DOI: 10.15593/2224-9982/2017.49.05

УДК 629.7.036.3.01

А.С. Шабалин, В.Л. Варсегов

Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева,
Казань, Россия

ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО НАБЕГАЮЩЕГО ПОТОКА НА ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕВЕРСИВНОГО УСТРОЙСТВА

В процессе эксплуатации летательного аппарата реверсивное устройство используется достаточно непродолжительное время, при этом составляя значительную долю веса авиационного двигателя. Использование реверсивного устройства при посадке сопряжено с множеством сложностей, связанных с попаданием реверсивных струй и посторонних предметов со взлетно-посадочной полосы на вход двигателя. Одним из способов борьбы с данными негативными явлениями является применение на реверсивном устройстве решеток с отклонением выходной кромки продольного ребра. Однако необходимо знать влияние применения данного вида решеток на газодинамические характеристики реверсивного устройства. Особого внимания заслуживают исследования влияния применения таких решеток на газодинамические характеристики при наличии набегающего потока, так как газодинамические характеристики при наличии и отсутствии набегающего потока отличаются, что отмечено рядом исследователей. Это влияние может быть выявлено с помощью экспериментальных исследований. Однако экспериментальные исследования реверсивного устройства сложны и трудозатратны. В связи с этим в работе рассматривается исследование газодинамических характеристик с применением численного метода расчета, получившего в последнее время широкое распространение из-за бурного развития вычислительной техники. Верификация рассмотренной модели проведена по результатам экспериментального исследования, проведенного на модельной установке на режимах без набегающего потока. В дальнейшем в расчетной модели был наложен набегающий поток. Полученные результаты позволили сделать выводы о влиянии набегающего потока на газодинамические характеристики реверсивного устройства при различной геометрии решеток.

Ключевые слова: реверсивное устройство решетчатого типа, численное моделирование, набегающий поток, газодинамические характеристики, гидродинамический параметр.

A.S. Shabalin, V.L. Varsegov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev,
Kazan, Russian Federation

INFLUENCE OF EXTERNAL INCOMING FLOW ON GAS DYNAMIC CHARACTERISTICS OF A REVERSING DEVICE

In the process of operating an aircraft, the reversing device is used for a relatively short time, while making up a significant portion of the weight of the aircraft engine. The use of a reversing device during landing is fraught with many difficulties associated with the entry of reversible jets and foreign objects from the runway to the engine inlet. One of the ways to combat these negative phenomena is the use on the reversible device of gratings with the deviation of the output edge of the longitudinal rib. However, it is necessary to know the effect of the application of this type of lattice on the gas dynamic characteristics of the reversing device. Special attention should be paid to studies of the effect of the application of this type of lattice on the gas dynamic characteristics in the presence of an incoming flow, since the gas dynamic characteristics in the presence and absence of incoming flow differ, as noted by a number of researchers. This influence can be identified through experimental studies. However, experimental studies of the reversing device are complex and time-consuming. In this connection, in this paper, we study gas-dynamic characteristics using the numerical method of calculation, which has recently obtained wide dissemination because of the rapid development of computer technology. Verification of the considered model was carried out with an experimental model installation in regimes without incoming flow. Later, the model was superimposed with an incoming flow. The results obtained made it possible to draw conclusions about the effect of the incoming flow on the gas-dynamic characteristics of the reversing device for various lattice geometries.

Keywords: reversing device of lattice type, numerical modeling, incoming flow, gas dynamic characteristics, hydrodynamic parameter.

Одним из самых важных этапов полета самолета является посадка, включающая послепо-
садочный пробег, во время которого должно быть обеспечено эффективное торможение для
своевременной остановки самолета. Реверсивное устройство (РУ) уже на протяжении многих

десятилетий успешно применяется для этих целей [1]. Со времен создания первого реверсивного устройства в составе ТРД в 1948 г. С.В. Ворожбиевым и другими под руководством В.Я. Климова [2] и до нашего времени было разработано и реализовано на практике много принципиальных схем и различных конструкций реверсивных устройств. Несмотря на это, все реверсивные устройства функционально можно свести к двум типам: реверсивные устройства давления и скорости. Как следует из анализа статистических материалов, реверсивные устройства давления применены на большинстве двигателей – ~73 % (из них 63 % – с решетками и ~8 % – со створками перед реактивным соплом), а реверсы скорости – на ~35 % двигателей [3].

Широкое применение реверсивных устройств решетчатого типа обусловлено следующими факторами:

- стремлением получить высокие значения обратной тяги $R_{\text{рев}}$, так как эффективность таких устройств может быть доведена до 50–55 %;
- возможностью относительно просто решить задачу по исключению попадания горячих струй во входные устройства соседних двигателей с помощью специальной ориентации решеток по окружности мотогондолы двигателя и подбора углов установки лопаток в решетках $\beta_{\text{л}}$ по ее длине.

Примером реверсивного устройства решетчатого типа может служить реверсивное устройство двигателя ПС-90А [4], конструкция которого подробно описана в работе [5].

Использование реверсивного устройства при посадке сопряжено с множеством сложностей. Неудовлетворительная внешняя аэродинамика силовой установки при применении реверса тяги на пробеге самолета может привести к неустойчивой работе двигателей («помпажу») и повреждению лопаток компрессора двигателей посторонними предметами с поверхности аэродрома. Несмотря на значительные достижения в области исследований конструкции реверсивного устройства, эти вопросы остаются актуальными до сих пор, о чем свидетельствуют работы [6–8]. Один из способов борьбы с данными негативными явлениями – применение на реверсивном устройстве решеток с отклонением угла выходной кромки продольного ребра.

Создание современного конкурентоспособного авиационного двигателя возможно только при условии тщательной оптимизации каждого отдельно взятого узла двигателя по аэродинамическим, массовым, конструктивным, ценовым и другим параметрам [9]. Для решения данной задачи существует множество способов. Одним из них являются экспериментальные исследования [10]. Однако экспериментальные исследования обладают рядом существенных недостатков, связанных с невозможностью получения полной информации по многим из требуемых параметров, трудоемкостью, сложностью и дороговизной проводимых исследований. Применение численных методов расчета, получивших в последнее время благодаря бурному развитию вычислительной техники широкое развитие, позволило справиться со многими из этих трудностей. При этом экспериментальные исследования используются в качестве средства настройки параметров численного моделирования и верификации результатов [11].

В данной работе представлены исследования газодинамических характеристик реверсивного устройства решетчатого типа с применением численных методов расчета. Исследование газодинамических характеристик было разбито на два этапа. На первом этапе, описанном в работе [12], рассматривалась расчетная модель без набегающего потока для четырех различных моделей решеток реверсивного устройства и проведена верификация полученных результатов с экспериментальными данными с целью отработки методики расчета для разработанной модели.

Экспериментальная установка была выполнена по геометрическому подобию с перспективным газотурбинным двигателем в масштабе 1:2 и представляла собой сектор наружного контура с центральным углом 18° и установленным на выходе рядом из трех решеток (рис. 1). Решетки представляли собой устройство отклонения потока, состоящее из 12 лопаток, установленных с изменяемым углом по длине ($44\text{--}54^\circ$) во избежание прилипания струй к мотогондоле

и попадания их на вход в двигатель (рис. 2–5). В качестве рабочего тела в экспериментальной установке использовался воздух низкого давления. Все измерения в процессе исследований проводились на аттестованном оборудовании с применением средств измерений, имеющих действующие свидетельства о поверке и калибровке.

Рис. 1. Общий вид экспериментальной установки с используемыми средствами измерений

Рис. 2. Модель решетки без поворота выходных кромок продольных ребер

Рис. 3. Модель решетки с выходными кромками продольных ребер, повернутыми на угол $\gamma = 20^\circ$

Рис. 4. Модель решетки с выходными кромками продольных ребер, повернутыми на угол $\gamma = 30^\circ$

Рис. 5. Модель решетки с выходными кромками продольных ребер, повернутыми на угол $\gamma = 45^\circ$ с увеличенной густотой продольных ребер

Расчетная модель представляла собой канал, соответствующий проточной части экспериментальной установки (рис. 6). На основе данной геометрии была построена сеточная модель, содержащая порядка пяти миллионов элементов. При построении сетки в препроцессоре Gambit, работа в котором подробно описана в пособии [13], предпочтение отдавалось прямоугольным параллелепипедам, и только в случае сложной геометрии в области решетки применялись тетраэдральные и призматические элементы. При построении также уделялось внимание сгущению сетки в тех областях, где возможно было появление больших градиентов искомых функций.

Рис. 6. Модель РУ с указанием граничных условий без набегающего потока

Рис. 7. Модель РУ с указанием граничных условий в случае наложения набегающего потока

На входе в модель задавались параметры, аналогичные измеренным на входе в экспериментальную установку. В качестве таких параметров использовались массовый расход воздуха G_v и температура торможения T^* . В качестве рабочей среды рассматривался воздух. Расчеты проводились для двух расходов воздуха, соответствующих скоростям на входе в РУ 35 и 53 м/с. При этом зависимость плотности газа от параметров потока учитывалась с помощью уравнения состояния идеального газа (Менделеева–Клапейрона). Зависимость вязкости от температуры задавалась в виде уравнения Сатерленда. На стенке рассматриваемой модели ставилось условие прилипания, стенка считалась адиабатной. На выходе из модели ставилось граничное условие – атмосферное давление, что соответствовало условиям эксперимента. В качестве модели турбулентности, согласно проведенным исследованиям [14], была выбрана модель $k-\omega$ SST. Расчеты проводились в программном комплексе Fluent [15].

На втором этапе, о котором и пойдет речь в данной статье, проводились исследования с применением численного метода при наложении внешнего набегающего потока на участок РУ (рис. 7). В качестве параметров набегающего потока выбирались такие скорости, при которых включается и выключается РУ при эксплуатации газотурбинного двигателя. Это приблизительно 35 и 100 м/с соответственно. По известным скоростям вычислялся массовый расход, который и задавался в качестве граничного условия.

Полученные результаты представлены в графическом виде на рис. 8–12. Все данные с целью анализа полученных результатов обобщены по гидродинамическому параметру $\sqrt{q}$, который представляет отношение скоростных напоров набегающего потока к реверсивному; $q = \frac{\rho_w w^2}{\rho_v v^2}$, как это сделано в работе [16]. Здесь ρ_w – плотность внешнего набегающего потока, кг/м³; w – скорость внешнего набегающего потока, м/с; ρ_v – плотность реверсивной струи, кг/м³; v – среднерасходная скорость реверсивной струи, м/с.

Рис. 8. Влияние гидродинамического параметра $\sqrt{q}$ на коэффициент восстановления полного давления σ_c для различных значений углов отклонения выходных кромок ребер γ

Рис. 9. Влияние гидродинамического параметра $\sqrt{q}$ на коэффициент расхода решетки μ для различных значений углов отклонения выходных кромок продольных ребер γ

Рис. 10. Влияние гидродинамического параметра $\sqrt{q}$ на величину обратной тяги R_{rev} для различных значений углов отклонения выходных кромок продольных ребер γ

Рис. 11. Влияние гидродинамического параметра $\sqrt{q}$ на коэффициент реверсирования $\bar{K}$ для различных значений углов отклонения выходных кромок продольных ребер γ

Изменение профиля скорости под действием набегающего потока представлено на рис. 12, а, б.

Адекватность расчетной модели и ее верификация с экспериментальными данными представлены в работе [12] сравнением газодинамических характеристик для четырех решеток без набегающего потока. К сожалению, экспериментальных данных для верификации полученных результатов с набегающим потоком нет в связи со сложностью осуществления эксперимента,

поэтому в статье приведены результаты только численного моделирования. Имеются экспериментальные данные по исследованию влияния внешнего обдува на характеристики модельного реверсивного устройства, приведенные в работе [16]. Однако используемая в этой работе модель существенно отличается от рассмотренной в данной статье. Экспериментальные данные по коэффициентам реверсирования, полученные в работе [16], приведены на рис. 12 для справки.

Рис. 12. Влияние скорости набегающего потока W на картину течения на выходе из решетки с углом поворота выходной кромки продольного ребра $\gamma = 20^\circ$ при значениях среднерасходной скорости реверсивной струи $v = 35$ м/с и $v = 54$ м/с соответственно

На основе полученных результатов численного моделирования можно сделать вывод об изменении газодинамических характеристик реверсивного устройства с решетками, имеющими различные углы отклонения выходных кромок продольного ребра при условии наличия внешнего набегающего потока, а именно:

1. Увеличение скоростного напора набегающего потока приводит к уменьшению коэффициента расхода μ , а также коэффициента реверсирования $\bar{R}$ в связи с уменьшением обратной тяги $R_{\text{рев}}$, при этом коэффициент потерь полного давления σ_p остается практически неизменным.

2. Увеличение угла отклонения выходных кромок продольного ребра приводит к уменьшению обратной тяги $R_{\text{рев}}$, а следовательно, и коэффициента реверсирования $\bar{R}$, к росту коэффициента расхода μ , при этом коэффициент потерь полного давления σ_p остается практически неизменным.

3. Изменение газодинамических параметров реверсивного устройства до значения $\sqrt{q} < 1$ незначительно. В интервале режимных параметров, при которых осуществляется эксплуатация реверсивного устройства ($0,15 < \sqrt{q} < 0,45$), деформации профиля скорости на выходе из решетки практически не наблюдается. Этим объясняется то, что газодинамические характеристики реверсивного устройства не зависят от наличия внешнего набегающего потока на режимах, имеющих место при послепосадочном пробеге самолета.

4. Скорость набегающего потока при $\sqrt{q} > 1$ влияет на профиль скорости на выходе из решетки, а следовательно, и на газодинамические характеристики РУ, чем и объясняются полученные в п. 1 результаты.

Библиографический список

1. Гилерсон А.Г. Эффективность реверсивных устройств при торможении самолетов. – М.: Машиностроение, 1995. – 192 с.
2. Поляков В.В. Реверсивные устройства силовых установок с воздушно-реактивными двигателями / ВИНТИ. – М., 1978. – 212 с. – (Итоги науки и техники. Авиационное. Т. 5).
3. Проектирование авиационных газотурбинных двигателей / В.П. Данильченко, А.М. Постников, Ю.И. Цыбизов [и др.]. – Самара: Изд-во Самар. науч. центра РАН, 2008. – 620 с.
4. Иноземцев А.А., Нихамкин М.А., Сандрацкий В.Л. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. – М.: Машиностроение, 2008. – Т. 2. – 368 с.
5. Авиационный двигатель ПС-90А / А.А. Иноземцев, Е.А. Коняев, В.В. Медведев, А.В. Нерадько, А.Е. Рясков / под ред. А.А. Иноземцева. – М.: Либра-К, 2007. – 320 с.
6. Комов А.А. Оценка защищенности двигателей ПД-14 от повреждений посторонними предметами на самолете МС-21 // Известия Самар. науч. центра РАН. – 2016. – Т. 18, № 4(3). – С. 586–591.
7. Комов А.А. Эффективность применения реверсивных устройств // Науч. вестник ГосНИИГА. Сер.: Эксплуатация воздушного транспорта и ремонт авиационной техники. Безопасность полетов. – 2005. – № 90(8). – С. 165–170.
8. Комов А.А., Юрин С.П. Уровень защищенности авиационных двигателей отечественных воздушных судов от повреждений посторонними предметами // Науч. вестник ГосНИИГА. – 2014. – № 4. – С. 42–48.
9. Бекурин Д.Б., Умпелева О.А., Копысов Д.В. Использование численных методов при аэродинамическом проектировании реверсивного устройства решетчатого типа для перспективного ТРДД // Авиадвигатели XXI века: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. Москва, 30 ноября – 3 декабря 2010 г. / ЦИАМ им. П.И. Баранова. – М., 2010. – С. 1482–1485.
10. Святогоров А.А., Попов К.Н., Хвостов Н.И. Устройства для отклонения реактивной струи турбореактивных двигателей. – М.: Машиностроение, 1968. – 239 с.
11. Варсегов В.Л. Течение потоков реверсированного ТРДД. Математическое моделирование и экспериментальное исследование: монография. – LAMBERT Academic Publishing GmbH, 2011. – 240 с.
12. Варсегов В.Л., Шабалин А.С. Численное определение газодинамических характеристик решеток с различными углами отклонения выходных кромок продольных ребер реверсивного устройства перспективного газотурбинного двигателя // Известия вузов. Авиационная техника. – 2017. – № 2. – С. 43–49.
13. Батуринов О.В., Батуринов Н.В., Матвеев В.Н. Построение расчетных моделей в препроцессоре Gambit универсального программного комплекса Fluent: учеб. пособие. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. – 172 с.
14. Варсегов В.Л., Шабалин А.С. Выбор оптимальной модели турбулентности при численном моделировании течения в устройстве реверсирования тяги ТРДД решетчатого типа // Известия вузов. Авиационная техника. – 2015. – № 4. – С. 117–120.
15. Батуринов О.В., Батуринов Н.В., Матвеев В.Н. Расчет течений жидкостей и газов с помощью универсального программного комплекса Fluent: учеб. пособие. – Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2009. – 151 с.
16. Портнов А.Д. Влияние внешнего обдува на характеристики модульного реверсивного устройства // Тр. ЦИАМ. – 1982. – № 1006. – С. 1–6.

References

1. Gilerson A.G. Effektivnost reversivnykh ustroystv pri tormozhenii samoletov [The efficiency of reversing devices when braking of an aircraft]. Moscow, Mashinostroenie, 1995, 192 p.
2. Polyakov V.V. Reversivnye ustroystva silovykh ustanovok s vozduшно-reaktivnymi dvigatelyami. Aviastroenie. Tom 5 [Reversing devices of power plants of air-breathing jet engines]. Moscow, VINITI, 1978, 212 p.

3. Danilchenko V.P., Postnikov A.M., Tsybizov Yu.I. et al. *Proektirovanie aviatsionnykh gazoturbinykh dvigateley* [Designing aviation gas-turbine engines]. Samara: Izdatelstvo SNTs RAN, 2008, 620 p.
4. Inozemtsev A.A., Nikhamkin M.A., Sandratskiy V.L. *Osnovy konstruirovaniya aviatsionnykh dvigateley i energeticheskikh ustanovok* [Design principles of aviation engines and power plants]. Moscow, Mashinostroyeniye, 2008, vol. 2, 368 p.
5. Inozemtsev A.A., Konyaev E.A., Medvedev V.V., Neradko A.V., Ryasov A.E. *Aviatsionnyy dvigatel PS-90A* [Aviation engine PS-90A]. Moscow, Libra-K, 2007, 320 p.
6. Komov A.A. Otsenka zashchishchennosti dvigateley PD-14 ot povrezhdeniy po storonnimi predmetami na samolete MS-21 [Estimation of engine PD-14 damage protection from foreign objects on airplane MS-21]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiyskoy akademii nauk*, 2016, vol. 18, no. 4(3), pp. 586-591.
7. Komov A.A. Effektivnost primeneniya reversivnykh ustroystv [Efficiency of reversing device application]. *Nauchnyy vestnik GosNIIGA. Seriya Ekspluatatsiya vozdushnogo transporta i remont aviatsionnoy tekhniki. Bezopasnost poletov*, 2005, no. 90(8), pp. 165-170.
8. Komov A.A., Yurin S.P. Uroven zashchishchennosti aviatsionnykh dvigateley otechestvennykh vozdushnykh sudov ot povrezhdeniy postoronniimi predmetami [Protection level of domestic aircraft engines from foreign object damage]. *Nauchnyy vestnik GosNIIGA*, 2014, no. 4, pp. 42-48.
9. Bekurin D.B., Umpeleva O.A., Kopysov D.V. Ispolzovanie chislennykh metodov pri aerodinamicheskom proektirovanii reversivnogo ustroystva reshetchatogo tipa dlya perspektivnogo TRDD [Using numerical methods in aerodynamic design of reversing device of lattice type for promising bypass turbojet engine]. *III International konferentsiya «Aviadvigateli XXI veka»*. Moscow, TsIAM imeni P.I. Baranova, 30 November – 3 December, 2010, pp. 1482-1485.
10. Svyatogorov A.A., Popov K.N., Khvostov N.I. Ustroystva dlya otkloneniya reaktivnoy strui turboreaktivnykh dvigateley [The device for deflection of a jet of turbojet engines]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1968, 239 p.
11. Varsegov V.L. Techenie potokov reversirovannogo TRDD. Matematicheskoe modelirovaniye i eksperimentalnoye issledovaniye [Flows in reverse bypass turbojet engine]. LAMBERT Academic Publishing GmbH, 2011, 240 p.
12. Varsegov V.L., Shabalin A.S. Chislennoye opredeleniye gazodinamicheskikh kharakteristik reshetok s razlichnymi uglami otkloneniya vykhodnykh kromok prodolnykh reber reversivnogo ustroystva perspektivnogo gazoturbinnogo dvigatelya [Numerical determination of gas-dynamic characteristics of lattices with variable angles of the output edge of the longitudinal rib of reversing device of promising gas turbine engine]. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*, 2017, no. 2, pp. 43-49.
13. Baturin O.V., Baturin N.V., Matveev V.N. Postroyeniye raschetnykh modeley v preprotssessore Gambit universalnogo programmnogo kompleksa Fluent. Uchebnoye posobie. [Computational modeling based on Gambit processor in software Fluent. Tutorial]. Samara, Samarskiy gosudarstvennyy aerokosmicheskiy universitet, 2009, 172 p.
14. Varsegov V.L., Shabalin A.S. Vybor optimalnoy modeli turbulentnosti pri chislennom modelirovanii techeniya v ustroystve reversirovaniya tyagi TRDD reshetchatogo tipa [Choice of the optimal turbulence model for numerical simulation of flow in thrust reverser of bypass turbojet engine]. *Izvestiya vuzov. Aviatsionnaya tekhnika*, 2015, no. 4, pp. 117-120.
15. Baturin O.V., Baturin N.V., Matveev V.N. Raschet techeniy zhidkostey i ga-zov s pomoshchyu universalnogo programmnogo kompleksa Fluent. Uchebnoye posobie [Computation of fluids and gases by software Fluent. Tutorial]. Samara, Samarskiy gosudarstvennyy aerokosmicheskiy universitet, 2009, 151 p.
16. Portnov A.D. Vliyaniye vneshnego obduva na kharakteristiki modulnogo reversivnogo ustroystva [Influence of incoming flow on characteristics of the modular reversing device]. *Trudy TsIAM*, 1982, no. 1006, pp. 1-6.

Об авторах

Шабалин Алексей Сергеевич (Казань, Россия) – аспирант кафедры «Реактивные авиационные двигатели и энергетические установки» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10).

Варсегов Вадим Львович (Казань, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Реактивные авиационные двигатели и энергетические установки» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева (420111, г. Казань, ул. К. Маркса, д. 10, e-mail: varsegov@mail.ru).

About the authors

Alexey S. Shabalin (Kazan, Russian Federation) – Postgraduate Student, Department of Jet Propulsion Engines and Power Plants, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev (10, K. Marx st., Kazan, 420111, Russian Federation).

Vadim L. Varsegov (Kazan, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Jet Aviation Engines and Power Plants, Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev (10, K. Marx st., Kazan, 420111, Russian Federation, e-mail: varsegov@mail.ru).

Получено 18.04.2017