

=====

ӘУЕ КӨЛІГІ ЖӘНЕ ТЕХНОЛОГИЯЛАР
ВОЗДУШНЫЙ ТРАНСПОРТ И ТЕХНОЛОГИИ
AIR TRANSPORT AND TECHNOLOGY

=====

МРНТИ 73.37.41

https://doi.org/10.53364/24138614_2024_33_2_1¹М.Е. Алексеева*, ¹Р.И. Алексеев¹Белорусская государственная академия авиации, г. Минск, Беларусь*E-mail: mariaalex.2017@mail.ru

**ДВУХКОНТУРНЫЕ ТУРБОРЕАКТИВНЫЕ ДВИГАТЕЛИ:
ИСТОРИЯ, ТЕНДЕНЦИИ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

Аннотация. В данной статье выполнен обзор эволюции двухконтурных турбореактивных двигателей, рассмотрено устройство современных авиадвигателей самолетов гражданской авиации, применяемые в их конструкции технические решения, материалы и технологии. В работе освещаются проблемы, возникающие при создании двигателей со сверхвысокой степенью двухконтурности, а также перспективы дальнейшего увеличения их энергоэффективности. Авторы делают вывод о том, что разработка авиадвигателей со сверхвысокой степенью двухконтурности, в том числе и винтовентиляторных, является ключевым направлением для достижения высокого КПД, топливной экономичности и экологичности авиационных силовых установок будущего.

Ключевые слова: двухконтурный турбореактивный двигатель, степень двухконтурности, энергоэффективность, турбовентиляторные авиадвигатели, композитные материалы, винтовентиляторные силовые установки.

Введение. Двухконтурный турбореактивный двигатель (ТРДД) – это газотурбинный реактивный двигатель (ГТД), создающий реактивную тягу посредством двух контуров: внутреннего (или газотурбинного) и внешнего (или вентиляторного). Дополнительным параметром, характеризующим этот тип ГТД, является степень двухконтурности (m). Она представляет собой отношение расхода воздуха в наружном контуре G_{II} к расходу воздуха во внутреннем контуре G_I ($m = G_{II} / G_I$). В зависимости от газодинамических и конструктивных особенностей такие ГТД подразделяются на:

- ТРДД малой степени двухконтурности ($m \leq 2$);
- со средней степенью двухконтурности ($m = 3 \dots 7$);

- имеющие высокую степень двухконтурности ($m = 8...12$).

Первые из вышеперечисленных по конструкции и характеристикам сходны с одноконтурными ТРД, тогда как большая часть тяги в ТРДД второго и третьего типов создается внешним контуром, в котором расположен вентилятор, поэтому такие двигатели называют турбовентиляторными [1, с. 23].

Основная часть. В настоящий момент ТРДД являются основным типом ГТД, применяемых в коммерческой авиации. По сравнению с ТРД двухконтурные двигатели, обладают большей тягой, меньшим удельным расходом топлива и уровнем шума. Оба варианта ГТД имеют одинаковый принцип работы, но главной особенностью двухконтурного двигателя является то, что часть тепловой энергии из внутреннего контура, преобразованная в механическую, передается во внешний и используется для вращения вентилятора, который, помимо своей основной функции – создания тяги, в свою очередь способствует охлаждению деталей внутреннего контура и повышению его термоэффективности. Такой энергообмен кардинально улучшает характеристики ТРДД по сравнению с ТРД.

Первый турбореактивный двигатель был спроектирован и запатентован в 1930 г. британским летчиком Ф. Уиттлом. Он имел многоступенчатый компрессор, камеру сгорания, одноступенчатую турбину и сопло. Однако первая концепция ТРДД, напоминающая современный авиадвигатель, была запатентована в 1941 г. знаменитым советским конструктором А. М. Люлькой (рис. 1).

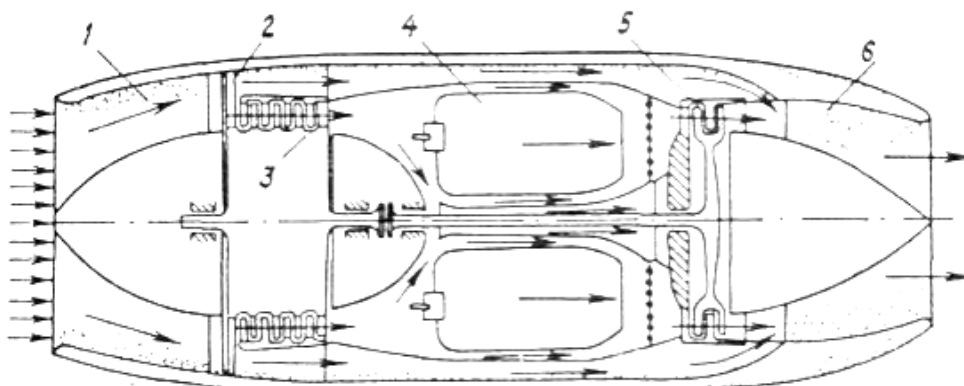


Рисунок 1. Схема ТРДД (из авторского свидетельства А. М. Люльки за № 312328. 25 от 22.04.1941 г.)

где 1 – входной диффузор; 2 – вентилятор; 3 – КВД; 4 – камера сгорания
5 – турбина; 6 – сопло.

Это был проект одновального ТРДД с одноступенчатым вентилятором. Воздух от вентилятора и горячий газ от турбины поступали в камеру смешения потоков, затем попадали в реактивное сопло создавая тягу. Отметим, что такая

конструкция характерна для современных ТРДД с малой степенью двухконтурности.

Современные ТРДД средней и высокой степени двухконтурности как правило выполняются по двухвальной схеме. Их основные особенности заключаются в следующем:

- одноступенчатый вентилятор без входного направляющего аппарата (ВНА) – такой вариант упрощает компоновку и снижает гидравлические потери на входе в двигатель;
- подпорный компрессор, обеспечивающий предварительное сжатие воздуха во внутреннем контуре и подачу его в компрессор высокого давления (КВД);
- наличие поворотных лопаток у ВНА и направляющих аппаратов начальных ступеней КВД;
- многоступенчатая низкооборотная турбина низкого давления (ТНД);
- как правило (при $m > 4$), укороченный наружный контур и в этом случае отсутствие камеры смешения потоков наружного и внутреннего контуров;
- использование реверсивного устройства, расположенного в наружном контуре [1, с. 54].

С начала 1970-х гг. эффективность турбовентиляторных двигателей значительно возросла, что обусловлено, в первую очередь, повышением термического КПД газогенератора, а также постоянным увеличением степени двухконтурности. Стратегия улучшения эффективности работы газогенератора, подразумевающая увеличение степени повышения полного давления в компрессоре и температуры воздуха на входе в камеру сгорания, внесла решающий вклад в рост КПД авиадвигателей. Однако, дальнейшие возможности применения различных конструктивных решений, таких как отбор воздуха для охлаждения лопаток и корпуса, разработка специальных материалов и покрытий для высокотемпературных компонентов двигателя, а также уменьшения зазоров между деталями газогенератора, при текущем уровне развития технологий, уже практически исчерпаны, поэтому дальнейшее повышение как тяговой, так и топливной эффективности авиадвигателей должно в основном основываться на других технологических стратегиях.

За весь период развития ТРДД производилось постепенное увеличение степени их двухконтурности, которое было направлено на снижение скорости истечения газоздушного потока из сопла за счёт увеличения расхода воздуха во внешнем контуре двигателя. ТРДД с малой степенью двухконтурности ($m \leq 2$), первоначально использовавшиеся в 1970-х годах для коммерческих авиалайнеров, в 80-х годах превратились в ТРДД со средней ($m \leq 4$), потом большой степенью двухконтурности ($m \leq 8$) в конце 90-х и, наконец, достигли степени двухконтурности $m \leq 12$ в 2010-х.

Согласно прогнозам международной консалтинговой компании *Mordor Intelligence*, ожидается, что рынок двигателей для авиации общего назначения увеличится с 5,57 млрд в 2022 г. до 5,71 млрд долл. США в 2028 г., при этом среднегодовой темп роста в течение прогнозируемого периода составит 0,69%. Поскольку во всем мире большинство самолетов авиации общего назначения оснащены турбовентиляторными двигателями, именно они продемонстрируют самый высокий рост, по сравнению с другими видами авиадвигателей, благодаря глобальным инвестициям, направленным на увеличение размера существующего парка гражданской авиации, связанного с повышением количества туристических и деловых авиаперелетов, возрастанием располагаемого дохода людей и развитием авиационной инфраструктуры [2].

Устойчивый рост в секторе коммерческих авиаперевозок, а также постоянно ужесточающиеся требования к энергоэффективности и снижению вредного воздействия на окружающую среду, заставили крупнейших игроков рынка авиадвигателей, таких как *Rolls-Royce*, *Safran*, *General Electric* и *Pratt&Whitney* вкладывать значительные финансовые средства в исследования, проектирование и разработки, нацеленные на дальнейшее улучшение топливной экономичности и экологических показателей силовых установок.

Одним из жизнеспособных перспективных технологических путей для достижения вышеуказанных целей является разработка и применение двигателей со сверхвысокой степенью двухконтурности ($m \geq 13$) для самолетов ближайшего будущего. Однако, дальнейшее увеличение степени двухконтурности, направленное на повышение тягового КПД и топливной экономичности, поставило перед разработчиками ряд задач по преодолению некоторых аэродинамических и механических эксплуатационных ограничений, таких как: увеличение аэродинамического сопротивления и массы двигателя (за счет увеличения диаметра вентилятора и, соответственно мотогондолы), управление стабильностью расхода воздуха, проходящего через газоздушный тракт, возможность интеграции двигателя, планера и крыла.

Большая часть из этих ограничений уже успешно преодолены благодаря инновационной архитектуре двигателей и необходимым технологическим решениям, таким как вентиляторы изменяемого шага с редуктором, поворотные лопатки направляющих аппаратов компрессоров широкое использование сверхлегких материалов и аддитивных технологий в производстве компонентов [3].

В начале 1980-х гг. компания *General Electric* в сотрудничестве с *Snecma* начала разработку экспериментального винтовентиляторного реактивного двигателя *GE36* (рис. 2).



Рисунок 2. Экспериментальный авиадвигатель *GE36* во время наземных испытаний

Уникальной особенностью этой конструкции являлся двухступенчатый открытый вентилятор с противоположным вращением роторов. Оба ротора вентилятора диаметром около 3,7 м были оснащены лопастями из композитного материала, обеспечивающими номинальную тягу в 110 кН. Такая компоновка, согласно результатам наземных и летных испытаний, позволила достичь степени двухконтурности $m = 32$ (в несколько раз большей, чем $m \leq 6$ у современных на тот момент ТРДД). Однако, сравнительно высокий уровень шума и вибраций новой схемы, снижение цен на нефть (при котором отпала необходимость в экономии топлива) наряду с другими техническими вопросами, привели к тому, что к концу 80-х все работы над двигателями этого типа были свернуты [4].

Проект был возобновлен спустя 30 лет. В 2021 г. совместное предприятие *CFM International* объявило о запуске программы *RISE* по разработке винтовентиляторных двигателей нового поколения (рис.4).

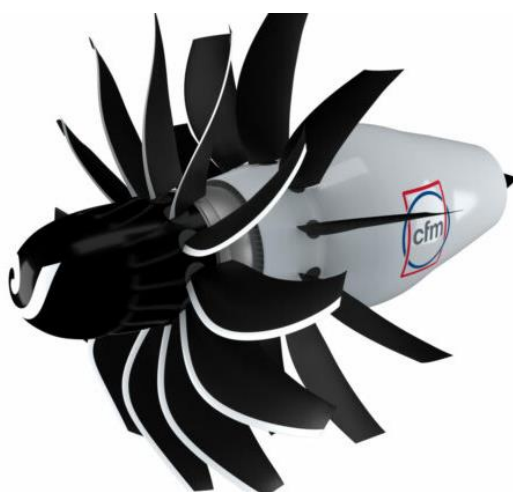


Рисунок 3. Модель турбовинтовентиляторного двигателя *CFM RISE*

Первоначальная концепция включает применение одноступенчатого незакапотированного вентилятора с композитными лопастями и изменяемым шагом совместно со статором, состоящим из комплекта поворотных направляющих лопаток, что позволит снизить уровень шума до приемлемых значений, а также сократить расход топлива и выбросы CO_2 на 40% по сравнению с двигателями, которые использовались ранее.

Таковыми силовыми установками планируется оснащать перспективные модели самолетов как *Airbus*, так и *Boeing*, сделавших ставку на принципиально разные виды топлива: европейский авиапроизводитель серьезно изучает возможность применения водородного топлива, американский делает ставку на возобновляемые источники энергии (экологичное авиационное топливо *SAF*) [5].

Применение вентилятора большого диаметра в современных ТРДД с высокой степенью двухконтурности, как уже было отмечено, ставит перед конструкторами ряд сложных технических задач. Рассмотрим подробнее способы их решения на примере современных ТРДД *CFM LEAP-1A* и *PW 1100G* (рис. 4).

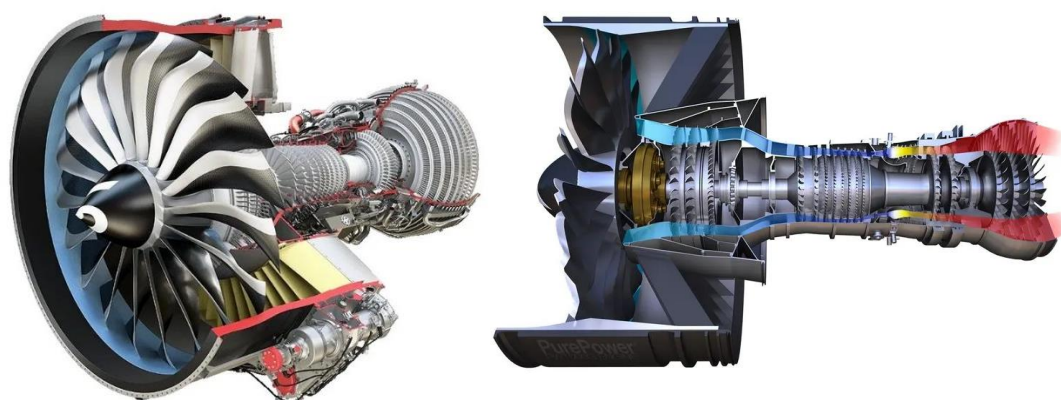


Рисунок 4. Продольный разрез ТРДД *CFM LEAP-1A* (слева) и *PW 1100G* (справа)

Прежде всего, увеличение диаметра ротора вентилятора приводит к увеличению веса двигателя из-за необходимости использования лопаток вентилятора, корпуса двигателя и мотогондолы большего размера. Кроме этого, низкая скорость вращения вентилятора требует от ТНД обеспечения высокого крутящего момента для поддержания необходимого уровня ее мощности. Подобная цель может быть достигнута путем проектирования классической многоступенчатой (обычно 7 и более ступеней) осевой турбины большого диаметра, которая и используется в конструкции двигателя *LEAP-1A* и соответственно увеличивает его массу. Это потребовало от разработчиков оптимизации веса других компонентов, в том числе широкого применения композитных материалов при изготовлении вентилятора и его воздуховода (углепластики), кожухов ТВД (керамикоматричные композиты).

Альтернативный способ привода роторов вентиляторов большого диаметра был предложен компанией *Pratt&Whitney*. В модели *PW1100G* вентилятор подсоединен к валу ТНД через планетарный редуктор. Это позволяет ротору ТНД вращаться с более высокой скоростью, чем вентилятор, однако развивая при этом меньший крутящий момент. Для его увеличения, конструкция ТНД была значительно упрощена (до трех ступеней по сравнению с семью, используемыми на *LEAP-1A*), что существенно снизило ее размеры и массу и в конечном итоге нивелировало прибавку в весе двигателя за счет применения планетарного редуктора. Однако данная компоновка имеет и ряд недостатков. Редуктор обладает большим тепловыделением за счет компактности и высоких передаваемых мощностей. Кроме этого, редуктор представляет собой дополнительный элемент, подверженный износу, что влияет на общий ресурс авиадвигателя, а наличие высокоскоростной ТНД обуславливает необходимость установки высокоскоростного КНД, поскольку оба компонента находятся на одном валу.

Наиболее экономичные на сегодняшний момент турбовентиляторные двигатели *LEAP-1A* или *PW1100G* объединяют в себе множество других конструктивных особенностей и современных материалов для компенсации увеличения их массы. К новейшим разработкам *CFM* относятся лопатки вентиляторов из углеродного композита, усиленные титановыми пластинами на передних кромках. Рабочие лопатки ТНД изготавливаются из интерметаллидного титано-алюминиевого сплава, более легкого и устойчивого к высоким температурам, а топливные форсунки – методом 3D-печати. Еще одним способом снижения массы двигателя является применение легких жаропрочных керамикоматричных композитов (*СМС*) для изготовления кожуха ТВД.

В свою очередь компания *P&W* при разработке *PW1100G* также использовала широкий спектр инноваций, направленных на снижение массы, таких как широкохордные пустотелые лопатки вентилятора из сверхлегкого алюминиевого сплава, композитные кожух и лопатки спрямляющего аппарата вентилятора. Хотя основное снижение веса все же было достигнуто за счет применения трехступенчатой высокоскоростной ТНД, приводящий в действие вентилятор через планетарный редуктор.

Необходимо отметить, что увеличение степени двухконтурности в современных турбовентиляторных двигателях вносит значительный вклад в их топливную экономичность и, соответственно, снижает их вредное воздействие на окружающую среду. Энергоэффективность авиадвигателей повышается и за счет увеличения теплового КПД внутреннего контура, который напрямую коррелирует с показателем степени повышения давления в компрессоре влияющего на полноту сгорания авиатоплива, сокращая его удельный расход. При большей степени повышения давления в компрессоре также увеличивается и степень понижения давления в турбине, которая в свою очередь позволяет

снизить температуру отработанных газов, следовательно, обеспечить меньшие теплотери и увеличить КПД газогенератора, что также сокращает удельный расход топлива. Кроме этого, для соответствия авиадвигателей перспективным требованиям в области защиты окружающей среды ведутся активные работы по внедрению экологичного авиационного топлива (*SAF*), разработке водородных, гибридных либо полностью электрических силовых установок.

С начала развития и на протяжении последних 50 лет конструкция ТРДД постоянно совершенствовалась с целью повышения их производительности и топливной эффективности, снижения эксплуатационных расходов и вредного воздействия на окружающую среду. Это подтверждаются данными, показывающими что современные наиболее совершенные ТРДД имеют удельный расход топлива на 60% меньше по сравнению с первым использующим эту архитектуру коммерческим авиадвигателем *Conway RCo. 12* ($m = 0,3$) [4].

Заключение. Можно сделать вывод, что радикальное улучшение характеристик ТРДД достигается во многом благодаря значительному увеличению параметров степени двухконтурности и степени повышения давления в компрессоре. Экспериментальные винтовентиляторные силовые установки (такие, как *GE36* и *RISE*) как уже было доказано при их испытаниях, имеют огромный потенциал для дальнейшего увеличения степени двухконтурности, а, следовательно, повышения топливной экономии и экологичности, даже по сравнению с наиболее эффективными на сегодняшний день турбовентиляторными двигателями.

Для решения конструктивных проблем, связанных с необходимостью высокого крутящего момента (и малой скорости вращения), для привода крупногабаритного вентилятора, применяются планетарные редукторы или многоступенчатые ТНД, что, как правило, приводит к увеличению общей массы авиадвигателя. Производители успешно справляются с этой проблемой благодаря применению легких композитных материалов и внедрению инновационных технологических решений, также способствующих увеличению тяги, снижению расхода топлива и уровня шума, улучшению надежности и долговечности ТРДД, что позволяет существенно снизить затраты на обслуживание и повысить безопасность полетов современных воздушных судов.

М.Е. Алексеева, Р.И. Алексеев

ЕКІ ТІЗБЕКТІ ТУРБОАГРЕГАТТАР: ТАРИХЫ, ТЕНДЕНЦИЯЛАРЫ ЖӘНЕ ДАМУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

Аңдатпа. Бұл мақалада айналма турбореактивті қозғалтқыштардың эволюциясына шолу жасалады, азаматтық авиация ұшақтарына арналған заманауи авиациялық қозғалтқыштардың конструкциясы, техникалық шешімдер, оларды жобалауда қолданылатын материалдар мен технологиялар

қарастырылады. Жұмыс өте жоғары айналма коэффициенттері бар қозғалтқыштарды жасау кезінде туындайтын проблемаларды, сондай-ақ олардың энергия тиімділігін одан әрі арттыру перспективаларын көрсетеді. Авторлар ультра жоғары айналып өту коэффициенттері бар авиациялық қозғалтқыштарды, соның ішінде пропфандық қозғалтқыштарды дамыту болашақ авиациялық электр станцияларының жоғары тиімділігіне, отын үнемдеуіне және қоршаған ортаға зиянсыздығына қол жеткізудің негізгі бағыты болып табылады деген қорытындыға келеді.

Түйін сөздер: айналма турбореактивті қозғалтқыш, айналып өту коэффициенті, энергия тиімділігі, турбोजелдеткіш ұшақ қозғалтқыштары, композиттік материалдар, пропфандық электр станциялары.

M.E. Alekseyeva, R.I. Alekseyev

BYPASS TURBOJET ENGINES: EVOLUTION, TRENDS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

Abstract. *This article provides an overview of the evolution of bypass turbojet engines, examines the structure of modern commercial aircraft engines, the engineering solutions, materials and technologies used in their design. The study highlights the problems that arise when creating ultra-high bypass ratio engines, and also presents the prospects for their further energy efficiency increase. The authors conclude that the development of ultra-high bypass ratio aircraft engines, including propfan ones, is a key direction for achieving high efficiency, fuel economy and environmental friendliness of future aircraft propulsion systems.*

Keywords: *bypass turbojet engine, bypass ratio, power efficiency, turbofan aircraft engines, composites, propfan propulsion systems.*

Список литературы

1. Дорошко С.М., Глазков А.С. Газотурбинные двигатели гражданской авиации: Уч. пособие/ Университет ГА. – Санкт-Петербург, 2018. – 228 с.
2. General Aviation Engines Market Size & Share Analysis - Growth Trends & Forecasts (2024 – 2029) [Electronic resource]. – URL: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/general-aviation-engines-market> (дата доступа: 07.04.2024).
3. Barbosa, F. Ultra High Bypass Ratio Engine Technology Review – The Efficiency Frontier for the Turbofan Propulsion. SAE Technical Paper 2021-36-0032, 2022. DOI: 10.4271/2021-36-0032
4. Kuropatwa, M. Turbofan engines efficiency, historical trends, and future prediction – A review / M. Kuropatwa, N. Wegrzyn, J. Kozuba. Safety & Defense. – 2022. – Vol. 8, № 2. DOI:10.37105/sd.186

5. Проект двигателя CFM с открытым ротором нацелен на перспективные разработки и Airbus и Boeing [Электронный ресурс]. – URL: <https://aeroo.ru/32732-proekt-cfm-dvigatelya-s-otkrytym-rotorom-nacelen-na-perspektivnye-razrabotki-i-airbus-i-boeing.html> (дата доступа: 25.01.2024).

References

1. Doroshko S.M., Glazkov A.S. Gas-turbine engines for Civil Aviation. Saint Petersburg, Universitet grazhdanskoi aviatsii, 2018, 228 p.

2. General Aviation Engines Market Size & Share Analysis – Growth Trends & Forecasts (2024 – 2029). Available at: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/general-aviation-engines-market> (accessed 07 April 2024)

3. Barbosa F. Ultra High Bypass Ratio Engine Technology Review – The Efficiency Frontier for the Turbofan Propulsion. *SAE Technical Paper 2021-36-0032*, 2022. DOI: 10.4271/2021-36-0032

4. Kuropatwa M., Wegrzyn N., Kozuba J. Turbofan Engines Efficiency, Historical Trends, and Future Prediction – A review. *Safety & Defense*, 2022, vol. 8, no. 2. DOI:10.37105/sd.186

5. Proekt dvigatelya CFM s otkrytym rotorom natselen na perspektivnye razrabotki i Airbus i Boeing [The open-rotor CFM engine project is aimed at promising developments by both Airbus and Boeing]. Available at: <https://aeroo.ru/32732-proekt-cfm-dvigatelya-s-otkrytym-rotorom-nacelen-na-perspektivnye-razrabotki-i-airbus-i-boeing.html> (accessed 25 January 2024) (in Russian)

Алексеева Мария Евгеньевна	старший преподаватель, Белорусская государственная академия авиации, г. Минск, 220096, Республика Беларусь, E-mail: mariaalex.2017@mail.ru
Алексеева Мария Евгеньевна	аға оқытушы, Беларусь мемлекеттік авиация академиясы, Минск, 220096, Беларусь Республикасы, E-mail: mariaalex.2017@mail.ru
Alekseyeva Mariya Yevgenjevna	senior lecturer, Belarusian State Academy of Aviation, Minsk ,220096, Republic of Belarus, E-mail: mariaalex.2017@mail.ru

Алексеев Роман Игоревич	курсант, Белорусская государственная академия авиации, г. Минск, 220096, Республика Беларусь, E-mail: alex_r84@inbox.ru
Алексеев Роман Игоревич	курсант, Беларусь мемлекеттік авиация академиясы, Минск, 220096, Беларусь Республикасы, E-mail: alex_r84@inbox.ru
Alekseyev Roman Igorevich	student, Belarusian State Academy of Aviation, Minsk ,220096, Republic of Belarus, E-mail: alex_r84@inbox.ru