

Р. П. ПРИДОРЖНЫЙ<sup>1</sup>, А. В. ШЕРЕМЕТЬЕВ<sup>1</sup>, А. П. ЗИНЬКОВСКИЙ<sup>2</sup><sup>1</sup> ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина<sup>2</sup> Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

## ВЛИЯНИЕ ПОЛЗУЧЕСТИ МАТЕРИАЛА НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЛОПАТОК СОПЛОВОГО АППАРАТА ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Создание авиационных газотурбинных двигателей, отвечающих современным требованиям по ресурсу, особенно его горячей части, требует не только более совершенных методов проектирования, но и анализа работоспособности и повреждаемости в течении ресурса с целью поиска резервов, направленных на повышение надежности. Одними из самых сложных и теплонпряженных узлов современного газотурбинного двигателя, являются лопатки соплового аппарата турбины высокого давления, непосредственно воспринимающие высокую температуру газа на выходе из камеры сгорания и имеющие развитую систему конвективно-пленочного охлаждения. Ресурс сопловых аппаратов современных авиационных газотурбинных двигателей может составлять десятки тысяч часов. При этом наработка на максимальном режиме может достигать только несколько сотен часов. Существует мнение, что повреждаемость сопловых лопаток на двигателе происходит в основном в жарких климатических зонах. Тем не менее, как показывает анализ расчетных исследований для современных авиационных газотурбинных двигателей такие утверждения ошибочны. Непосредственным следствием действия повышенных температур и высоких термических напряжений является ползучесть материала. Проведено расчетное исследование влияния ползучести материала лопаток соплового аппарата турбины высокого давления в различных условиях эксплуатации двигателя на их работоспособность. Показано, что с увеличением высоты полета рабочая температура сопловой лопатки начинает увеличиваться, и процессы ползучести ускоряются для всех климатических зон эксплуатации. Поскольку с увеличением высоты полета разница в температурах для разных климатических зон постепенно уменьшается, то на большой высоте, где температура в разных климатических зонах отличается незначительно, процессы релаксации напряжений протекают одинаково. При этом с увеличением температуры процессы ползучести протекают быстрее, и уровень напряжений, до которого происходит релаксация напряжений, становится ниже. Таким образом с повышением высоты полета повреждаемость в холодных условиях приближается к таковой в нормальных и жарких условиях, а на больших высотах может быть даже выше. Установлены закономерности влияния климатических условий и высоты полета на напряженность лопаток сопловых аппаратов турбин высокого давления и их работоспособность, на основании которых показана необходимость учета наработки двигателя в различных климатических условиях при определении ресурса сопловых лопаток.

**Ключевые слова:** сопловой аппарат; охлаждаемая лопатка; термические напряжения; ползучесть; релаксация напряжений; условия эксплуатации; работоспособность.

### Введение и постановка задачи

Опыт проектирования и эксплуатации высоко-температурных турбин современных авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) показывает, что дальнейшее повышение их ресурса невозможно без эффективной и безотказной работы сопловых аппаратов турбин.

Ресурс и долговечность сопловых аппаратов в условиях высокой температуры газа на выходе из камеры сгорания во многом зависит от их эффективного охлаждения. Из-за развитой системы конвективно-пленочного охлаждения лопатки сопловых аппаратов являются одними из наиболее сложных и

теплонпряженных узлов современных газотурбинных двигателей (рис. 1).

Влияние повышенных температур на работоспособность сопловых лопаток проявляется в ухудшении физико-механических свойств материала при одновременном их тепловом расширении и связанным с ним возникновением температурных напряжений. При этом следует отметить, что высокий уровень температур и скоростей газа, существенная кривизна поверхности пера сопловых лопаток турбин высокого давления негативно влияют на охлаждение входной и выходной их кромок. При интенсивном и неравномерном охлаждении сопловых лопаток возникают большие градиенты температур,

достигающие сотен градусов и высокий уровень термических напряжений.



Рис. 1. Элемент соплового аппарата турбины АГТД

Вышеперечисленные факторы могут привести к возникновению трещин и прогаров в лопатках сопловых аппаратов (рис. 2).

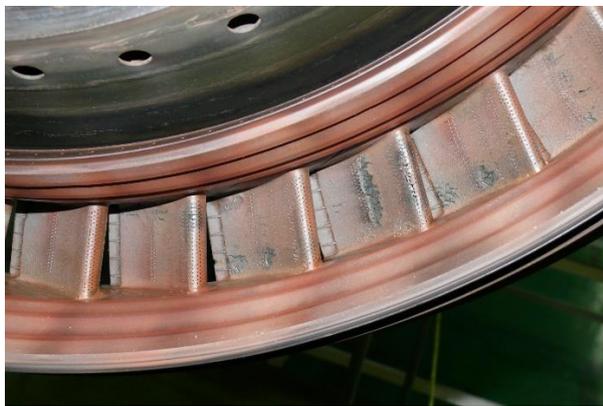


Рис. 2. Состояние сопловых лопаток после эксплуатации АГТД

Непосредственным следствием воздействия повышенных температур и высоких термических напряжений является ползучесть материала сопловых лопаток [1]. Ее развитие во времени приводит в процессе эксплуатации двигателя к значительному перераспределению напряжений в лопатках. При этом термические напряжения, как внутренне уравновешенные, уменьшаются, стремясь к полному исчезновению, а напряжения от газодинамических нагрузок уменьшаются в наиболее горячих зонах лопаток и по условиям равновесия возрастают в менее горячих. Это означает, что сопротивление ползучести материала высокотемпературных сопловых лопаток можно рассматривать как наиболее полной и удобной характеристикой их работоспособности [2 – 5].

Целью данной работы является расчетное исследование влияния сопротивления ползучести материала на работоспособность лопаток соплового аппарата турбин высокого давления при различных условиях эксплуатации АГТД.

## 1. Объект исследования, условия эксплуатации и его расчетная модель

Объектом исследования являлись лопатки сопловых аппаратов турбины высокого давления современных АГТД с температурой газа перед турбиной, достигающей  $T_g = 1800$  °К. Они изготавливаются из жаропрочного никелевого сплава с температурой применения материала лопатки до 1150 °С. Лопатки обладают конвективно-пленочной системой охлаждения. Она характеризуется наличием каналов, подающих охлаждаемый воздух в лопатки; дефлекторов, распределяющих охлаждаемый воздух во внутренней их полости; перфорационных отверстий, расположенных в соответствии с особенностями системы охлаждения по профилю пера и создающих пленку из охлаждаемого воздуха на внешней его поверхности, а также щелевых отверстий на корыте лопатки у выходной кромки для ее охлаждения (см. рис. 1).

Эксплуатация АГТД происходит в различных климатических зонах. Условно их можно разделить на холодные, нормальные и жаркие. В работе предполагалось, что холодной зоне соответствует температура окружающего воздуха в наземных условиях  $T_n = 0$  °С, нормальной –  $T_n = 15$  °С и жаркой –  $T_n = 30$  °С. Расчетное исследование сопротивления ползучести материала лопаток соплового аппарата турбин на их ресурс проводилось на максимальном режиме эксплуатации АГТД, поскольку основной вклад в их повреждаемость от ползучести вносит наработка именно на данном режиме. С другой стороны, рассматриваемый режим эксплуатации применяется на малой (несколько сотен метров) и большой высотах (несколько километров).

Как пример, на рис. 3 представлено распределение температур в наиболее термонапряженном среднем сечении сопловой лопатки на максимальном режиме. Видно, что максимальный уровень температуры наблюдается на ее входной и выходной кромках, где, как уже отмечалось выше, возникают трудности с охлаждением. При этом минимальный уровень температуры имеет место в охлаждающем канале.

Ресурс сопловых аппаратов современных АГТД может составлять десятки тысяч часов. При этом наработка на максимальном режиме может достигать только несколько сотен часов. Существует мнение, что повреждаемость сопловых лопаток на двигателе происходит в основном в жарких климатических зонах. Тем не менее, как показывает анализ результатов расчетов для современных авиационных газотурбинных двигателях такие утверждения ошибочны.

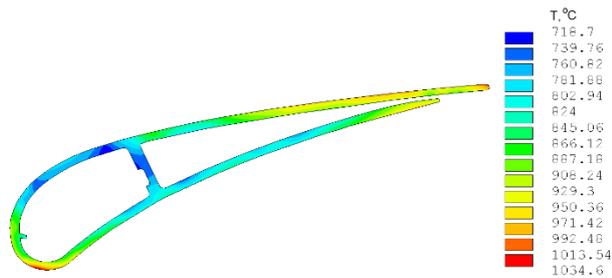


Рис. 3. Температурное состояние лопатки соплового аппарата на максимальном режиме

При проведении расчетных исследований применялась двухмерная модель наиболее термонапряженного среднего сечения лопатки соплового аппарата турбины высокого давления. Расчеты температурного состояния лопатки были выполнены методом конечных элементов при допущении постоянства граничных условий со стороны газа. Расчеты напряженно-деформированного состояния лопаток в расчетном сечении выполнялись с помощью конечноэлементной разбивки сечений с учетом как газодинамических, так и температурных нагрузок, возникающих в результате неравномерного нагрева лопаток. Расчеты проводились с учетом деформаций упругости, пластичности и ползучести.

## 2. Результаты исследований и их анализа

Опыт проектирования, доводки и эксплуатации лопаток сопловых аппаратов турбины высокого давления, а также анализ результатов расчетных исследований их напряженно-деформированного состояния показывает, что наиболее опасной зоной, влияющей на их работоспособность, является входная кромка пера. Поэтому далее представлены результаты расчетных исследований в наиболее опасной точке, расположенной на входной кромке среднего сечения лопатки, как определяющей ее ресурс. На рис. 4 приведена диаграмма распределения температуры в выбранной точке в разных климатических зонах эксплуатации при изменении высоты полета. Видно, что уровень температур на входной кромке лопатки увеличивается с повышением температуры окружающего воздуха и высоты полета. При этом с увеличением высоты полета разница в уровне температур с повышением температуры окружающего воздуха уменьшается, поскольку в этом случае замедляется рост температуры на входной кромке лопатки. Таким образом, если при полете у земли в различных климатических зонах на входной кромке лопатки наблюдается большая разница в температуре, то на большой высоте имеет место высокий уровень температуры независимо от климатической зоны эксплуатации.

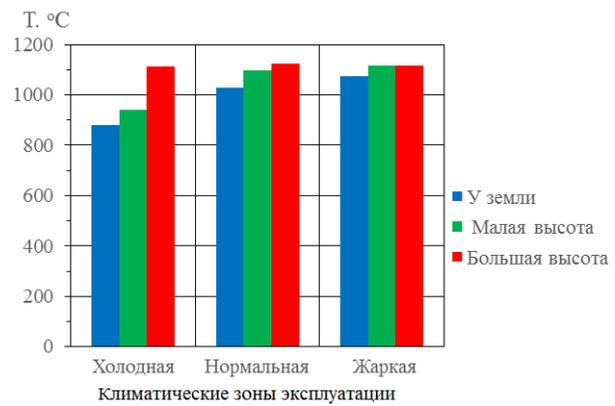
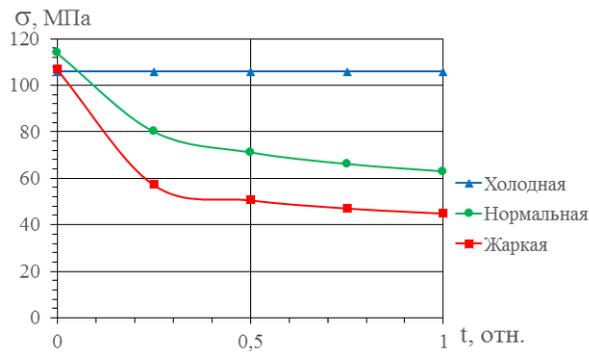


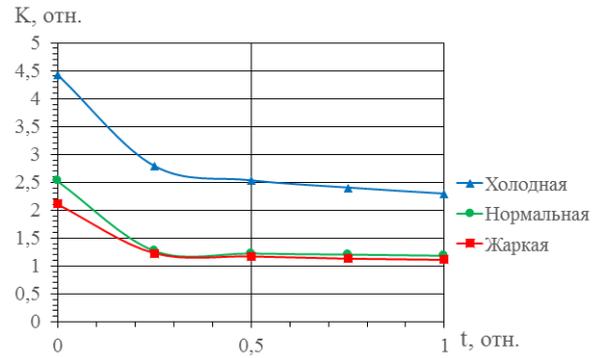
Рис. 4. Диаграмма распределения температуры в наиболее опасной точке входной кромки среднего сечения сопловой лопатки в зависимости от климатической зоны эксплуатации АГТД и высоты полета

Проведен анализ изменения напряженного состояния в рассматриваемой точке пера лопатки соплового аппарата в зависимости от времени работы на рабочем режиме двигателя. На рис. 5 приведены зависимости изменения эквивалентных напряжений от времени работы на рабочем режиме для выбранных климатических зон эксплуатации при варьировании высоты полета. Видно, что для всех климатических зон на определенной высоте полета напряжения на входной кромке лопатки практически не отличаются. Однако уровень напряжений на большой высоте полета примерно на 20% ниже чем у земли и на малой высоте.

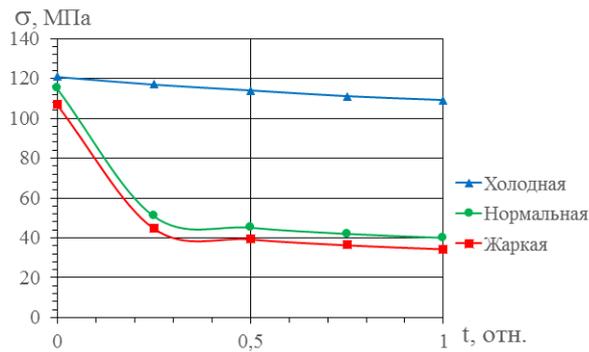
Таким образом, из представленных результатов следует, что развитие процессов ползучести в наиболее опасной точке сопловой лопатки зависит от уровня температуры на входной кромке. Так, на максимальном режиме у земли (см. рис. 5, а) в холодных климатических условиях из-за невысокой температуры на входной кромке лопатки релаксация напряжений в опасной точке практически отсутствует. С увеличением высоты полета температура на входной кромке сопловой лопатки начинает увеличиваться, и процессы ползучести ускоряются для всех климатических зон эксплуатации. Поскольку с увеличением высоты полета разница в температурах для разных климатических зон на входной кромке лопатки постепенно уменьшается (см. рис. 4), то на большой высоте, где температура входной кромки в разных климатических зонах отличается незначительно, процессы релаксации напряжений протекают одинаково. При этом с увеличением температуры процессы ползучести протекают быстрее, и уровень напряжений, до которого происходит релаксация напряжений, становится ниже.



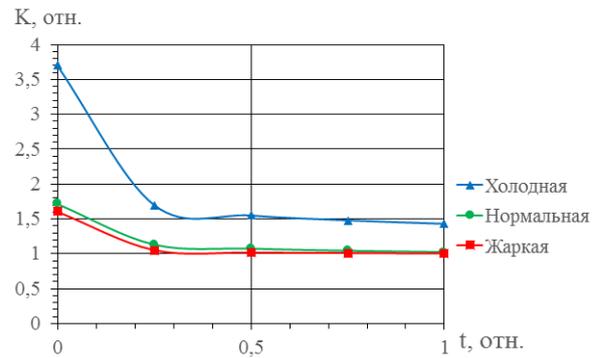
а



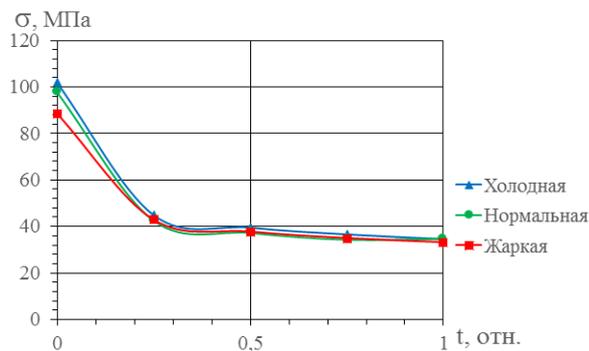
а



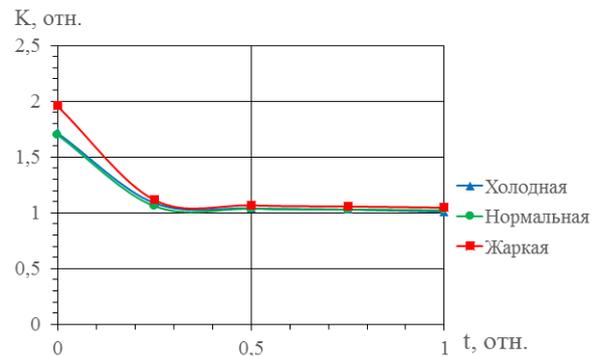
б



б



в



в

Рис. 5. Зависимости эквивалентных напряжений в наиболее опасной точке входной кромки среднего сечения сопловой лопатки на максимальном режиме у земли (а), на малой (б) и большой (в) высотах в разных климатических зонах эксплуатации

Рис. 6. Зависимости относительного запаса прочности в наиболее опасной точке входной кромки среднего сечения сопловой лопатки на максимальном режиме у земли (а), на малой (б) и большой (в) высотах в разных климатических зонах эксплуатации

На рис. 6 представлены зависимости изменения относительного запаса прочности сопловой лопатки от времени работы на рабочем режиме для выбранных климатических зон эксплуатации при варьировании высоты полета на рабочем режиме, полученные по результатам расчета НДС в наиболее опасной точке на входной кромке среднего сечения лопатки соплового аппарата. Отчетливо видно, что повреждаемость сопловых лопаток возрастает с увеличением высоты полета на максимальном режиме.

При этом как у земли, так и на малой высоте полета повреждаемость в нормальных и жарких климатических условиях практически одинакова. С повышением высоты полета повреждаемость в холодных условиях приближается к таковой в нормальных и жарких условиях, а на больших высотах может быть даже выше.

## Заключення

В роботі представлені результати розрахункового дослідження впливу опору матеріалу на придатність лопаток соплового апарату турбіни високого тиску в різних умовах експлуатації двигача. Встановлено закономірності впливу кліматических умов і висоти польоту на їх напружено-деформоване стан і міцність, на основі яких показано необхідність урахування наробітку двигача в різних кліматических умовах при визначенні ресурсу соплових лопаток.

## Література

1. Термопрочность деталей машин [Текст] / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорр, И. В. Демьянушко и др. – М. : Машиностроение, 1975. – 455 с.
2. Зеленый, Ю. А. Расчетно-экспериментальная оценка влияния снижения эффективности охлаждения лопаток СА на их работоспособность [Текст] / Ю. А. Зеленый, Р. П. Придорожный, О. А. Петрова // Вестник двигателестроения. – 2004. – № 4. – С. 133-135.
3. Зеленый, Ю. А. Расчетно-экспериментальная оценка влияния снижения эффективности охлаждения лопаток СА на их работоспособность [Текст] / Ю. А. Зеленый, Р. П. Придорожный, О. А. Петрова // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 10 (36). – С. 32-35.
4. Зеленый, Ю. А. Расчетная оценка влияния окружной неравномерности температурного поля камеры сгорания на работоспособность лопаток соплового аппарата [Текст] / Ю. А. Зеленый, Р. П. Придорожный, О. А. Петрова // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 9 (35). – С. 90-93.
5. Кравченко, И. Ф. Расчетная оценка влияния утечек воздуха на стыках секторов на теплонапряженное состояние лопаток соплового аппарата

[Текст] / И. Ф. Кравченко, Ю. А. Зеленый, Р. П. Придорожный // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – № 9 (45). – С. 44-47.

## References

1. Birger, I. A., Shorr, B. F., Dem'janushko, I. V. *Termoprochnost' detalej mashin* [Heat resistance of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 455 p.
2. Zelenyj, Ju. A., Pridorozhnyj, R. P., Petrova, O. A. *Raschetno-jeksperimental'naja ocenka vlijanija snizhenija jeffektivnosti ohlazhdenija lopatok SA na ih rabotosposobnost'* [Calculation and experimental assessment of the effect of reducing the cooling efficiency of nozzle vanes on their operability]. *Vestnik dvigatelestroenija – Herald of Aeroenginebuilding*, 2004, no 4, pp. 133-135.
3. Zelenyj, Ju. A., Pridorozhnyj, R. P., Petrova, O. A. *Raschetno-jeksperimental'naja ocenka vlijanija snizhenija jeffektivnosti ohlazhdenija lopatok SA na ih rabotosposobnost'* [Calculation and experimental assessment of the effect of reducing the cooling efficiency of the nozzle vanes on their operability]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2006, no. 10 (36), pp. 32-35.
4. Zelenyj, Ju. A., Pridorozhnyj, R. P., Petrova, O. A. *Raschetnaja ocenka vlijanija okružnoj neravnomernosti temperaturnogo polja kamery sgoranija na rabotosposobnost' lopatok soplovogo apparata* [Estimated assessment of the effect of circumferential non-uniformity of the temperature field of the combustion chamber on the operability of the nozzle vanes]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2006, no 9 (35), pp. 90-93.
5. Kravchenko, I. F., Zelenyj, Ju. A., Pridorozhnyj, R. P. *Raschetnaja ocenka vlijanija utechek vozduha na stykah sektorov na teplonapryazhennoe sostojanie lopatok soplovogo apparata* [Estimated impact of air leaks at the joints of sectors on the heat stress state of the nozzle vanes]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija – Aerospace technic and technology*, 2007, no 9 (45), pp. 44-47.

Надійшла до редакції 31.05.2020, розглянута на редколегії 15.08.2020

## ВПЛИВ ПОВЗУЧОСТІ МАТЕРІАЛУ НА РОБОТОЗДАТНІСТЬ ЛОПАТОК СОПЛОВОГО АПАРАТУ ТУРБІНИ ВИСОКОГО ТИСКУ

Р. П. Придорожний, О. В. Шереметьєв, А. П. Зінковський

Створення авіаційних газотурбінних двигунів, що відповідають сучасним вимогам по ресурсу, особливо його гарячої частини, вимагає не тільки більш досконалих методів проектування, а й аналізу роботоздатності та пошкоджуваності протягом ресурсу з метою пошуку резервів, спрямованих на підвищення надійності. Одними з найбільш складних і теплонапружених вузлів сучасного газотурбінного двигача, є лопатки соплового апарату турбіни високого тиску, безпосередньо сприймаючі високу температуру газу на виході з камери згорання і мають розвинену систему конвективно-плівкового охолодження. Ресурс соплових апаратів сучасних авіаційних газотурбінних двигунів може становити десятки тисяч годин. При цьому напруження на максимальному режимі може досягати тільки кілька сотень годин. Існує думка, що пошкоджуваність соплових лопаток на двигачі відбувається в основному в жарких кліматических зонах. Проте, як показує аналіз розрахункових досліджень для сучасних авіаційних газотурбінних двигунів такі твердження є помил-

ковими. Безпосереднім наслідком дії підвищених температур і високих термічних напружень є повзучість матеріалу. Проведено розрахункове дослідження впливу повзучості матеріалу лопаток соплового апарату турбіни високого тиску в різних умовах експлуатації двигуна на їх роботоздатність. Показано, що зі збільшенням висоти польоту робоча температура соплової лопатки починає збільшуватися, і процеси повзучості прискорюються для всіх кліматичних зон експлуатації. Оскільки зі збільшенням висоти польоту різниця в температурах для різних кліматичних зон поступово зменшується, то на великій висоті, де температура в різних кліматичних зонах відрізняється незначно, процеси релаксації напружень протікають однаково. При цьому зі збільшенням температури процеси повзучості протікають швидше, і рівень напружень, до якого відбувається релаксація напружень, стає нижче. Таким чином з підвищенням висоти польоту пошкоджуваність в холодних умовах наближається до такої в нормальних і жарких умовах, а на великих висотах може бути навіть вище. Встановлено закономірності впливу кліматичних умов і висоти польоту на напруженість лопаток соплових апаратів турбін високого тиску і їх роботоздатність, на підставі яких показана необхідність врахування напруженості двигуна в різних кліматичних умовах при визначенні ресурсу соплових лопаток.

**Ключові слова:** сопловий апарат; охолоджувана лопатка; термічні напруження; повзучість; релаксація напружень; умови експлуатації; роботоздатність.

### INFLUENCE OF CREEP OF MATERIAL OF A HIGH PRESSURE NOZZLE VANES ON THEIR OPERABILITY

R. Prydorozhnyi, A. Sheremetyev, A. Zinkovskii

The creation of aircraft gas turbine engines that meet modern requirements for the resource, especially its hot part, requires not only more advanced design methods but also an analysis of operability and damageability during the resource to find reserves aimed at improving reliability. One of the most complex and heat-stressed components of a modern gas turbine engine is the nozzle vanes of a high-pressure turbine, directly perceiving the high temperature of the gas at the exit of the combustion chamber and having an advanced convection-film cooling system. The service life nozzle vanes of modern aviation gas turbine engines can be tens of thousands of hours. At the same time, the maximum operating mode can reach only a few hundred hours. It is believed that damage to nozzle vanes on an engine occurs mainly in hot climatic zones. Nevertheless, as the analysis of computational studies for modern aviation gas turbine engines shows, such statements are erroneous. The direct consequence of the action of elevated temperatures and high thermal stresses is the creep of the material. A computational study of the effect of creep of the material of the nozzle vanes of a high-pressure turbine under various operating conditions of the engine on their operability was carried. It is shown that with increasing flight altitude the working temperature of the nozzle vane begins to increase, and creep processes are accelerated for all climatic zones of operation. Since with increasing flight altitude, the temperature difference for different climatic zones gradually decreases, at high altitudes, where the temperature in different climatic zones differs slightly, stress relaxation processes proceed identically. In this case, with an increase in temperature, creep processes proceed faster, and the stress level to which stress relaxation occurs becomes lower. Thus, with increasing flight altitude, damage in cold conditions approaches that under normal and hot conditions, and at high altitudes, it can even be higher. The regularities of the influence of climatic conditions and flight altitude on the strength of the nozzle vanes of high-pressure turbines and their operability are established, based on which the need to take into account the operating time of the engine in various climatic conditions when determining the service life of nozzle vanes is shown.

**Keywords:** nozzle; cooled blade; thermal stresses; creep; stress relaxation; operating conditions; operability.

**Придорожний Роман Петрович** – канд. техн. наук, ведучий інженер ГП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

**Шереметьєв Александр Викторович** – канд. техн. наук, зам. головного конструктора ГП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

**Зиньковський Анатолій Павлович** – д-р техн. наук, проф., зам. директора Інститута проблем прочності ім. Г. С. Писаренко НАН України, Київ, Україна.

**Roman Prydorozhnyi** – Candidate of Technical Science, Leading Engineer, SE “Ivchenko-Progress”, Zaporizhzhia, Ukraine, 03530@ivchenko-progress.com, ORCID Author ID: 0000-0001-6014-643X.

**Aleksandr Sheremetyev** – Candidate of Technical Science, Deputy Chief Designer, SE “Ivchenko-Progress”, Zaporizhzhia, Ukraine.

**Anatoliy Zinkovskii** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Deputy Director of the Institute for Scientific Work, G.S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine, e-mail: zinkovskii@ipp.kiev.ua, ORCID Author ID: 0000-0003-0803-7054.