

УДК 629.7.036.001

Б.Ш. Мамедов, доцент, канд. техн. наук

Запорожский национальный технический университет

Ул. Жуковского 64, г. Запорожье, Украина, 69063

E-mail: www.zntu.edu.ua

ЕДИНАЯ ТЕОРИЯ ДВИЖИТЕЛЕЙ. КРАТКАЯ ТЕОРИЯ ОТРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ, ГЕНЕРИРУЕМЫХ В ДИФFUЗОРНОЙ ЧАСТИ НЕРЕГУЛИРУЕМОГО РЕАКТИВНОГО СОПЛА ЛАВАЛЯ*

Рассматриваются недостатки современной теории воздушно-реактивных двигателей, в которой зоны с отрицательной разностью давлений генерируются в диффузорной части нерегулируемого реактивного сопла Лавалья при перерасширенных потоках и характеризуются как сопротивления (без приведения теоретических и физических основ этого явления).

Ключевые слова: *кинематический анализ, зоны отрыва потока, отрывные течения.*

Введение. В современной теории воздушно-реактивных двигателей перерасширение газового потока, например, в сверхзвуковой расширяющейся части реактивного сопла Лавалья, всегда сопряжено с потерей тяги последнего. Это объясняется тем, что при режиме перерасширения на участке реактивного сопла ниже точки А, [1, с. 176, рис. 6.20] отмечается отрицательная разность давлений газового потока, в силу чего на этой части сопла реализуется сила сопротивления, направленная против потока. Одновременно с генерированием зон с отрицательной разностью давлений в точке А генерируются стоячие ударные волны, которые приводят к запиранию (торможению) потока, т.е. к увеличению его статического давления [1, с. 174, рис. 6.17].

В современной теории воздушно-реактивных двигателей при рассмотрении газодинамической устойчивости лопаток компрессоров в зависимости от изменения осевой скорости газового потока применяется терминология "отрыв потока", "отрывные зоны" [2, с. 122], которые тоже характеризуются отрицательной разностью давлений и генерированием стоячих ударных волн [2, с. 70, рис. 3.6] и приводят к запиранию (торможению) газового потока, к снижению КПД ВРД.

В современной теории воздушно-реактивных двигателей не дан анализ отрывных зон и отрывных течений, нет анализа физических явлений, приводящих к генерированию стоячих ударных волн, которые приводят к запиранию (торможению) газового потока с отрицательными последствиями.

Постановка цели исследования. Перед уже созданной единой теорией движителей на непрерывных потоках стояла цель (задание).

На основе проведения полного анализа отрывных зон и отрывных течений, на основе анализа физических явлений генерирования стоячих ударных волн, которые приводят к запиранию (торможению) газового потока (со всеми отрицательными последствиями), доказать, что применение перерасширенных потоков на базе сужающихся сопел является основой технического прогресса в области проектирования не только турбореактивных двигателей с форсажной камерой (ТРДФ), но и ракетных двигателей (РД) в том числе; перерасширенные потоки и сужающиеся сопла дают очень малое значение $P_c F_c$ по сравнению с аналогичным для нерегулируемых реактивных сопел Лавалья, что, естественно, приводит к увеличению тяги и полетного (тягового) КПД ТРДФ и РД на 10-30 %.

При этом единая теория движителей рассматривает отрывные зоны не как "сопротивления", а как движитель на непрерывных потоках, генерирующий отрицательную тягу с одновременным генерированием стоячих ударных волн запирания (торможения) основного газового потока.

Применение кинематического анализа для вывода формул тяги, полетного (тягового) КПД реактивного сопла Н-С₁-Н зоны отрыва потока от внутренней поверхности нерегулируемого реактивного сопла Лавалья при перерасширенных потоках

Применение кинематического анализа для вывода формул тяги, полетного (тягового) КПД реактивного сопла Н-С₁-Н зоны отрыва потока от внутренней поверхности нерегулируемого реактивного сопла Лавалья при перерасширенных потоках с объяснением физических основ генерирования стоячих ударных волн проводится впервые.

В качестве примера рассмотрим зону отрыва Н-С₁-Н газового потока от внутренней поверхности диффузорной части нерегулируемого реактивного сопла Лавалья (рисунок 1, а). Поскольку единая теория движителей рассматривает зону отрыва газового потока как движитель на непрерывных потоках, то точку А, [1, с. 176, рис. 6.20], заменяем на точку С₁, поскольку сечение С₁-С₁ всегда характеризует выходное сечение реактивного сопла любого движителя на непрерывных потоках, а в данном случае таковым является зона отрыва потока Н-С₁-Н, рисунок 1, а.

* *Примечание ред.* Статья публикуется для продолжения дискуссии по заявленной автором теории.

1. Принцип работы реактивного сопла Н-С₁-Н отрывной зоны как движителя на непрерывных потоках, генерирующего отрицательную тягу и стоячие ударные волны

Отрыв перерасширенного газового потока от внутренней поверхности диффузорной части нерегулируемого реактивного сопла Лавалья объясняется несоответствием площади истечения струи газового потока с площадью газодинамического тракта нерегулируемого реактивного сопла Лавалья, которая в этом случае больше площади струи; при этом зоны отрыва перерасширенного газового потока от внутренней поверхности реактивного нерегулируемого сопла Лавалья, в его диффузорной части, могут быть как кольцевые, так и местные.

В зоне отрыва потока (сечение С₁-С₁, рисунок 1, а) генерируется глубокое разрежение, которое создает градиент статических давлений инжектируемого (всасываемого) потока, направленного от сечения Н-Н к сечению С₁-С₁; при этом зона отрыва потока Н-С₁-Н (рисунок 1, а) может работать в двух режимах:

1. В режиме вакуумирования, при котором зона отрыва потока Н-С₁-Н работает как реактивное сопло или как движитель на непрерывных потоках, инжектируя (всасывая) в себя воздух из окружающего пространства по сфероиду (рисунок 1, поз. 1), генерируя при этом отрицательную тягу, которая рассчитывается по формуле:

$$R = P_{н\text{ср}} F_{н\text{ср}} - P_{с1} F_{с1} . \quad (1)$$

Полетный (тяговый) КПД рассчитывается по формуле:

$$\eta_n = \left(1 - \frac{P_{с1} F_{с1}}{P_{н\text{ср}} F_{н\text{ср}}} \right) \cdot 100\% . \quad (2)$$

Вывод формул (1), (2) аналогичен выводу формул тяги, полетного (тягового) КПД для турбореактивных двигателей, [3, с. 18-19, рис. 1].

Поскольку для зоны отрыва газового потока Н-С₁-Н сила сопротивления $P_{с1} F_{с1}$ практически равна нулю, то отрицательную тягу зоны отрыва газового потока Н-С₁-Н можно рассчитать по формуле (рисунок 1, е):

$$R = P_{н\text{ср}} F_{н\text{ср}} . \quad (3)$$

В формулах (1), (2), (3) приняты следующие обозначения: R – отрицательная тяга, генерируемая зоной отрыва газового потока Н-С₁-Н; $P_{н\text{ср}} F_{н\text{ср}}$ – первичная движущая сила в среднем сечении газодинамического тракта реактивного сопла зоны отрыва потока Н-С₁-Н; $P_{н\text{ср}}$ – статическое давление газового потока в среднем сечении газодинамического тракта реактивного сопла зоны отрыва потока Н-С₁-Н, меньше P_n – давления окружающей среды; $F_{н\text{ср}}$ – площадь газодинамического тракта в среднем сечении реактивного сопла зоны отрыва потока Н-С₁-Н; $P_{с1} F_{с1}$ – сила сопротивления в выходном сечении С₁-С₁ реактивного сопла Н-С₁-Н зоны отрыва газового потока, которая из-за малого значения $F_{с1}$ практически равна нулю, где $P_{с1}$ – статическое давление газового потока в выходном сечении С₁-С₁ реактивного сопла зоны отрыва потока Н-С₁-Н; $F_{с1}$ – площадь выходного сечения С₁-С₁ реактивного сопла зоны отрыва газового потока Н-С₁-Н.

Необходимо отметить, что к общему балансу внешних сил, действующих на рассматриваемый участок трубки тока реактивного сопла зоны отрыва потока Н-С₁-Н, добавляется еще центробежная сила, работа которой полностью компенсирует работу инерционных сил (рисунок 1, поз. г, д).

На рисунке 1 представлен кинематический анализ характера изменения статических давлений, осевых скоростей, ускорений, центробежных сил, первичных движущих сил от изменения статических давлений в реактивном сопле зоны отрыва потока Н-С₁-Н от внутренней поверхности диффузорной части нерегулируемого реактивного сопла Лавалья в режиме вакуумирования для вывода формул тяги, полетного (тягового) КПД реактивного сопла зоны отрыва Н-С₁-Н, как движителя на непрерывных потоках. Рисунок 1 включает:

а – реактивное сопло зоны отрыва потока Н-С₁-Н, которое образуется при отрыве основного потока от внутренней поверхности диффузорной части нерегулируемого реактивного сопла Лавалья в режиме вакуумирования;

б – характер изменения статических давлений инжектируемого газового потока в зоне Н-С₁ реактивного сопла Н-С₁-Н в режиме вакуумирования;

в – характер изменения осевых скоростей инжектируемого газового потока в зоне Н-С₁ реактивного сопла Н-С₁-Н в режиме вакуумирования;

г – характер изменения ускорений инжектируемого газового потока в зоне Н-С₁ реактивного сопла Н-С₁-Н в режиме вакуумирования;

д – характер изменения работы центробежных сил в момент поворота потока 2 в зоне С₁-L до совпадения с основным потоком 3, рисунок 1, а, при этом работа центробежных сил полностью компенсирует работу инерционных сил;

е – характер изменения первичных движущих сил от изменения статических давлений инжектируемого газового потока в зоне Н-С₁ реактивного сопла Н-С₁-Н для вывода формул тяги, полетного (тягового) КПД.

Кинематический анализ, представленный на рисунке 1, показывает, что работа инерционных сил, представленная на графике (рисунок 1, г) со знаком "плюс", полностью компенсируется работой центробежных сил, представленной на графике (рисунок 1, д) со знаком "минус". Поэтому для вывода формул тяги, полетного (тягового) КПД реактивного сопла Н-С₁-Н зоны отрыва потока применяются только первичные движущие силы от изменения статических давлений газового потока в зоне Н-С₁.

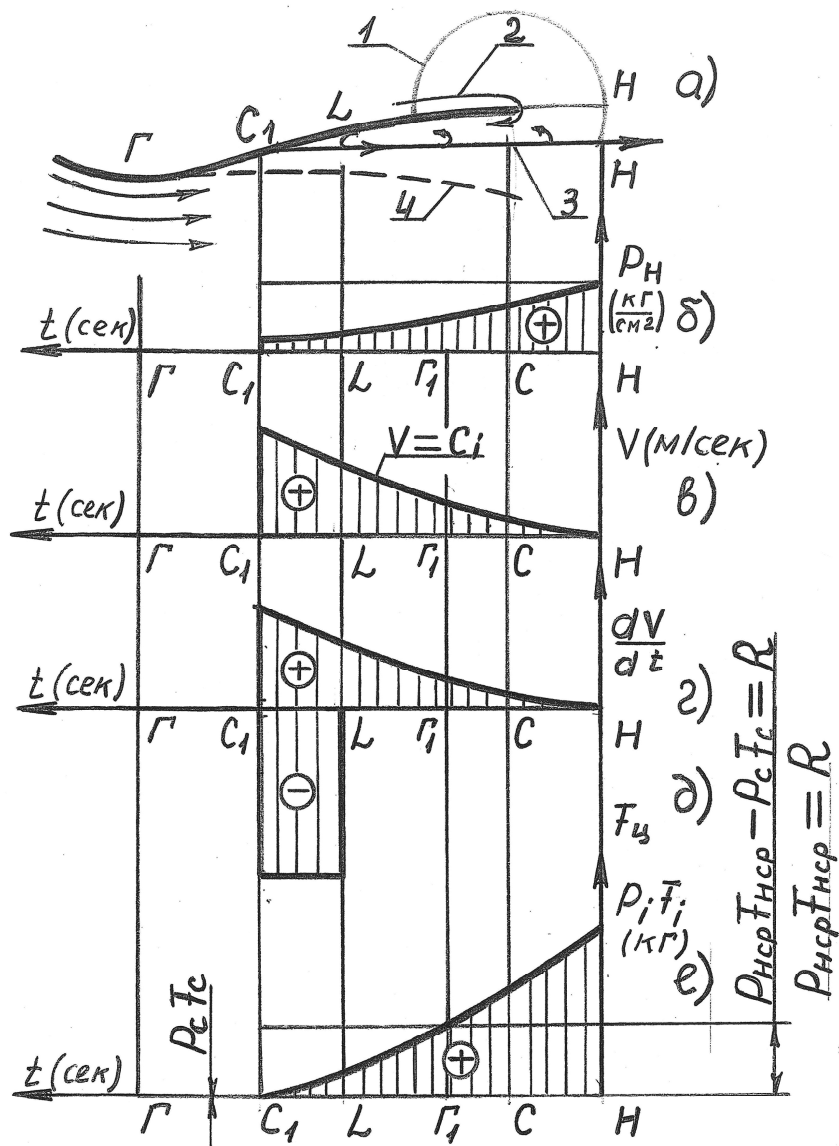


Рисунок 1 – Кинематический анализ характера изменения статических давлений, осевых скоростей, ускорений, центробежных сил, первичных движущих сил от изменения статических давлений в реактивном сопле зоны отрыва потока Н-С₁-Н от внутренней поверхности диффузорной части нерегулируемого реактивного сопла Лавалья в режиме вакуумирования для вывода формул тяги, полетного (тягового) КПД реактивного сопла зоны отрыва Н-С₁-Н, как двигателя на непрерывных потоках: 1 – сферид инжектирования; 2 – обтекающий снаружи сопла Лавалья поток; 3 – основной поток; 4 – положение створок регулируемого реактивного сопла Лавалья при применении перерасширенных потоков

2. В режиме генерирования ударной волны (рисунок 2), при котором инжектируемый газовый поток 2 в зоне C_1-L при повороте полностью теряет свою кинетическую энергию, которая переходит в потенциальную энергию давления, рисунок 2, б. Резкое увеличение давления газового потока в зоне $L-C_1$ генерирует мощную ударную волну в колебательном режиме, которая разрушает всю зону отрыва $H-C_1-H$, затем зона отрыва потока $H-C_1-H$ опять образуется, работая в режиме вакуумирования, за которым следует режим генерирования ударных волн и т.д., генерируя в окружающее пространство низкоамплитудные высокочастотные ударные волны в колебательном режиме, которые могут привести к флаттеру летательного аппарата.

На рисунке 2 представлен кинематический анализ изменения статических давлений, осевых скоростей, ускорений, первичных движущих сил от изменения статических давлений в зоне отрыва потока $H-C_1-H$ от внутренней поверхности диффузорной части нерегулируемого реактивного сопла Лавала в режиме генерирования ударной волны. Рисунок 2 включает:

а – реактивное сопло отрыва потока $H-C_1-H$, которое образуется при отрыве основного потока от внутренней поверхности диффузорной части нерегулируемого реактивного сопла Лавала в режиме генерирования ударной волны;

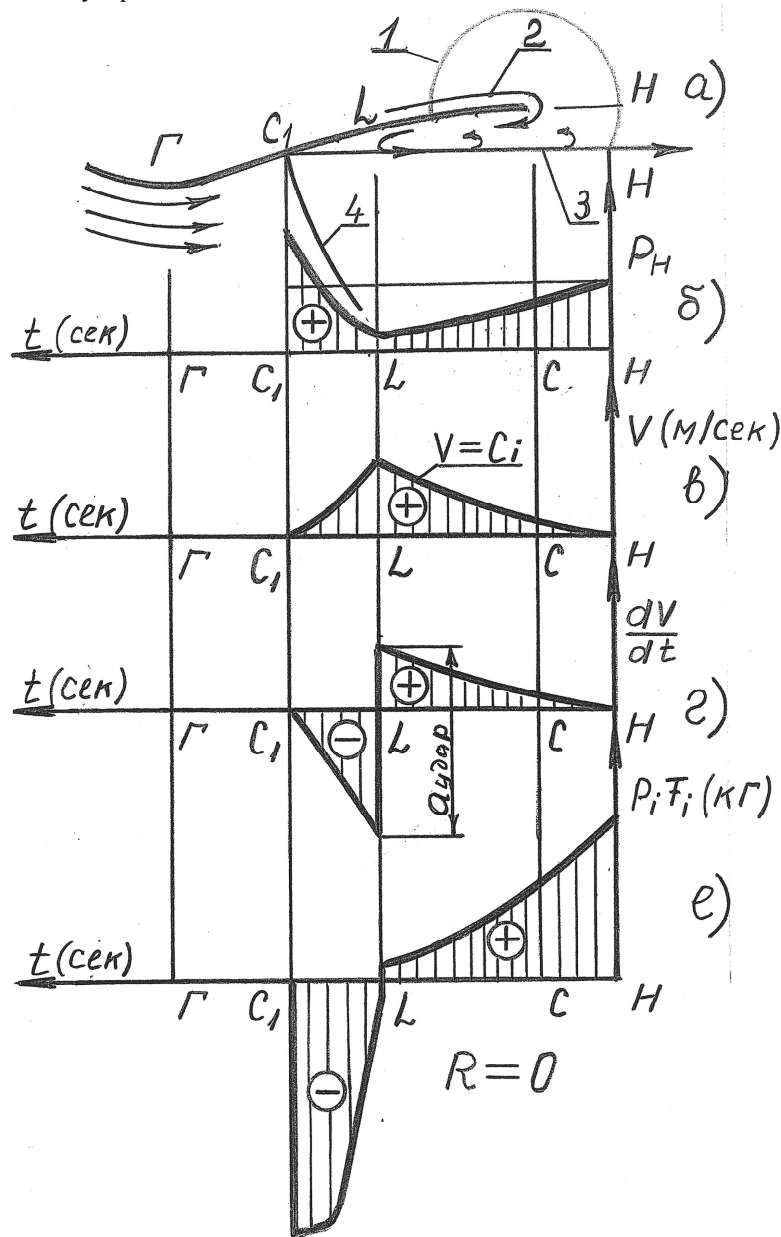


Рисунок 2 – Кинематический анализ изменения статических давлений, осевых скоростей, ускорений, первичных движущих сил от изменения статических давлений в зоне отрыва потока $H-C_1-H$ от внутренней поверхности диффузорной части сопла Лавала в режиме генерирования ударной волны: 1 – сфероид инжектирования; 2 – обтекающий снаружи сопла Лавала поток; 3 – основной поток; 4 – стоячая ударная волна

б – характер изменения статических давлений инжектируемого газового потока в зоне Н-С₁ реактивного сопла Н-С₁-Н в режиме генерирования ударной волны;

в – характер изменения осевых скоростей инжектируемого газового потока в зоне Н-С₁ реактивного сопла Н-С₁-Н в режиме генерирования ударной волны;

г – характер изменения ускорений инжектируемого газового потока в зоне Н-С₁ реактивного сопла Н-С₁-Н в режиме генерирования ударной волны;

е – характер изменения первичных движущих сил от изменения статических давлений инжектируемого газового потока в зоне Н-С₁ реактивного сопла Н-С₁-Н в режиме генерирования ударных волн.

Кинематический анализ, представленный на рисунке 2, показывает, что при переходе кинетической энергии инжектируемого газового потока в потенциальную энергию давления в сечении L-L имеет место кинематическая зона жесткого (упругого) удара, сила которого регламентируется произведением массы инжектируемого газового потока на ускорение удара, $a_{уд}$ (рисунок 2, г). Необходимо отметить, что ударная волна, которая генерируется в зоне L-С₁ имеет остронаправленный характер против основного потока, и эта ударная волна останавливается там, где ее кинетическая энергия равна кинетической энергии набегающего потока, рисунок 2, поз.4, образуя, таким образом, стоячую ударную волну, которая приводит к торможению или запиранию основного газового потока, существенно снижая при этом полетный (тяговый) КПД за счет увеличения статического давления P_c в выходном сечении С-С нерегулируемого реактивного сопла Лавалья.

С увеличением скорости истечения перерасширенных газовых потоков сечение С₁-С₁ реактивного сопла Н-С₁-Н (рисунок 1, а), приближается к критическому сечению нерегулируемого реактивного сопла Лавалья Г-Г, при этом отрицательная тяга и мощность стоячих ударных волн, генерируемых реактивным соплом Н-С₁-Н зоны отрыва потока, увеличивается. Стоячие ударные волны приводят к полному запиранию газового потока, после чего нерегулируемое реактивное сопло Лавалья входит в пульсационный режим работы. Поэтому скорость истечения газового потока через критическое сечение Г-Г нерегулируемого реактивного сопла Лавалья не может превышать скорости звука, что является большим недостатком последних, требующим в эксплуатации применения только нормально расширенных газовых потоков, дающих $P_c = P_n$ и максимальное значение тяги при $P_{с,р} = P_{с,расч}$, возможно применение недорасширенных газовых потоков, дающих $P_c > P_n$ и меньшее значение тяги при $P_{с,р} > P_{с,расч}$, поэтому применение недорасширенных потоков в выходном сечении С-С нерегулируемого реактивного сопла Лавалья невыгодно из-за увеличения $P_c F_c$, что приводит к снижению тяги и полетного (тягового) КПД [3, 4].

Таким образом, отрывные течения, которые генерируются перерасширенными потоками в диффузорной части нерегулируемого реактивного сопла Лавалья, уменьшают тягу двигателя двумя путями:

1. За счет прямого генерирования отрицательной тяги в реактивных соплах зоны отрыва Н-С₁-Н.
2. За счет торможения основного потока стоячими ударными волнами, что приводит к увеличению P_c , а значит к увеличению силы сопротивления $P_c F_c$ в выходном сечении нерегулируемого реактивного сопла Лавалья.

Согласно единой теории движителей на непрерывных потоках тяга любого ТРДФ, РД при $V_n = 0$ определяется по формуле [3, с. 18-19, 4]:

$$R = P_{н,ср}^* F_{н,ср} - P_c F_c, \quad (4)$$

где $P_{н,ср}^*$ – статическое давление заторможенного газового потока в сечении Г-Г (на входе в первый сопловый аппарат, или в критическом сечении Г-Г РД, рисунок 1, а); $F_{н,ср}$ – площадь газодинамического тракта в сечении Г-Г ТРДФ, РД; P_c – статическое давление газового потока в выходном сечении С-С реактивного нерегулируемого сопла Лавалья; F_c – площадь выходного сечения С-С реактивного нерегулируемого сопла Лавалья.

Согласно формуле (4), в диффузорной части нерегулируемого реактивного сопла Лавалья просто необходимо применять перерасширенные потоки, но с обязательной плавной регулировкой выходного сечения С-С реактивного сопла Лавалья, рисунок 1, поз. 4, с целью полного устранения отрывных зон и стоячих ударных волн. При этом полностью меняется форма сопла: из реактивного сопла Лавалья оно переходит в сужающееся реактивное сопло, которое дает увеличение тяги от 10 до 30 % по сравнению с первоначальным нерегулируемым реактивным соплом Лавалья за счет уменьшения P_c и F_c . Практика американского ракетостроения четко подтверждает это, поскольку работая по формуле (4), американские конструктора ЖРД полностью отказались от реактивных сопел Лавалья, у которых, с целью обеспечения положительной разности давлений по внутренней поверхности диффузорной части нерегулируемого

реактивного сопла Лавалю, статическое давление на расчетном режиме в выходном сечении С-С должно быть равно P_n , т.е. поток должен быть только нормально расширенным.

Переход к перерасширенным потокам, регламентирующим расчетное статическое давление P_c гораздо меньше P_n , позволил американским конструкторам ЖРД не только увеличить тягу ЖРД, но и полностью отказаться от знаменитых сопел Вернера Фон Брауна – сопел Лавалю, [4], полностью перейдя к сужающимся соплам, что следует из телерепортажа о запуске американского космического корабля многоразового применения.

Общие выводы. Перспективы дальнейших исследований

Таким образом, кратко изложенная теория отрывных течений в диффузорной части нерегулируемого реактивного сопла Лавалю, применяемого в ТРДФ, РД и работающего не нормально расширенных потоках, обеспечивающих $P_c = P_n$, позволяет сделать вывод о том, что применение перерасширенных потоков в диффузорной части нерегулируемого реактивного сопла Лавалю приводит к появлению отрывных течений, которые снижают тягу и полетный (тяговый) КПД ТРДФ, РД, позволяет сделать вывод о том, что в ТРДФ, РД переход от нормально расширенного газового потока к перерасширенному газовому потоку в сечении С-С увеличивает тягу и полетный (тяговый) КПД на 10-30% только при условии применения сужающегося реактивного сопла с расчетным статическим давлением P_c гораздо ниже P_n .

Таким образом, технический прогресс при проектировании реактивных сопел ТРДФ, согласно реальной формуле тяги (4), заключается в полном отказе от сопел Лавалю, работающих на нормально расширенных газовых потоках, и переходе на сужающиеся реактивные регулируемые сопла, работающие на перерасширенных газовых потоках, что позволяет увеличить тягу, полетный (тяговый) КПД на 10-30% за счет уменьшения P_c и F_c .

Библиографический список использованной литературы

1. Шляхтенко С.М. Теория и расчет воздушно-реактивных двигателей [Текст] / С.М. Шляхтенко. — М.: Машиностроение, 1987. — 568 с.
2. Казанджан П.К. Теория авиационных двигателей [Текст] / П.К. Казанджан, Н.Д.Тихонов, А.К. Янко. — М.: Машиностроение, 1983. — 223 с.
3. Мамедов Б.Ш. Основы единой теории движителей на непрерывных потоках. Вывод формулы тяги, полетного (тягового) КПД турбореактивных двигателей [Текст] / Б.Ш. Мамедов / Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — Харьков: Изд. Технологический центр. Прикладная механика, 2011. — № 4/7 (52). — С. 15–20.
4. Мамедов Б.Ш. Единая теория движителей. Вывод формул тяги, полетного (тягового) КПД ракетных двигателей. [Текст] / Б.Ш. Мамедов/ Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — Харьков: изд. Технологический центр. Прикладная механика, 2013. — № 1/7 (61). — С. 67–71.

Поступила в редакцию 31.03.2014 г.

Мамедов Б.Ш. Єдина теорія рушіїв. Стисла теорія відривних течій, генеруємих у діффузорній частині нерегулюємого реактивного сопла Лавалю

Розглядаються недоліки сучасної теорії повітря-реактивних двигунів, у котрій зони з негативною різницею тиску, що генеруються у диффузорній частині нерегулюємого реактивного сопла Лавалю при перерозширених газових потоках, характеризуються, як опір без приведення теоретичних та фізичних основ цього явища.

Ключові слова: кінематичний аналіз, зони відриву потоку, відривні течії.

Mamedov B.S. Unified theory of movers. Brief theory of separated flows in diffuzor part generated in unregulated jet Laval nozzle

The shortcomings of the modern theory of air-jet engines, in which the zone of negative pressure difference generated in the diffuzor part of unregulated Laval nozzle with overexpanded jet streams are highlighted and characterized as resistance without giving theoretical and physical foundations of this phenomenon.

Keywords: kinematic analysis, flow separation zone, separated flows.