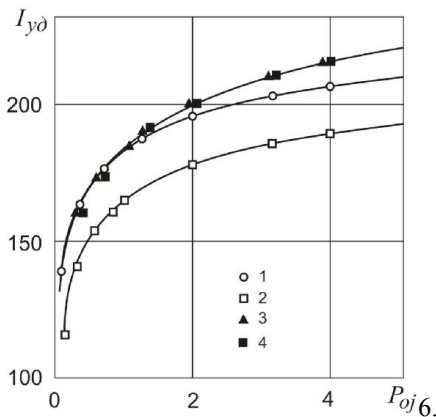


Рис.3. Зависимость интенсивности струи от величины давления вдува

“6” - ракетно-смесевое топливо. Температура горения $T_0=2400^{\circ}\text{K}$ показатель адиабаты $\gamma=1,28$; универсальная газовая постоянная $R=35,4$ кгм/кг·град; содержание конденсированной зоны $Z=0$, продукты сгорания: H, H_2, CO_2, H_2O, CO .

Результаты обработки картин визуализации течения показали (рис.4 а) и 4 б)), что форма линии отрыва, описываемая кривой $\bar{y}_s = f(\bar{x}_s)$, не полностью совпадает с полученной ранее на воздухе и при обтекании цилиндров зависимостью $\bar{y}_s = \sqrt{\bar{x}}$ (где $\bar{y}_s = \frac{y}{l_m}$, $\bar{x}_s = \frac{x}{l_s}$);, хотя отличие в целом незначительное. Отношение характерных размеров и составляет $1,18\pm 1,2$, что существенно отличается

от данных, полученных при вдуве воздуха - $\frac{l_m}{l_s} = 1,8\pm 2,0$.

Распределение давлений и величины давлений в области перед струей полностью совпадают с аналогичными величинами при выдуве воздушной поперечной струи в сносящий поток (рис.5).

При этом наблюдается подобие в положении характерных давлений, если в качестве масштабного параметра взять длину зоны отрыва (рис.6). Подобие, так же как и на воздухе, распространяется до углов.

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

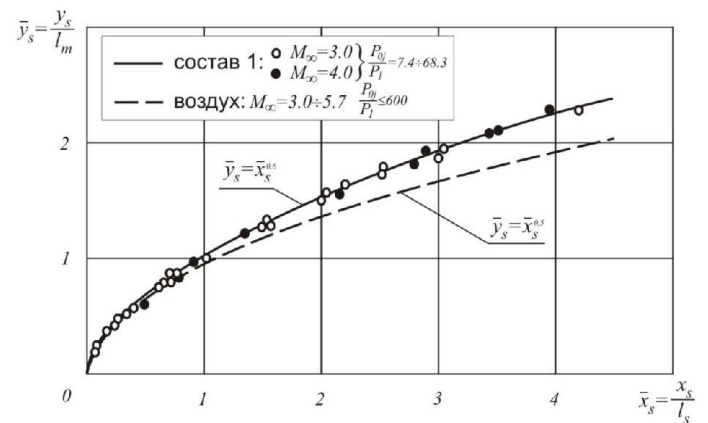
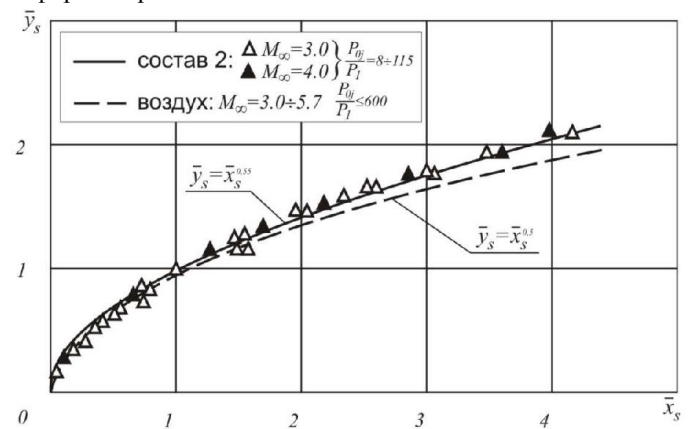


Рис.5. Распределение давления плоскости симметрии перед струей продуктов сгорания состава “5”.

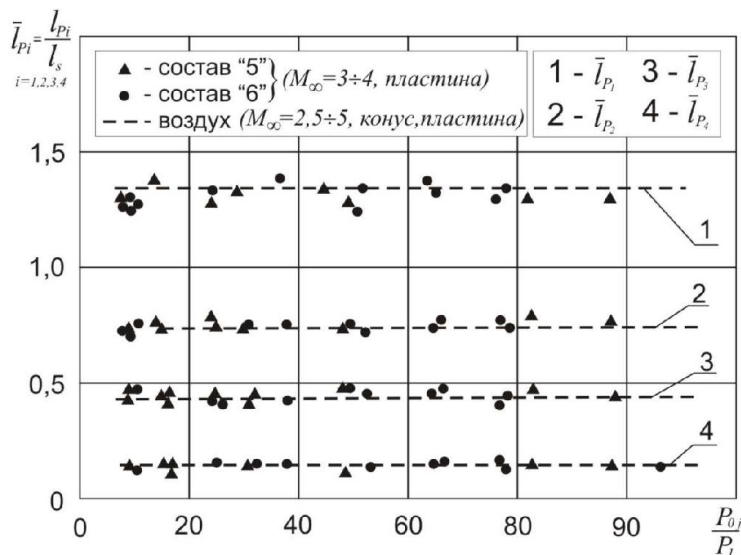


Рис.6. Изменение координат характерных давлений.

Изменение продольного размера представлено на графике рис.7. Вид кривых свидетельствует о зависимости $\frac{l_s}{d_j}$ от $\frac{P_{0j}}{P_1}$ близкой к известной зависимости: $\frac{l_s}{d_j} = K \left(\frac{P_{0j}}{P_1} \right)^{0,5}$

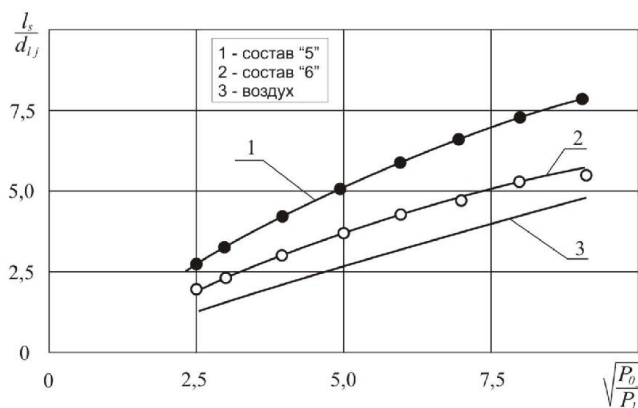


Рис.7. Изменение длины зоны отрыва при $M=3,0$.

Коэффициент пропорциональности "К" зависит от характера вдуваемых продуктов, причем максимален для состава "5" (1,2÷1,0) и минимален для вдува воздуха (0,55÷0,5) (рис.8).

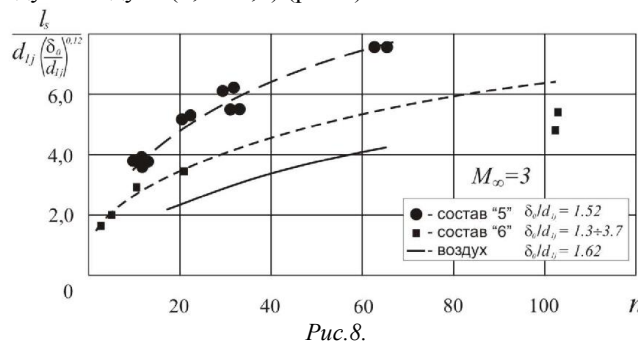


Рис.8.

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 z - газовая

постоянная газовой смеси; z - относительное содержание твердой и конденсированной фаз в смеси. Обобщение опытных данных о величине зоны отрыва приведена на рис.9 в виде зависимости

$$\frac{l_s}{d_j} = \sqrt{\frac{R_r(1-z)}{(RT)_b}} \frac{P_{0j}}{P_1}$$

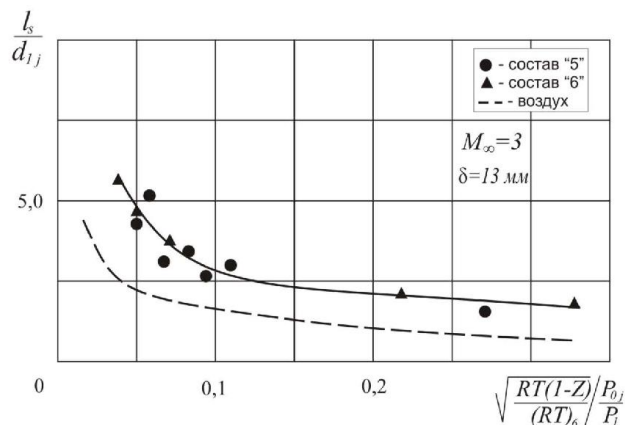


Рис.9. Зависимость относительной длины зоны отрыва от обобщающего параметра.

Из графика видно, что экспериментальные точки, относящиеся к продуктам сгорания твердых топлив трех составов, группируются около единой кривой, а результаты экспериментов при выдуве воздуха располагаются на кривой, расположенной ниже. Это позволяет утверждать, что увеличение масштаба 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 составов "6" и "5" значительно отличаются друг от друга. Так, например, в продуктах сгорания "5" содержится магний потенциально способный к догоранию с использованием кислорода внешнего потока, а в продук-

тах сгорания топлива "6" он отсутствует. Это, в первую очередь, сказывается на распределении давлений за струей.

Приведенные на рис.10 распределения давления при выдуве воздуха и продуктов сгорания твердых топлив 6 и 5 четко иллюстрируют это положение.

Для воздуха и состава "6" за выдуваемой струей наблюдается резкое снижение давления, затем незначительный по величине подъем и на расстоянии, равном (2,0÷3,0), устанавливается давление, практически равное давлению в невозмущенном потоке P_1 . При выдуве продуктов сгорания "5" с расстояния 0,5 устанавливается давление, превышающее значение P_1 которое сохраняется до края пластины.

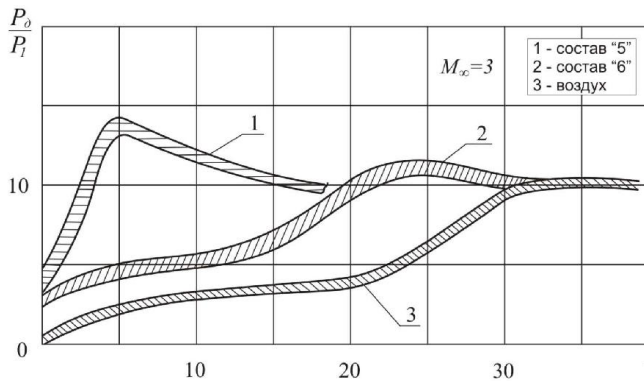


Рис.10. Распределение давления за струей.

Очевидно, что подготовка смеси и ее до в случае выдува продуктов сгорания "5" происходит быстрее, чем при выдуве продуктов сгорания состава "6", 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.

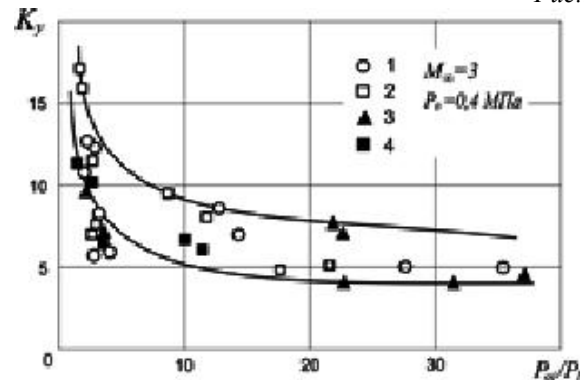
Полученное существенное различие между K_y при переходе от одного газа к другому свидетельствует о заметном влиянии природы выдуваемого рабочего тела на характер взаимодействия (рис.11) [2-4].

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 состав определяется содержанием твердой фазы и ее характером.

Согласно [2-4] более легкие газы обеспечивают несколько больший коэффициент усиления по сравнению с воздухом. Однако различие значительно меньше, чем в рассматриваемом случае. Кроме того,

перенесение результатов, полученных при выдуве холодных газов на выдув горячих, полностью невозможно, т.к. 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.

Рис.1.



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.

В связи с этим, не вдаваясь в подробности исследований, основные полученные результаты отмечены в выводах по этому разделу исследований.

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.

2. Влияния химического состава рабочего тела струи, наличия конденсированной фазы и дожигания продуктов струи в воздушном потоке проявляется 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 сносный 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_u 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_u зависит от фазового состава вдуваемых продуктов и характера твердой фазы, а также от организации вдува.

Литература:

1. Аэродинамическое устройство Института механики МГУ. Под ред. Черного Г.Г., Зубкова А.И., Панова Ю.А. Изд-во МГУ, 1985, с.3-12.
2. Глаголев А.И., Зеленцев В.В., Зубков И.А., Каллистов В.А., Чумаков Е.Я. Статья. Научный журнал. 1978, № 4, с.4-6.
3. Глаголев А.И., Зеленцев В.В., Зубков И.А., Каллистов В.А., Чумаков Е.Я. Статья. Научный журнал. 1978, № 5, с.32-35.
4. Тыныбеков А.К. Истечение в сверхзвуковой поток высокоэнергетических гетерогенных струй. Наука и новые технологии, № 4, 1998, с.89-95.
5. Тыныбеков А.К. Исследование струйных отрывных течений. Бишкек, Изд-во Кыргызско-Российского Славянского университета, 2007, 146 стр.
6. Тыныбеков А.К., Орозалиев Т.С. Экспериментальные методы исследований сверхзвуковых течений. Бишкек. Изд-во КРСУ, 2008, с. 228.