

УДК 621.45.02.024

В. В. ЛОГИНОВ¹, К. А. ТОЦКАЯ², С. В. КИРНАЖИЦКИЙ¹¹ *Харьковский национальный университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Харьков*² *ГП “Ивченко-Прогресс”, Запорожье*

ВЫБОР СТЕПЕНИ ДВУХКОНТУРНОСТИ ДВИГАТЕЛЯ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ РЕГИОНАЛЬНОГО САМОЛЁТА

В статье приведены результаты сравнения расчетных лётно-технических характеристик регионального самолёта с помощью разработанного модульного программного комплекса. Исследовались два региональных самолёта с пассажировместимостью 102 и 120 человек. В состав силовой установки входили двигатели с разной степенью двухконтурности. За основной критерий сравнительного анализа принимался общий расход топлива за полётный цикл. Исследована возможность модернизации самолётов размерности E-190/195E2 и E-170/175E2, но другой аэродинамической схемы. Показано, что в дальнейших исследованиях необходимо провести анализ ремоторизации малых региональных самолётов типа CRJ200 и EMB-135/140/145.

Ключевые слова: региональный самолёт, авиакомпания, двигатель, силовая установка, ремоторизация, степень двухконтурности, эксплуатационные характеристики, лётно-технические характеристики.

Введение

В настоящее время авиакомпании Boeing и Airbus являются крупнейшими производителями самолётов в мире и глобальными конкурентами друг друга [1]. Эти авиастроительные объединения поделили мировой рынок магистральных самолётов почти поровну. В сегменте дальних широкофюзеляжных машин подобная ситуация может сохраниться надолго. Компании развивают новые проекты: Boeing 787, Airbus A350XWB и A380, также продолжается модернизация семейства Boeing 767 и 777 [1, 2], Airbus A330 и A340 [1, 3]. Создание какого-либо альтернативного проекта в данном сегменте не только потребует больших ресурсов, но и окажется при прогнозируемом спросе экономически неоправданным.

На рынке региональных самолётов ситуация немного другая и в последнее время демонстрирует уверенное развитие разными авиакомпаниями, например, Embraer, Bombardier, AVIC, SAAB, ATR, BAЕ Systems, Fokker, Fairchild Dornier, “Антонов”, “Гражданские самолёты Сухого”, DASA и др. Но из-за мирового финансового кризиса на рынке региональных самолётов смогли сохранить свое развитие бразильская компания Embraer [4] и канадская Bombardier [5]. Эти компании ожидают увеличения объёма продаж региональных самолётов в ближне-среднесрочной и среднесрочной перспективах на основе замены устаревающих самолётов в парках американских региональных перевозчиков. Кроме того, в отличие от прошлых лет в ближайшие годы рынком

будут преимущественно востребованы более вместительные региональные самолёты, что объясняется меньшими затратами на эксплуатацию таких машин. Каждая авиакомпания старается удержать свою долю на рынке коммерческих авиалайнеров, на который выходят новые авиастроительные компании из России, Китая, Индии и Японии [1]. Аналитики отмечают, что основной стратегией авиастроителей является разработка таких технологий, которые позволили бы в будущем снизить затраты на эксплуатацию самолетов конечными эксплуатантами, а также сократить расходы на обслуживание двигателей и увеличение их надежности. Особое внимание уделяется топливной эффективности самолётов, что связано с выбором двигателя силовой установки. Это обуславливает актуальность задачи выбора двигателя силовой установки для современного регионального самолёта.

Постановка задачи. Данная статья посвящена решению комплекса задач, связанных с выбором двигателя силовой установки, обеспечивающего рациональные эксплуатационные характеристики регионального самолёта. С этой целью необходимо провести расчёт аэродинамических и лётно-технических характеристик регионального самолёта [6].

Анализ последних исследований и публикаций. Бразильская компания хотела начать разработку узкофюзеляжного самолёта в 2011 году, однако отказалась от конкуренции с Boeing и Airbus в сегменте авиалайнеров вместимостью 130 человек. Здесь представлены такие модели, как B737MAX,

B737NG, A319NEO и A320NEO [2, 3]. К тому же на этот сегмент нацелены и новые пассажирские самолёты Bombardier CS300 [5].

Вместо создания нового узкофюзеляжного самолета руководство компании Embraer приняло решение о проведении ремоторизации лайнеров семейства E-jet, которые занимают сегмент коммерческих самолётов вместимостью менее 120 человек. Запуск в эксплуатацию новых воздушных судов E-jet запланирован на 2018 год. Но вполне очевидно, что в среднесрочной и долгосрочной перспективах Embraer не станет отказываться от борьбы за долю в сегменте воздушных судов вместимостью от 130 до 150 человек, поскольку новые самолеты Boeing и Airbus будут ориентированы на сегмент авиалайнеров вместимостью от 150 до 220 человек.

В настоящее время Embraer изучает множество различных вариантов модернизации своих самолётов, включая возможность установки нескольких моделей двигателей следующего поколения. Кроме того, специалисты бразильской компании изучают другие способы модернизации будущих самолётов помимо использования новых силовых установок. В числе рассматриваемых вариантов модернизации отмечается использование полностью нового крыла и увеличение высоты стоек шасси, что позволило бы установить на самолёт двигатели с высокой степенью двухконтурности, которые могли бы обеспечить снижение расхода топлива на 10 % по сравнению с существующими моделями. Также на ремоторизованных лайнерах семейства E-jet могут появиться композитные винглеты и электронная система управления рулением.

Выбор новых двигателей для лайнеров E-jet будет непростым из-за давних партнерских отношений с компанией General Electric, которая поставляет двигатели CF34-8 для самолетов E-170/175 и CF34-10 для E-190/195. Кроме того, General Electric ведет разработку нового двигателя NG34 для будущих региональных самолётов. Однако на рынке есть и другие предложения, в числе которых редукторные турбовентиляторные двигатели PW1000G от компании Pratt&Whitney, выбранные для узкофюзеляжных самолетов Airbus A320NEO, MC-21, а также для региональных Bombardier CSeries и Mitsubishi Regional Jet. Компания Rolls-Royce и ГП «Ивченко-Прогресс» также заинтересована в поставках двигателей для региональных самолётов. Таким образом, у Embraer есть достаточно большой выбор двигателей, которые позволят сделать лайнеры E-jet более эффективными.

Целью статьи является сравнительный анализ расчётных данных современного регионального самолёта с разными двигателями в составе силовой установки.

Основная часть исследований

В качестве исследуемого объекта выбрана модифицированная схема регионального самолета типа Fokker 100 [7], Ту-334 [8], Bombardier CRJ-1000 [5]. Аэродинамическая схема модифицированного регионального самолета представляет собой низкоплан с задним расположением двух двигателей, со стреловидным крылом и Т-образным хвостовым оперением [9, 10]. Крыло образовано сверхкритическими профилями, на концах крыла установлены специально спрофилированные поверхности для снижения индуктивного сопротивления [11]. В конструкции самолёта широко применены современные композиционные материалы и сплавы. Шасси трёхопорное с носовой стойкой. Силовая установка включает два маршевых ТРДД и вспомогательную силовую установку.

Расчетные исследования лётно-технических характеристик модифицированного регионального самолёта с разными двигателями в составе силовой установки проведены для двух случаев:

1. Самолёт с пассажироместимостью 102 человека (вариант самолета ЛА-1).

2. Самолёт пассажироместимостью 120 человек (вариант самолета ЛА-2).

Оба самолёта исследовались на два полётных цикла, которые отличаются по времени полёта. При исследованиях принимались допущения:

– геометрия пилонов одинакова, следовательно, влияние фюзеляжа на прирост сопротивления мотогондолы не учитывается;

– при учёте прироста сопротивления фюзеляжа от мотогондол в хвостовой части учитывается только количество двигателей. Следует отметить, что прирост сопротивления по сравнению с размещением двигателей на крыле значителен;

– изменение градиента и времени набора высоты (снижения) не учитывается.

Площадь крыла у модификации ЛА-2 увеличилась изменением хорды, фюзеляж удлинился на 3 метра, взлётный вес увеличивался в соответствии с законом “квадрата-куба”, то есть, на 3300 кг. При этом запас топлива полагался неизменным.

Аэродинамическое качество самолёта в расчете получилось меньше на $\approx 0,5$ единицы, чем по имеющимся расчетным данным, и несколько смещено в область больших C_{ya} . Причина – не учтено влияния аэродинамической и геометрической крутки крыла на полярю (данные по набору применяемых профилей отсутствуют).

Угол набора высоты полагается малым, что позволяет использовать значения потребных и располагаемых тяг для горизонтального полета. Набор высоты осуществляется на максимальном угле на-

бора высоты, при котором избыток тяги максимальный (то есть при скорости, близкой к наивыгоднейшей, что соответствует максимальному аэродинамическому качеству самолёта).

Основные массовые и геометрические данные двигателей [12] приведены в табл. 1.

Таблица 1
Характеристики исследуемых СУ

Название параметра	Д-1	Д-2	Д-3	Д-4
Степень двухконтурности двигателя	5	8	9	10
Масса МДУ, кг	2239	2342	2435	2505
Длина мотогондолы, м	4,530	4,0710	4,531	4,132
Диаметр вентилятора, м	1,392	1,53	1,62	1,695
Диаметр миделевого сечения мотогондолы, м	1,945	1,884	1,975	2,049
Сужение носовой части мотогондолы	0,736	0,861	0,775	0,874
Сужение кормовой части мотогондолы	0,701	0,891	0,656	0,893
Удлинение мотогондолы	2,393	2,161	2,294	2,017

При проведении исследований набор высоты разбивался на этапы, в пределах которых тяговооружённость самолёта полагалась постоянной и равной тяговооружённости самолёта на средней высоте участка. Общее время набора высоты определялось суммированием времени выполнения указанных этапов. При определении градиента набора высоты при отключившем двигателе сопротивление авторотации полагалось равным 10 % от тяги двигателя.

Результаты расчётов для самолёта ЛА-1 представлены в табл. 2, а для самолёта ЛА-2 - в табл. 3.

Проведены расчётные исследования по определению дальности полёта. Исследования лётно-технических характеристик самолётов проведены для двух случаев с разным весовым балансом (табл. 4) для двух модификаций самолетов.

Обе модификации самолётов исследовались на один полётный цикл, который обеспечивает максимальную практическую дальность полёта регионального самолёта (табл. 5). За основной критерий сравнительного анализа принимается общий расход топлива за полётный цикл.

При исследованиях принимались допущения:

– масса топлива на ЛА остается постоянной для

двух расчетных вариантов, поскольку неизвестно как изменилась емкость топливных баков;

– влияние изменения массы силовой установки не учитывалось;

– расчет изменения массовых данных ЛА проводился из условий стандартной спецификации для ЛА-1: масса 1 пассажира с ручной кладью – 80 кг; масса багажа 1 пассажира – 15 кг; масса продуктов и воды на 1 пассажира – 1,1 кг.

Перспективы дальнейших исследований

На сегодняшний день эксплуатируется несколько типов авиалайнеров рассмотренной аэродинамической схемы, в основном это: CRJ-1000, Fokker 100 и выходит в эксплуатацию самолет ARJ21. Так же эксплуатируется большое количество самолётов несколько меньшей размерности типа CRJ-700. Ремоторизация или модернизация самолетов Fokker 100 маловероятна, ввиду устаревшей конструкции самого ЛА. В тоже время модернизация самолётов типа CRJ-1000, CRJ-700 и ARJ21 с заменой двигателя теоретически возможна. На сегодняшний день в эксплуатации находится только более 230 самолетов CRJ-700/1000.

Как говорилось выше, резкое повышение экономичности магистральных авиалайнеров (B737MAX, A-320NEO, A-321NEO, C919, MC-21) и разработка нового поколения больших региональных самолетов (CS100, MRJ) заставила провести модернизацию самолётов семейства E-jet компании Embraer и появилось семейство самолётов E-190/195E2, E-170/175E2. В статье показана возможность модернизации самолётов аналогичной размерности, но другой аэродинамической схемы. В тоже время существует класс малых региональных реактивных самолётов, таких как CRJ200 и EMB-135/140/145. На сегодня их находится в эксплуатации около 1600 штук.

Повышение топливной экономичности больших региональных самолётов приведет к большому разрыву между эффективностью малых и больших региональных самолётов. Это приведет к определенному дисбалансу в планировании работ региональных авиакомпаний и потребует провести модернизацию малых региональных самолётов. Эти самолеты по аэродинамической схеме подобны CRJ-1000, CRJ-700 и ARJ21. Поэтому в дальнейших исследованиях необходимо провести анализ влияния повышения степени двухконтурности (ремоторизации) для малых региональных самолётов с учетом их особенностей эксплуатации.

Таблица 2

Результаты расчётов лётно-технических характеристик самолёта ЛА-1

Самолет ЛА-1	Д-1		Д-2		Д-3		Д-4	
	Малый профиль	Большой профиль						
Общая протяженность маршрута, км	1184,7	2497	1182,8	2494,8	1186,6	2498,6	1188	2500,1
Общее время полета, мин	111,1	207	110,9	206,9	111,2	207,2	111,3	207,2
Расход топлива, кг	3607	6232	3141	5863	3170	5711	3242	5491
Остаток топлива, кг	5933	3308	6165	3443	5520	2979	5448	3199
Дистанция разбега, м	1602	1602	1311	1311	1348	1348	1159	1159
Потребная дистанция разбега, м	2323	2323	1900	1900	1955	1955	1681	1681
Дистанция прерванного взлета, м	2486	2522	2250	2250	2215	2215	2043	2079
Дистанция продолженного взлета, м	2500	2500	2016	2016	2078	2078	1771	1771
Длина пробега с реверсом, м	791	815	828	828	780	780	791	815
Длина пробега без реверса, м	1016	1016	1016	1016	1016	1016	1016	1016
Время набора высоты, мин	24,80	24,78	24,61	24,61	24,92	24,92	25,01	24,95

Таблица 3

Результаты расчётов лётно-технических характеристик самолёта ЛА-2

Самолет ЛА-2	Д-1		Д-2		Д-3		Д-4	
	Малый профиль	Большой профиль						
Общая протяженность маршрута, км	1213,7	2526,1	1211,3	2523,3	1216,1	2528,1	1217,9	2530
Общее время полета, мин	113,5	209,4	113,2	209,2	113,6	209,6	113,7	209,7
Расход топлива, кг	3748	6461	3267	6064	3289	5897	3361	5680
Остаток топлива, кг	5792	3079	6039	3242	5401	2793	5329	3010
Дистанция разбега, м	1747	1747	1425	1425	1466	1466	1258	1258
Потребная дистанция разбега, м	2534	2534	2066	2066	2126	2126	1824	1824
Дистанция прерванного взлета, м	2629	2663	2358	2358	2332	2332	2140	2173
Дистанция продолженного взлета, м	2755	2755	2208	2208	2278	2278	1934	1934
Длина пробега с реверсом, м	784	806	817	817	773	773	784	806
Длина пробега без реверса, м	986	986	986	986	986	986	986	986
Время набора высоты, мин	27,21	27,18	26,98	26,98	27,36	27,36	27,48	27,42

Выводы по исследованию

Таким образом, из полученных результатов

предварительных исследований самолёта ЛА-2 видно, что силовая установка с двигателями со степенью двухконтурности $m=10$ лучше по параметрам

расхода топлива.

Для дальнейших исследований и проработок силовой установки для региональных самолётов следует выбрать двигатель типа PW1500G или АИ-28. А также провести анализ влияния степени двухконтурности на топливную эффективность малых региональных самолетов.

Таблица 4

Весовые данные ЛА

Самолёт	ЛА-1	ЛА-2
Масса ЛА взлетная, кг	46340	49640
Масса планера и систем управления, кг	19672	21242
Масса силовой установки, кг	4478	4478
Масса экипажа, оборудования и снаряжения, кг	1650	1670
Масса топлива, кг	9540	9540
Масса коммерческой нагрузки, кг	11000	12710

Таблица 5

Результаты расчёта практической дальности полёта ЛА

Двигатель	Практическая дальность полёта ЛА	
	ЛА-1	ЛА-2
Д-1	3132,5	3044,1
Д-2	3368,1	3277,0
Д-3	3515,4	3420,5
Д-4	3607,1	3507,2

Литература

1. Конкуренция между Airbus и Boeing [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://ru.wikipedia.org/wiki/Конкуренция_между_Airbus_и_Boeing. – 12.04.2016.
2. Commercial Aircraft Boeing [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.boeing.com/commercial>. – 21.05.2016.
3. Пассажирские самолёты AIRBUS [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a320family>. – 23.03.2016.
4. Commercial Aircraft EMBRAER [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.embraer.com/en-US/Aeronaves/Pages/Home>. – 10.04.2016.
5. Commercial Aircraft [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.bombardier.com/en/>

[aerospace/commercial-aircraft.html](http://www.aerospace/commercial-aircraft.html). – 25.02.2016.

6. Логинов, В. В. Программный комплекс по формированию эксплуатационных характеристик двигателя силовой установки самолета [Текст] / В. В. Логинов // *Авіаційно-космічна техніка та технологія*. – 2015. – №9 (126). – С. 149-152.

7. Самолёт Fokker-100 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.airlines-inform.ru/commercial-aircraft/Fokker-100.html>. – 10.04.2016 г.

8. История проекта самолета Ту-334 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/147810>. – 18.09.2011.

9. Проектирование самолетов [Текст] / С. М. Егера, В. Ф. Мишин, Н. К. Лисейцев [и др.] ; под ред. С. М. Егера. – М. : Машиностроение, 1983. – 616 с.

10. Торенбик, Э. Проектирование дозвуковых самолетов [Текст] / Э. Торенбик. – М. : Машиностроение, 1983. – 648 с.

11. Самолет Ту-334. Руководство по летной эксплуатации [Текст]. – М. : Атмосфера, 2007. – 197 с.

12. Турбореактивный двухконтурный двигатель АИ-28 [Текст] : техн. отчет / рук. Г. Р. Крицын ; исполн.: А. В. Еланский, О. С. Тертышный, В. И. Колесников [и др.]. – Запорожье : ГП “Ивченко-Прогресс”, 2012. – 156 с. – № 32/2012-28. – Инв. № 675483.

References

1. Konkurenciya mezhdru Airbus i Boeing [Concurrence between Airbus and Boeing]. [The global pharmaceutical industry]. Available at: https://ru.wikipedia.org/wiki/Konkurenciya_mezhdru_Airbus_i_Boeing. (accessed 12.04.2016).
2. Commercial Aircraft BOEING [The global pharmaceutical industry]. Available at: <http://www.boeing.com/commercial>. (accessed 21.05.2016).
3. Passazhirskie samolety AIRBUS [AIRBUS passenger airplanes]. [The global pharmaceutical industry]. Available at: <http://www.airbus.com/aircraftfamilies/passengeraircraft/a320family>. (accessed 23.03.2016).
4. Commercial Aircraft EMBRAER [The global pharmaceutical industry]. Available at: <http://www.embraer.com/en-US/Aeronaves/Pages/Home>. (accessed 10.04.2016).
5. Commercial Aircraft [The global pharmaceutical industry]. Available at: <http://www.bombardier.com/en/aerospace/commercial-aircraft.html>. (accessed 25.02.2016).
6. Loginov, V. V. Programmnyi kompleks po formirovaniyu ekspluatatsionnykh kharakteristik dvigatelya silovoi ustanovki samoleta [Software for forming

of operational performance of engine aircraft power plant]. *Aviatsiino-kosmichna tekhnika ta tekhnologiya*, 2015, no. 9 (126), pp. 149-152.

7. *Samolet Fokker-100* [Fokker-100 airplane]. [The global pharmaceutical industry]. Available at: <http://www.airlines-inform.ru/commercial-aircraft/Fokker-100.html> (accessed 10.04.2016).

8. *Istoriya proekta samoleta Tu-334* [Tu-334 airplane project history]. [The global pharmaceutical industry]. Available at: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/147810> (accessed 18.09.2011).

9. Eger, S. M. Mishin, V. F., Liseitsev, N. K. *Proektirovanie samoletov* [Airplane designing].

Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 616 p.

10. Torenvik, E. *Proektirovanie dozvukovykh samoletov* [Subsonic airplanes designing]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 648 p.

11. *Samolet Tu-334. Rukovodstvo po letnoi ekspluatatsii* [Tu-334 airplane. Flight maintenance manual]. Moscow, Aerosfera Publ., 2007. 197 p.

12. *Turboreaktivnyi dvukhkонтурnyi dvigatel' AI-28*. Tekhnicheskii otchet. [AI-28 turbofan. Technical report] ruk. Kritsyn, G. R. ; ispoln. : Elanskii, A. V., Tertysnyi, O. S., Kolesnikov, V. I. Zaporozh'e : GP "Ivchenko-Progress", 2012. 156 p. – № 32/2012-28. – Inv. № 675483.

Поступила в редакцию 12.05.2016, рассмотрена на редколлегии 16.06.2016

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. конструкции авиационных двигателей С. В. Епифанов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ВИБІР СТУПЕНЯ ДВОКОНТУРНОГО ДВИГУНА СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ РЕГІОНАЛЬНОГО ЛІТАКА

В. В. Логінов, К. А. Тоцька, С. В. Кирнажицький

У статті наведені результати порівняння розрахункових льотно-технічних характеристик регіонального літака за допомогою розробленого модульного програмного комплексу. Досліджувалися два регіональних літака з пасажиромісткістю 102 і 120 чоловік. До складу силової установки входили двигуни з різним ступенем двоконтурності. За основний критерій порівняльного аналізу приймалась загальна витрата палива за польотний цикл. Досліджено можливість модернізації літаків розмірності E-190/195E2 і E-170/175E2, але іншої аеродинамічної схеми. Показано, що в подальших дослідженнях необхідно провести аналіз ремоторизації малих регіональних літаків типу CRJ200 і EMB-135/140/145.

Ключові слова: регіональний літак, авіакомпанія, двигун, силова установка, ремоторизація, ступінь двоконтурності, експлуатаційні характеристики, льотно-технічні характеристики.

CHOOSE THE DEGREE OF BYPASS ENGINE PROPULSION SYSTEM FOR REGIONAL AIRCRAFT

V. V. Loginov, K. A. Totskaya, S. V. Kirnazhitskiy

The results of comparing the calculated flight performance of regional aircraft with the help of the developed modular software system. We studied two regional aircraft with a seating capacity of 102 and 120 people. The structure of the power plant were engines with varying degrees of bypass. For the main criterion for the comparative analysis of the received total fuel consumption over Flight cycle. The possibility of upgrading the planes of dimension E-190/195E2 and E-170/175E2, but a other aerodynamic configuration. It is shown that further research is necessary to analyze re-engine small regional aircraft such as CRJ200 and EMB-135/140/145.

Keywords: regional aircraft, an airline, the engine, the power plant, re-engine, bypass ratio, operational characteristics, performance characteristics.

Логінов Василь Васильевич – д-р техн. наук, ст. науч. сотр., начальник кафедры инженерно-авиационного факультета, Харьковский национальный университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба, Харьков, e-mail: login_w@ukr.net.

Тоцька Кристина Андреевна – инженер-конструктор, ГП "Ивченко-Прогресс", Запорожье.

Кирнажицкий Сергей Валерьевич – начальник учебного курса инженерно-авиационного факультета, Харьковский национальный университет Воздушных Сил им. Ивана Кожедуба.

Loginov Vasyl Vasyliievich – Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Chief of the Department of Engineering and Aviation Faculty, Kharkov National University Air Force named Ivan Kozhedub, Kharkov, e-mail: login_w@ukr.net.

Totskaya Kristina Andreevna – design engineer state enterprise "Ivchenko-Progress", Zaporozhye.

Kirnazhitskiy Sergey Valerievich – Chief of Training Course of Engineering and Aviation Faculty, Kharkov National University Air Force named Ivan Kozhedub.