

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАМИНАРНОГО ИСТЕЧЕНИЯ СЖАТОГО ВОЗДУХА В АТМОСФЕРУ И ПРИЛОЖЕНИЕ ЕГО РЕЗУЛЬТАТОВ К ПРОЕКТАМ НЕТРАДИЦИОННЫХ – ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

Володько Ю. И.

1.

Известны исследования истечения сжатого газа через отверстие (щель) в среду с тем же газом при меньшем давлении (например – [1]). В этих исследованиях наибольшее внимание обычно уделяется важным для практики режимам течения со скоростью, близкой к скорости звука, или большей её. Развитие струйной техники [2] обусловило интерес и к истечению воздуха с относительно малыми скоростями, в частности, – к ламинарным режимам истечения. Поиск новых возможностей создания тяги и подъёмной силы [3, 4] и, возможно, альтернативного способа получения механической энергии [5] сосредоточил этот интерес на ламинарном истечении сжатого воздуха в атмосферу. Последнее, однако, изучено только теоретически [3], а соответствующий экспериментальный материал, по-видимому, почти отсутствует.

Выполнено экспериментальное исследование по определению тяги сопла и расхода через сопло при ламинарном истечении сжатого воздуха в атмосферу. Схема эксперимента (рис. 1) в основных чертах аналогична описанной ранее [3]. Тем не менее, необходимо более подробно остановиться на некоторых методических вопросах, которые могут существенно повлиять на выводы из данного исследования и на возможности использования его результатов.

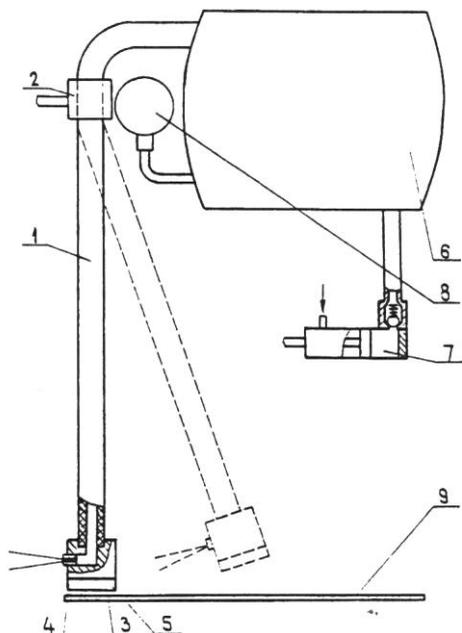


Рис. 1. Схема эксперимента

Гибкая толстостенная трубка 1 из синтетического материала подвешена так, что один из её концов длиной 737 ± 2 мм (от подвеса 2) свободно висит по вертикали. Нижний конец трубки имеет наконечник 3 с соплом 4 и грузом 5. Струя воздуха из отверстия сопла направлена горизонтально. Второй конец трубки герметично присоединён к ресиверу 6 объёмом $20 \pm 0,4$ л. Сжатый воздух периодически подают в ресивер насосом 7. Избыточное давление воздуха в ресивере измеряют образцовым манометром 8 марки МО с диапазоном измеряемых давлений $0-1,6$ кгс/см² и классом точности 0,4.

В дополнительном эксперименте определено падение давления на трубках, подводящих сжатый воздух к соплу, в зависимости от расхода воздуха. Эксперимент выполнялся на этой же экспериментальной установке при отсутствии сопла. Избыточное давление сжатого воздуха на входе в сопло (в основном эксперименте) определяют по формуле:

$$P_{\text{изб}}^{\text{щ}}(V) = P_{\text{изб}}^{\text{pec}}(V) - \Delta P_{\text{труб}}(V), \quad (1)$$

где:

$P_{\text{изб}}^{\text{pec}}(V)$ – избыточное давление воздуха в ресивере, $\text{кгс}/\text{см}^2$, соответствующее измеренному расходу воздуха в основном эксперименте, равному V ;

$\Delta P_{\text{труб}}(V)$ – падение давления на трубках, подводящих воздух к соплу, $\text{кгс}/\text{см}^2$, определённое в дополнительном эксперименте и соответствующее тому же расходу;

V – объёмный расход воздуха, норм, $\text{мл}/\text{с}$;

$P_{\text{изб}}(V)$ – избыточное давление воздуха на входе в сопло (щель), $\text{кгс}/\text{см}^2$.

В эксперименте также измеряют расход воздуха через сопло объёмным методом с помощью тонкостенного ($0,2 \div 0,3 \text{ мм}$) резинового мешка, открытой стороной надеваемого на сопло и при подаче воздуха принимающего форму, близкую к цилиндрической, и секундомера марки «Агат» (цена деления $0,2 \text{ сек}$). Объём мешка, наполненного воздухом, рассчитывают по его размерам, определённым с помощью мерительного инструмента. При каждом измерении расхода воздуха и тяги сопла фиксировалась температура воздуха вблизи ресивера по термометру с погрешностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$ и атмосферное давление по барометру марки БАММ-1 с диапазоном измеряемого давления $80\text{--}106 \text{ кПа}$ и основной допускаемой погрешностью $\pm 0,2 \text{ кПа}$. Для фиксированного объёма ресивера вместе с соединительными трубками и манометром получена зависимость расхода воздуха через сопло от скорости изменения давления воздуха в ресивере. Из этой зависимости вычислено отношение расхода воздуха к скорости изменения давления в ресивере, равное $(0,124 \pm 0,026) \cdot 10^{-6} (\text{кгс}/\text{с})/(\text{Па}/\text{с})$, или то же самое в единицах объёма: $0,0960 \pm 0,0198$ (норм, $\text{мл}/\text{с})/(\text{Па}/\text{с})$. Предельная относительная грешность измерения расхода воздуха не превышает $\pm 25\%$.

Ввиду того, что определение избыточного давления $P_{\text{изб}}^{\text{щ}}$ сжатого воздуха на входе в сопло по формуле (1) включает в себя измерение расхода воздуха (кроме малых расходов, когда $\Delta P_{\text{труб}} \ll P_{\text{изб}}^{\text{pec}}$), то предельная относительная погрешность нередко довольно велика и

лежит в пределах от $\pm 1\%$ (при малых расходах) – примерно до $\pm 60\%$. Все указанные в тексте предельные погрешности соответствуют 3σ , где σ есть *среднее квадратическое отклонение* единичного измерения, кроме случаев, когда указана доверительная вероятность. Показанные на рисунках для некоторых экспериментальных точек предельные погрешности единичного измерения также соответствуют 3σ .

Известно [6], что тяга реактивного сопла состоит из собственно реактивной силы, определяемой отбрасыванием назад (в направлении, обратном движению летательного аппарата) определённой массы газа с определённой скоростью, и силы статического давления, определяемой избыточным давлением на срезе сопла и площадью последнего:

$$\hat{T} = G \cdot (U - U_{\text{дв}}) + (P - P_{\text{атм}}) \cdot S, \quad (2)$$

где:

G – массовый расход истекающего газа, *кг/с*;

U – скорость истечения газа, *м/с*;

$U_{\text{дв}}$ – скорость движения летательного аппарата, *м/с*;

P – абсолютное давление на срезе сопла, *Па*;

$P_{\text{атм}}$ – атмосферное давление, *Па*;

S – поперечное сечение отверстия сопла, *м²*;

\hat{T} – тяга сопла, *Н*.

В описываемом эксперименте тягу сопла (отклоняющую силу) определяют с предельной относительной погрешностью от $\pm 3\%$ до $\pm 14\%$ по отклонению наконечника с соплом и грузом, измеряемому по линейке 9. При этом используют результаты предварительной градуировки, выполненной с применением нити, чашечки и разновесов от лабораторных весов. При такой методике эксперимента непосредственно разделить силу статического давления и реактивную силу невозможно. Однако, оценка реактивной силы по измеренному расходу воздуха в соответствии с (2) показывает, что реактивная сила не превышает 10–30% всей измеренной тяги при скорости воздуха в щели до 100–150 *м/с*.

Испытано 45 сопел, каждое из которых представляет собой плоскую щель. Исследовано истечение сжатого воздуха через щели с зазором от 8 до 133 *мкм*. Длина пути, проходимого воздухом в зазоре, измеренная в направлении движения воздуха, в различных соплах

составляла от 0,2 до 62 мм. Выбор указанных диапазонов по величине зазора и длине пути воздуха станет ясен ниже при анализе результатов эксперимента. Размеры сопел определены с помощью мерительного инструмента. Наиболее сложным и ответственным является измерение зазора щели, поскольку величина зазора является определяющей для процесса истечения, и здесь важен не только зазор «в свету», определяемый оптическими методами, а средний зазор по всей длине и ширине щели. Все сопла выбраны такими, чтобы зазор щели был много меньше ширины щели в направлении, перпендикулярном потоку воздуха (в 75–1600 раз). Длина пути воздуха в щели превышает её зазор в 2–1200 раз. Зазор измеряют с предельной погрешностью ± 5 мкм с помощью набора фольг-щупов, причём толщину этих фольг определяют заранее многократным измерением с помощью микрометра. Диапазон измерений микрометра 0–25 мм, цена деления на барабане 10 мкм, класс точности 2,0.

2.

Для каждого сопла, характеризуемого своим зазором h и длиной пути l , проходимого воздухом в щели, получена зависимость объёмного расхода воздуха через сопло-щель от избыточного давления на входе в щель $P_{изб}^{из}$. Такая типичная характеристика «напор-расход» представлена на рис. 2а. Размеры щели здесь и далее по тексту указаны на рисунках. Расход воздуха на рис. 2а отнесён на погонный метр ширины щели. Экспериментальные результаты обработаны статистически по методу наименьших квадратов (МНК). Расход воздуха при увеличении $P_{изб}^{из}$ возрастает сначала быстро, а затем несколько медленнее. До $P_{изб}^{из} = 0,1 \text{ кгс/см}^2$ режим течения, по-видимому, только устанавливается, а при больших $P_{изб}^{из}$ – стабилизируется.

Рассчитана аналогичная характеристика при $P_{изб}^{из} > 0,1 \text{ кгс/см}^2$ с использованием теоретически полученного выражения [7] для расхода газа через сопло произвольной формы. Согласие теоретических и экспериментальных результатов вполне удовлетворительное. Расхождение по расходу воздуха лежит в пределах от 3 до 27 %, то есть практически в пределах ошибок измерений. Расчёты с использованием

теоретической модели из [1] дают величины расходов в 4–5 раз ниже полученных экспериментально.

Из рис. 2а очевидно, что характеристика «напор-расход» состоит из двух линейных участков. Переход от левого участка к правому соответствует примерно $P_{изб}^{III} = 0,09 \text{ кгс/см}^2$. Для правого участка, например, выборочный коэффициент корреляции, вычисленный по координатам экспериментальных точек, составляет около 0,96, чем подтверждается линейный характер зависимости. Если продлить правую прямую до пересечения с осью абсцисс, то отрезок ОА определяет некоторое дополнительное избыточное давление $\hat{P}_{изб}$, сумма которого с $P_{изб}^{III}$ (при значениях последнего больше $0,09 \text{ кгс/см}^2$) создаёт расход воздуха в щели. Для данного сопла $\hat{P}_{изб} = 0,146 \pm 0,060 \text{ кгс/см}^2$. Аналогичную форму имеют характеристики «напор-расход» для всех остальных испытанных сопел.

На рис. 2б показана зависимость тяги сопла от $P_{изб}^{III}$. Тяга сопла-щели также отнесена на погонный метр ширины щели. Результаты также обработаны по МНК. Тяга сопла при увеличении $P_{изб}^{III}$ возрастает, достигая при $P_{изб}^{III} = 0,5 \text{ кгс/см}^2$ величины около $1,7 \text{ кгс/пог.м}$. Характеристика «напор-тяга» состоит из двух приблизительно линейных участков, причём переход от левого к правому участку происходит примерно при $P_{изб}^{III} = 0,35 \text{ кгс/см}^2$.

Для 15 сопел-щелей, для которых отношение длины щели к её зазору l/h не превышает 40, то есть для тех щелей, где гидравлическое падение давления внутри щели мало по сравнению с $P_{изб}^{III}$, построена зависимость избыточного статического давления на срезе сопла $(\hat{T} - \hat{T}_{реакт})/S$, где \hat{T} и $\hat{T}_{реакт}$ – соответственно, полная и реактивная тяга сопла-щели, а S – сечение щели, от суммы $P_{изб}^{III} + \hat{P}_{изб}$. Эта зависимость оказалась близкой к прямой пропорциональной зависимости. Следовательно, указанная сумма давлений определяет не только расход воздуха, но и тягу сопла, во всяком случае – ту часть тяги, которая определяется избыточным статическим давлением на срезе сопла.

Если разделить расход воздуха V через щель на её тягу \hat{T} для каждого значения $P_{изб}^{III}$, то может быть получен объёмный расход воздуха, необходимый для создания тяги, например, в 1 мс , при

заданном $P_{изб}^{III}$ для щели с данными размерами (рис. 2в). Как видно из рисунка, частное V/\hat{T} от такого деления плавно убывает с возрастанием $P_{изб}^{III}$. Например, при $P_{изб}^{III} = 0,1 \text{ кгс/см}^2$ такой расход воздуха составляет для данной щели (см. рисунок) $27 \text{ (норм. м}^3/\text{с)}/\text{мс}$, а при $P_{изб}^{III} = 0,5 \text{ кгс/см}^2$ – около $16 \text{ (норм. м}^3/\text{с)}/\text{мс}$.

Рассчитана для каждого измеренного значения $P_{изб}^{III}$ степень сжатия воздуха, равная $(P_{изб}^{III} + P_{атм})/P_{атм}$, где $P_{атм}$ измеренное атмосферное давление, а также – соответствующая теоретическая работа изотермического сжатия воздуха [7] по формуле:

$$W_{сж} = \frac{R \cdot T}{\mu} \cdot G \cdot \ln \frac{P_{изб}^{III} + P_{атм}}{P_{атм}}, \quad (3)$$

где:

R – универсальная газовая постоянная, Дж/(К·кмоль);

T – абсолютная температура воздуха в ресивере, К;

G – массовый расход воздуха, кг/с;

$W_{сж}$ – теоретическая работа изотермического сжатия воздуха, Вт.

Рассчитана также соответствующая теоретическая работа адиабатического сжатия воздуха [7], которая, однако, при степени сжатия $1,05 \div 1,5$ выше аналогичной величины для изотермического сжатия не более, чем на 6%. Разделив полученную теоретическую работу изотермического сжатия воздуха на тягу, получаем механическую мощность, которую нужно затратить на сжатие воздуха, чтобы создать тягу, например, в 1 мс . Вопрос о коэффициенте полезного действия компрессора, в котором осуществляется сжатие воздуха, будет рассмотрен ниже.

Механическая мощность, необходимая для создания тяги (или подъёмной силы) в 1 мс довольно быстро возрастает с увеличением $P_{изб}^{III}$ (см. рис. 2г). Так, например, при $P_{изб}^{III} = 0,1 \text{ кгс/см}^2$ для создания тяги в 1 мс необходимо затратить механическую мощность 260 кВт/мс , а при $P_{изб}^{III} = 0,5 \text{ кгс/см}^2$ – 690 кВт/мс (без учёта КПД компрессора).

Данные по величинам V/\hat{T} и $W_{сж}/\hat{T}$ также обработаны по МНК. Кривые на рис. 2 (а, б, в, г) соответствуют полученным по МНК

эмпирическим формулам. Рассчитаны также доверительные пределы при двусторонней вероятности 0,98, показанные на рисунках.

В табл. 1 сопоставлены характеристики самолёта и вертолёта [8] с характеристиками нетрадиционного летательного аппарата, принцип полёта которого основан на исследованных свойствах ламинарного истечения сжатого воздуха в атмосферу. Из табл. 1 видно, что механическая мощность, необходимая для создания тяги (или подъёмной силы) в 1 *мс*, есть величина одного порядка для трёх перечисленных летательных аппаратов.

Если разделить поперечное сечение внутреннего канала сопла S на его измеренную тягу \hat{T} для каждого значения $P_{изб}^{III}$, то получим площадь несущей поверхности S/\hat{T} , необходимую для создания тяги, например, в 1 *мс*. На рис. 3а представлена зависимость S/\hat{T} от $P_{изб}^{III}$.

С увеличением $P_{изб}^{III}$ величина S/\hat{T} резко уменьшается при малых $P_{изб}^{III}$, а затем убывает более медленно. При $P_{изб}^{III} = 0,1 \text{ кгс/см}^2$ для щели с указанными на рисунке размерами эта величина составляет $0,25 \text{ м}^2/\text{мс}$, а при $0,5 \text{ кгс/см} - 0,06 \text{ м}^2/\text{мс}$. Экспериментальные данные по величине S/\hat{T} обработаны по МНК, и кривая на рис. 3а соответствует полученной эмпирической формуле. Рассчитаны также доверительные пределы при двусторонней доверительной вероятности 0,98, показанные на рисунке.

Разумеется, несущая поверхность не может состоять из одних воздушных струй. Приняв, что общая площадь несущей поверхности примерно в три раза больше, чем совокупное поперечное сечение воздушных струй (с точки зрения конструкции это разумная величина), получаем, что при $P_{изб}^{III} = 0,1 \text{ кгс/см}^2$ полная несущая поверхность составляет $0,75 \text{ м}^2/\text{мс}$, а при $0,5 \text{ кгс/см} - 0,18 \text{ м}^2/\text{мс}$.

В табл. 1 эти величины сопоставлены с соответствующими величинами для самолёта и вертолёта [8]. Из таблицы очевидно, что для упомянутого нетрадиционного летательного аппарата, по своему назначению, функциям, возможностям и некоторым характеристикам близкого к вертолёту, несущая поверхность, по крайней мере, в 30–130 раз меньше, чем у последнего, при одинаковой подъёмной силе.

Подобное преимущество нетрадиционного летательного аппарата связано с тем, что для него подъёмная сила возникает, в основном, не

за счёт отбрасывания вниз определённой массы воздуха с определённой скоростью (первый член в правой части равенства (1)), а за счёт статического избыточного давления на срезе сопла (второй член в этом равенстве).

По-существу, предлагается новый принцип полёта.

Отсюда вытекает возможность создания летательного аппарата с размерами в плане, лишь незначительно превышающими размеры его пассажирской или грузовой кабины, то есть что-то подобное «летающему автомобилю», способному двигаться на различных высотах, в том числе у самой поверхности земли (или воды), с различными скоростями, в том числе и медленно (или зависать неподвижно) и не только на открытых пространствах, но и в лесу, в горах и, возможно, даже в городе.

Описанные выше характеристики сопел-щелей относятся преимущественно к щели с размерами: зазором 102 *мкм* и длиной 0,8 *мм*. Кроме этого сопла испытано ещё 44 сопла-щели, диапазоны размеров которых указаны выше. Получены основные характеристики сопел при различных зазорах сопла и длинах сопла. Привести их в данной статье полностью не представляется возможным, поэтому ограничимся тремя важнейшими, на наш взгляд, характеристиками, каждая из которых отнесена на 1 *тс* тяги:

- объёмным расходом воздуха;
- механической мощностью привода компрессора;
- несущей поверхностью (совокупным поперечным сечением воздушных струй).

Зависимости этих трёх величин от зазора сопла-щели h при неизменной длине сопла $l = 0,8$ *мм* и от длины l при неизменном зазоре $h = 102$ *мкм* представлены на рис. 3б, 3в и рис. 4.

Что касается первых двух из перечисленных величин, то, как видно из рис.4а, эти величины в диапазоне $h = 50 \div 110$ *мкм* изменяются незначительно, однако, имеется тенденция к резкому их увеличению при $h = 16 \div 20$ *мкм* и незначительному увеличению при $h = 115$ *мкм* и $h = 133$ *мкм*. Кривая расхода на 1 *тс* тяги при $P_{изб}^{щ} = 0,1$ *кгс/см²* лежит выше, чем соответствующая кривая при $P_{изб}^{щ} = 0,5$ *кгс/см²*, а для кривых механической мощности привода на 1 *тс* тяги – наоборот.

Несущая поверхность изменяется примерно так же (рис. 3б), её кривая при $P_{\text{изб}}^{\text{III}} = 0,1 \text{ кгс/см}^2$ лежит выше, чем кривая при $P_{\text{изб}}^{\text{III}} = 0,5 \text{ кгс/см}^2$.

При неизменном зазоре, равном 102 мкм , все три перечисленные величины возрастают с увеличением длины сопла довольно медленно в диапазоне $l = 0,2 \div 6 \text{ мм}$ и гораздо быстрее при $l = 64 \div 60 \text{ мм}$. В последнем случае разброс экспериментальных точек гораздо более заметен (рис. 3в и рис. 4б).

Учитывая, что длины щелей $0,2 \div 0,5 \text{ мм}$ конструктивно довольно трудны в реализации, целесообразно для получения максимальной тяги при наименьших возможных – расходе воздуха и механической мощности привода выбрать зазор сопла-щели в пределах $50 \div 100 \text{ мкм}$, а длину щели в пределах $0,8 \div 1 \text{ мм}$. При этом случайные конструктивные и технологические отклонения h и l от выбранных величин не вызовут, по-видимому, резких скачков тяги, расхода воздуха и потребной механической мощности привода.

В эксперименте не подтвердилась предполагавшаяся ранее [3] возможность сократить расход до малых величин путём увеличения длины l пути, проходимого воздухом во внутреннем канале сопла, причём так, чтобы избыточное статическое давление на срезе сопла оставалось почти неизменным. Во-первых, с увеличением длины l сопла довольно быстро убывает указанное избыточное статическое давление, а, во-вторых, при длине сопла более $1 \div 2 \text{ мм}$ расход воздуха через сопло не вполне подчиняется формуле Пуазейля [9], и расход убывает много медленнее, чем растёт длина l сопла.

Для того, чтобы получить общее представление об изменении отнесённых на 1 тс тяги объёмного расхода воздуха, механической мощности привода и несущей поверхности в зависимости от избыточного давления на входе в щель, от её зазора и от длины щели (то есть от пути, проходимого воздухом во внутреннем канале сопла-щели), получены следующие эмпирические формулы:

$$V/\hat{T} = 46,1 \cdot l^{0,107} \cdot \exp(-0,00317 \cdot h) \cdot \exp(1,31 \cdot P_{\text{изб}}^{\text{III}}) \quad (4)$$

$$W_{\text{сж}}/\hat{T} = -2,65 \cdot h + 90,5 \cdot \ln l + 847 \cdot P_{\text{изб}}^{\text{III}} + 578 \quad (5)$$

$$S/\hat{T} = (0,00303 \cdot h - 0,351 \cdot \ln l + 4,23 \cdot P_{\text{изб}}^{\text{III}} + 1,22)^{-2} \quad (6)$$

где:

$P_{изб}^{изб}$ – избыточное давление воздуха на входе в щель, *кгс/см*;

h – зазор щели, *мкм*;

l – длина щели, *мм*;

V/\hat{T} – объёмный расход воздуха, отнесённый на 1 *мс* тяги, (*норм. м³/с*)/*мс*;

$W_{сж}/\hat{T}$ – механическая мощность привода, необходимая для изотермического сжатия воздуха, отнесённая на 1 *мс* тяги, *кВт/мс*;

S/\hat{T} – несущая поверхность (совокупное поперечное сечение струй воздуха), отнесённая на 1 *мс* тяга, *м²/мс*.

Эмпирические формулы получены совместной обработкой экспериментальных данных по 32 соплам в координатах $P_{изб}^{изб}$, h , $\ln l$ и четвёртая координата, одна из следующих трёх: $\ln(V/\hat{T})$, $W_{сж}/\hat{T}$, $(S/\hat{T})^{-0.5}$ по методу наименьших квадратов для совокупности 157 четырёхмерных экспериментальных точек. Рассчитаны доверительные пределы при двусторонней доверительной вероятности 0,98, которые соответствуют изменению объёмного расхода воздуха и механической мощности в 1,6 раза, а несущей поверхности – в 3,6 раза в большую или меньшую сторону. Формулы (4) – (6) позволяют приблизительно оценить отнесённые на 1 *мс* тяги расход воздуха, потребную механическую мощность привода и несущую поверхность (совокупное поперечное сечение воздушных струй) при различных значениях избыточного давления воздуха на входе в щель, зазора и длины щели в практически приемлемых диапазонах по избыточному давлению на входе в щель $0,10 \div 0,75$ *кгс/см²*, по зазору щели $15 \div 135$ *мкм*, по длине щели $0,2 \div 62$ *мм*.

Любопытная особенность полученных экспериментальных данных, отмеченная и ранее [3], состоит в том, что если разделить тягу \hat{T} сопла на поперечное сечение его внутреннего канала (площадь сопла S), то полученное частное, имеющее размерность давления, которое условно можно назвать «эффективным давлением», превышает в два–три (а иногда и больше) раза избыточное давление в ресивере. Однако, давление на срезе сопла меньше давления в ресивере, иначе направление движения воздуха было бы от сопла к ресиверу. Остаётся предположить, что площадь основания области

сжатого воздуха на плоском срезе сопла больше площади отверстия сопла. Этим подтверждается существование поперечного растекания сжатого воздуха по плоскому срезу сопла до падения давления воздуха до атмосферного. Растекание сжатого воздуха по срезу сопла теоретически рассмотрено в работе [3].

Другой возможной причиной аномально высокой величины «эффективного давления», возможно, является наличие дополнительного избыточного давления $\hat{P}_{изб}$ (см. рис.2а). Как это обосновано в [3], эффект растекания сжатого воздуха по срезу сопла обязан своим появлением **охлаждению** струи воздуха при скачкообразном падении в ней давления и, соответственно, преобразованию части внутренней тепловой энергии воздуха в механическую энергию. По-видимому, следствием того же охлаждения является и возникновение дополнительного избыточного давления $\hat{P}_{изб}$.

На рис.5а показана зависимость экспериментально полученного отношения «эффективного давления» на срезе сопла-щели к избыточному давлению на входе в щель $P_{ср}^{эф}/P_{изб}^{щ}$ от избыточного давления на входе в щель $P_{изб}^{щ}$ (кривая 1). Как видно из рисунка, на участке кривой 1 при $P_{изб}^{щ} = 0 \div 0,1 \text{ кгс/см}^2$ наблюдается с увеличением $P_{изб}^{щ}$ сначала резкое возрастание указанного отношения до значений $5,0 \div 5,5$, а затем его резкое убывание. Очевидно, что при $P_{изб}^{щ} = 0 \div 0,05 \text{ кгс/см}^2$ происходит установление режима ламинарного течения воздуха в щели, и тяга сопла, которая, как упоминалось ранее, примерно пропорциональна сумме $P_{изб}^{щ} + \hat{P}_{изб}$, обуславливает «эффективное давление» $P_{ср}^{эф}$, существенно большее, чем $P_{ср}^{эф}$. В то же время при $P_{ср}^{эф} > 0,3 \text{ кгс/см}^2$, когда относительный вклад в эту сумму от $\hat{P}_{изб}$ (см. рис. 2а) гораздо меньше, чем при $P_{ср}^{эф} = 0 \div 0,1 \text{ кгс/см}^2$, отношение $P_{ср}^{эф}/P_{изб}^{щ}$ медленно и плавно возрастает с увеличением $P_{изб}^{щ}$, по-видимому, за счёт возрастания коэффициента растекания сжатого воздуха по плоскому срезу сопла [3].

Для каждой экспериментальной точки рассчитана располагаемая механическая энергия струи воздуха по формуле:

$$W = \hat{T} \cdot U, \quad (7)$$

где:

U – скорость воздуха в щели, $м/с$;

\hat{T} – тяга сопла, $Н$;

W – располагаемая механическая энергия струи, $Вт$.

Рассчитано также отношение $W/W_{сж}$, где $W_{сж}$ определяли по формуле (3). На рис.5а показано изменение этого отношения в зависимости от $P_{изб}^{ш}$. Величина этого отношения несколько меньше, чем отношения $P_{ср}^{эф}/P_{изб}^{ш}$ при всех $P_{изб}^{ш}$ и при $P_{изб}^{ш} 0,05 \text{ кгс/см}^2$ убывает с возрастанием $P_{изб}^{ш}$. В интервале $P_{изб}^{ш} = 0,05 \div 0,5 \text{ кгс/см}^2$ отношение $W/W_{сж}$ убывает от 4,4 до 2,0, то есть располагаемая механическая энергия струи при таких $P_{изб}^{ш}$ в два–четыре раза превосходит теоретическую работу изотермического сжатия.

На рис. 5 показаны также зависимости отношений $P_{ср}^{эф}/P_{изб}^{ш}$ и $W/W_{сж}$ от зазора щели при неизменной её длине (рис. 5б) и от длины щели при неизменном зазоре (рис. 5в), причём эти зависимости представлены при двух фиксированных значениях избыточного давления $P_{изб}^{ш}$ на входе в щель, равных 0,1 и 0,5 $кгс/см$. Наибольшие значения указанных отношений соответствуют зазору 50÷100 $мкм$ и длине щели до 0,8 $мм$.

Кривые, соответствующие этим зависимостям, при $P_{изб}^{ш} = 0,1 \text{ кгс/см}^2$ почти везде лежат выше, чем при 0,5 $кгс/см$. Таким образом, при разумном выборе зазора, например, 100 $мкм$ и длины щели, например, 0,8 $мм$ при не слишком высоком $P_{изб}^{ш}$ располагаемая механическая мощность струи воздуха превосходит теоретическую работу изотермического сжатия в три раза при $P_{изб}^{ш} = 0,1 \text{ кгс/см}^2$ и в два раза при 0,5 $кгс/см}^2$. При адиабатическом сжатии эти отношения будут немного меньше, например, при $P_{изб}^{ш} = 0,1 \text{ кгс/см}^2$ на 1,5%, а при 0,5 $кгс/см}^2$ – на 6%.

3.

Необходимо рассмотреть вопрос о величине коэффициента полезного действия (КПД) различных типов компрессоров. В табл. 2 приведены взятые из [7, 10] данные о КПД поршневых, центробежных и осевых компрессоров. Данные в таблице даны без учёта

механического и объёмного КПД, которые, соответственно, составляют [10] порядка 0,98 и 0,995. Из табл.2 следует, что поршневые компрессоры не обеспечивают столь высокого КПД, как центробежные и, особенно, осевые турбокомпрессоры. Кроме того поршневые компрессоры гораздо массивнее; и в них используется возвратно-поступательное движение поршней и шатунов. Для получения большой производительности необходимо увеличивать число цилиндров или их объём, а достигаемая в поршневых компрессорах высокая (порядка 5–6) степень сжатия в одной ступени не требуется в приложениях, рассматриваемых в этой статье. В этих приложениях, очевидно, целесообразно использование центробежных или осевых турбокомпрессоров, обеспечивающих при относительно небольшой массе высокую производительность и приемлемую степень сжатия (в одной – трёх ступенях). Выбрав, например, осевой компрессор с полным КПД 0,82, получим, что при зазоре щели 100 мкм и её длине 0,8 мм механическая мощность привода компрессора, необходимая для сжатия воздуха, будет в 2,5 раза меньше, чем располагаемая механическая энергия струи при $P_{изб}^{ш} = 0,1 \text{ кгс/см}^2$ и в 1,6 раза меньше – при $P_{изб}^{ш} = 0,5 \text{ кгс/см}^2$.

Дополнительная механическая энергия струи по отношению к механической мощности привода получается, как уже указано, за счёт **охлаждения** струи воздуха при скачкообразном падении давления в ней и, соответственно, преобразования части внутренней тепловой энергии воздуха в механическую энергию. Кстати, широко известен факт охлаждения пневматического инструмента при его работе [11].

В соответствии с полученными экспериментальными результатами – струя сжатого воздуха при её ламинарном истечении представляет собой прямой преобразователь тепловой энергии окружающей среды в механическую энергию струи воздуха.

Для подобного гипотетического преобразователя существует в настоящее время по крайней мере два названия. Сторонники принципиальной невозможности получения механической и электрической энергии за счёт охлаждения окружающей среды называют такую тепловую машину «вечным двигателем второго рода» [7, 11, 12]. Они основываются на том, что для работы тепловой машины и получения от неё механической энергии необходимы два

источника тепла [7] с различными температурными уровнями, существующими независимо от работы этой машины. Учёные, допускающие возможность получения механической (и, следовательно, электрической) энергии за счёт только охлаждения окружающей среды при наличии единственного температурного уровня, независимо от работы самой тепловой машины, называют эту машину *«монотермическим двигателем»* [13]. В данной статье не ставится задача критики второго начала термодинамики, подкреплённого знаменитым решением Французской академии наук от 1755 года, более чем 170-летней историей развития второго начала и, главное, тем фактом, что создать в природе работающий *монотермический двигатель* пока не удалось никому. Тем не менее, приведённые здесь экспериментальные результаты говорят скорее в пользу возможности создания такого двигателя.

Доказательства невозможности создания *монотермического двигателя*, нередко использующие при анализе мудрёные *термодинамические функции состояния* (например, [11]) на наш взгляд базируются в конечном счёте на эксперименте, состоящем в том, что, сжав газ под поршнем в цилиндре постоянного сечения [7] и затратив на это сжатие механическую работу, никаким образом целиком получить обратно эту работу не удаётся, если тем или иным способом не подвести к сжатому газу дополнительное тепло.

Отличительной чертой рассмотренного в данной статье процесса является как раз то, что при постоянном давлении имеет место ***как бы самопроизвольное увеличение сечения «цилиндра» в три и более раза за счёт разности давлений в «цилиндре» и вне его; и лишь затем происходит падение давления воздуха и увеличение его удельного объёма, то есть как бы расширение воздуха в «цилиндре».***

В этом, по-видимому, суть явления *растекания сжатого воздуха по плоскому срезу сопла* [3], явления, определяющего возможность получения от сжатого воздуха большей механической работы, чем затрачено на его сжатие, за счёт убыли внутренней тепловой энергии воздуха при падении в нём давления и его расширении, причём эта убыль энергии проявляется в охлаждении воздуха.

4.

С использованием полученных экспериментальных результатов выполнены расчёты:

– нетрадиционного летательного аппарата, для которого размеры несущей поверхности в плане практически не выходят за пределы пассажирской кабины или грузового отсека;

– гипотетической нетрадиционной энергетической установки для получения механической (и электрической) энергии без расхода какого-либо топлива только за счёт охлаждения атмосферного воздуха.

При этом помимо экспериментальных результатов использован готовый расчёт трёхступенчатого осевого компрессора [10] с производительностью $25 \text{ м}^3/\text{сек}$ и степенью сжатия 1,48 (в первой ступени – примерно 1,16). Результаты расчётов представлены в табл. 3. Вполне можно представить себе и нетрадиционный летательный аппарат с указанной энергетической установкой. Подъёмную силу такого аппарата можно оценить величиной $1,6 \div 1,7 \text{ тс}$.

5.

Полученные экспериментальные результаты по 45 щелевым соплам разных размеров (в общей сложности более 2000 экспериментальных точек) в известной своей части противоречат установившимся научным представлениям. Экспериментальная установка несложна, и проверка этих результатов не слишком трудоёмка. В то же время перспективы, открывающиеся перед различными областями энергетики и транспорта с учётом этих результатов, крайне соблазнительны в том числе и с позиций экологии. Единственным воздействием гипотетической энергоустановки на окружающую среду является выработка охлаждённого воздуха, однако, и это воздействие может быть скомпенсировано надлежащим расположением таких установок и дроблением их мощностей. Летательный аппарат с подобной энергоустановкой практически не ограничен по времени пребывания в воздухе и по дальности беспосадочного перелёта и обладает абсолютной экологической чистотой.

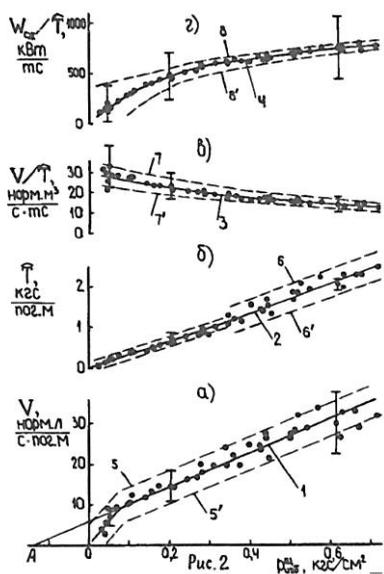


Рис. 2

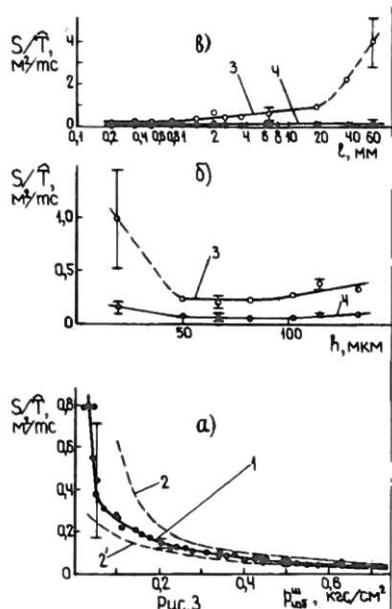


Рис. 3

Рис. 2. Зависимости основных параметров сопла плоского однострунного $h = 102 \text{ мкм}$, $l = 0,8 \text{ мм}$ от избыточного давления на входе в щель: (а) расход воздуха на погонный метр ширины щели; (б) тяга на погонный метр ширины щели; (в) расход воздуха на 1 *мс* тяги; (г) теоретическая работа изотермического сжатия воздуха на 1 *мс* тяги; 1, 2, 3, 4 – кривые полученные обработкой экспериментальных данных по МНК; 5,5', 6,6', 7,7', 8,8' – доверительные пределы при двусторонней доверительной вероятности 0,98

Рис. 3. Зависимость несущей поверхности (суммарное сечение струй воздуха) на 1 *мс* тяги: (а) от избыточного давления на входе в щель при её размерах $h = 102 \text{ мкм}$, $l = 0,8 \text{ мм}$; 1 – кривая, полученная по МНК; 2 и 2' – доверительные пределы при двусторонней доверительной вероятности 0,98; (б) от зазора щели при неизменной её длине $l = 0,8 \text{ мм}$; (в) от длины щели при неизменном её зазоре $h = 102 \text{ мкм}$; 3 – при избыточном давлении на входе в щель $0,1 \text{ кгс/см}^2$; 4 – при $0,5 \text{ кгс/см}^2$

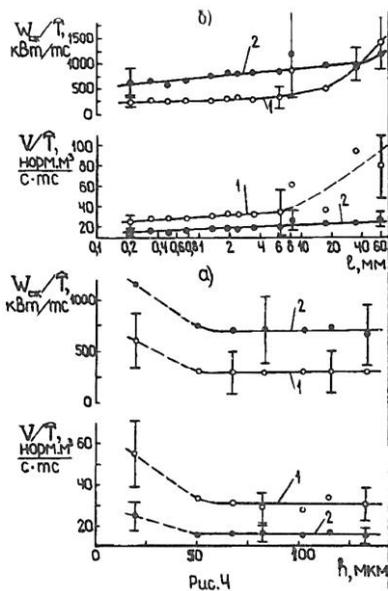


Рис. 4

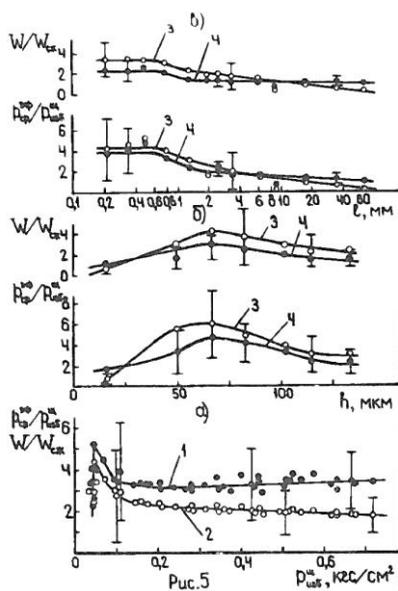


Рис. 5

Рис. 4. Зависимости расхода воздуха и механической мощности привода на 1 *тс* тяги: (а) от зазора щели при неизменной её длине $l = 0,8$ мм; (б) от длины щели при неизменном её зазоре $h = 102$ мкм; 1 – при избыточном давлении на входе в щель $0,1$ кгс/см²; 2 – при $0,5$ кгс/см²

Рис.5. Зависимости отношения «эффективного давления» на срезе сопла-щели к избыточному давлению воздуха на входе в щель и отношения располагаемой мощности струи воздуха к теоретической работе изотермического сжатия: (а) от избыточного давления на входе в щель с размерами $h = 102$ мкм, $l = 0,8$ мм; б) от зазора щели при неизменной её длине $l = 0,8$ мм; в) от длины щели при неизменном её зазоре $h = 102$ мкм; 1 – отношение «эффективного давления» на срезе сопла-щели к избыточному давлению воздуха на входе в щель; 2 – отношение располагаемой мощности струи к теоретической работе изотермического сжатия 3 – при избыточном давлении на входе в щель $0,1$ кгс/см²; 4 – при $0,5$ кгс/см²

Таблица 1

Характеристики летательных аппаратов

Летательный аппарат	Механическая мощность, отнесенная на 1 тс тяги, кВт/тс	Полная несущая поверхность, отнесенная на 1 тс тяги, м ² /тс	
Самолет (при скорости около 400 м/с)	50 ÷ 300	0,16	
Вертолет	100 ÷ 300	20 ÷ 100	
Нетрадиционный летательный аппарат	$R_{\text{изб}}^{\text{ш}} = 0,1 \text{ кгс/см}^2$	$0,5 \text{ кгс/см}^2$	$0,1 \text{ кгс/см}^2$
	280	700	0,75
Здесь не учтен КПД компрессора (около 0,82)			

Таблица 2

Коэффициенты полезного действия компрессоров различных типов

Тип компрессора	КПД компрессора (без учета механического и объемного КПД)			
	при изотермическом сжатии		при адиабатическом сжатии	
Источник литературы	[7]	[10]	[7]	[10]
Поршневой	0,5 ÷ 0,8	0,68 ÷ 0,78	0,85	0,85 ÷ 0,92
Центробежный	0,5 ÷ 0,7		0,75 ÷ 0,80	0,78 ÷ 0,83
Осевой			0,80 ÷ 0,85	0,85 ÷ 0,92

Таблица 3

Результаты расчетов нетрадиционных — летательного аппарата и гипотетической энергоустановки

Характеристика	Единица измерения	Летательный аппарат	Энергоустановка
Расход воздуха	норм. м ³ /с	25	25
Степень сжатия		1,16	1,48
КПД компрессора		0,80 ÷ 0,82	0,80 ÷ 0,82
Скорость вращения	мин ⁻¹	6000	6000
Механическая мощность привода	кВт	482	
Полная несущая поверхность	м ²	0,56	
Подъемная сила	тс	1,04	
Выходная механическая мощность на валу энергоустановки	кВт		814
Размеры компрессора			
— диаметр	м	0,7	0,7
— длина	м	0,25	0,7
Размеры щелевого детандера			
— диаметр	м		0,57
— длина	м		0,53
— зазор щели	мкм		102
— длина щели	мм		0,8
Размеры щели несущей поверхности			
— зазор щели	мкм	102	
— длина щели	мм	0,8	

ЛИТЕРАТУРА

1. Чаплыгин С. А. О газовых струях. – М.–Л.: Гостехиздат, 1949.
2. Левин В. И. Профессии сжатого воздуха и вакуума. – М.: Машиностроение, 1989, с. 73.
3. Володько Ю. И. Теория ламинарного истечения сжатого воздуха в атмосферу и её приложение к проекту нетрадиционного транспортного средства. // ЖРФМ, 1995, № 1–6, с. 48–60.
4. Володько Ю. И. Патент РФ № 2025572 «Устройство для создания тяги», от 23.12.91 г.
5. Володько Ю. И. Заявка РФ на изобретение, гос. рег. № 5025292, «Воздушно-расширительная установка», от 30.01.92 г.
6. Справочник авиационного инженера. Под ред. Александрова В. Г. – М.: Транспорт, 1973, с. 196.
7. Новиков И. И., Воскресенский К. Д. Прикладная термодинамика и теплопередача. – М.: Госатомиздат, 1961, с. 19, 46, 113, 118, 187.
8. Стасенко А. Л. Физика полёта. – М.: Наука, 1988, с. 11.
9. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Механика. – М.: Наука, 1980, с. 477.
10. Эккерт Б. Осевые и центробежные компрессоры. – М.: Машгиз, 1959, с. 82.
11. Бродянский В. М. Вечный двигатель прежде и теперь. – М.: Энергоатомиздат, 1989.
12. Базаров И. П. Термодинамика, Изд. 4. – М.: Высшая школа, 1991, с. 51.
13. Буйнов Г. Н. Двигатель второго рода (спаренный газохимический цикл). // ЖРФМ, 1995, № 1–6, с. 60–74.

Москва, 25 июля 1996 г.

Володько Юрий Иванович, – кандидат технических наук, нач. Отдела нетрадиционных транспортных средств МНПП «Инвестор».

Впервые опубликовано в журнале ЖРФМ, 1997, № 1-12, стр. 42-58