

Г. Г. Еникеев

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ РОТОРНЫХ ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЕЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Разработана методология экспериментальных исследований воздухозаборных устройств с роторным воздухоочистителем. Исследования проведены на стендах, которые условно разделены на четыре уровня. Стенды нулевого уровня предназначались для детальных исследований физических процессов, происходящих в воздухозаборном устройстве при движении дисперсного потока. Стенды первого уровня позволили получить характеристики воздухозаборного устройства с воздухоочистителем на масштабных моделях. На стендах второго уровня получены характеристики совместной работы ТВД и воздухоочистителя. Подтверждение эффективности приводного роторного воздухоочистителя для ТВД НК-12МК в реальных условиях эксплуатации было получено на стенде третьего уровня – экраноплане «Орленок». Методология экспериментальных исследований воздухозаборных устройств с воздухоочистителем выявила возможность исследования физики рабочего процесса, влияния геометрических и режимных параметров на характеристики и работоспособность в реальных условиях эксплуатации. *Стенды; экспериментальные исследования; воздухозаборное устройство с роторным воздухоочистителем; дисперсный поток; характеристики воздухоочистителей*

Основной причиной снижения ресурса и ухудшения эксплуатационных характеристик газотурбинных двигателей (ГТД) при их эксплуатации в запыленной атмосфере и морской среде является эрозия лопаток компрессора или отложения на их поверхности соли и мелких частиц пыли.

Расчетные и экспериментальные работы по исследованию роторных воздухоочистителей, проведенные под руководством и непосредственным участием автора в исследованиях научно-исследовательской лаборатории специальных характеристик ГТД (НИЛ СХ ГТД) Уфимского государственного авиационного технического университета [1, 2, 3], выявили их положительные характеристики по стабилизации параметров и продлению времени эксплуатации ГТД.

Для обеспечения эффективного отделения капель и твердых частиц в роторных воздухоочистителях использованы решетки профилей, несвойственные лопаточным машинам ГТД. Так, например, в приводном роторном воздухоочистителе была установлена активная компрессорная решетка и пустотелая лопатка с перфорированными отверстиями на корытце. Решетка самовращающегося воздухоочистителя была составлена из широкохордных, пустотелых, перфорированных лопаток с S-образным профилем.

Движение дисперсного потока в указанных решетках изучено недостаточно. И в то же время физические процессы: дробление капель;

удар капель и твердых частиц о поверхность лопаток; отражение; образование и движение пленки; испарение, происходящие при движении дисперсных потоков в межлопаточных каналах роторного воздухоочистителя, во многом схожи с аналогичными процессами в лопаточных машинах ГТД, влажнопаровых турбинах, но происходят при других условиях.

С целью экспериментального исследования рабочего процесса и выполнения НИОКР по разработке опытных образцов воздухозаборных устройств с роторным воздухоочистителем различных схем, были спроектированы и построены в НИЛ СХ ГТД и в ОКБ по СПК специальные стенды.

Были разработаны и испытаны роторные воздухоочистители для ТВД и ТРДД, которые можно рассматривать как предварительные ступени компрессора с высокой эффективностью отделения дисперсных частиц.

Воздухоочиститель для ТВД приводился во вращение от втулки винта. Профилированные лопатки воздухоочистителя располагались между лопастями воздушного винта и входом в воздухозаборное устройство.

Воздухоочиститель для ТРДД был выполнен самовращающимся с S-образным профилем лопаток. Ротор воздухоочистителя располагался в проточной части воздухозаборного устройства перед входом в первый контур. Вращение воздухоочистителя осуществлялось за счет отбора энергии от потока воздуха в специально спроектированных межлопаточных каналах ротора.

Самовращающийся воздухоочиститель был исследован и в компоновке с воздухозаборным устройством турбовинтового двигателя ТВД-10 для защиты от попадания пыли.

Стенды для проведения испытаний масштабных моделей воздухоочистителей были оборудованы устройствами и приборами, позволяющими имитировать морскую среду и запыленную атмосферу с заданными параметрами.

При проведении экспериментов можно было наблюдать физические процессы, происходящие при движении дисперсных потоков. Приборы и устройства позволяли количественно определять такие важные характеристики воздухозаборных устройств с воздухоочистителями, как коэффициент эффективности, коэффициент восстановления полного давления, коэффициент лобовой производительности, радиальную и окружную неоднородность приведенной скорости несущего потока в сечении на входе в компрессор.

МЕТОДОЛОГИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОТОРНЫХ ВОЗДУХООЧИСТИТЕЛЕЙ

1. Стенды и оригинальное оборудование для исследования характеристик роторных воздухоочистителей и дисперсного потока

Экспериментальные исследования роторных воздухоочистителей выполнялись на стендах, каждый из которых предназначался для решения определенных задач. Перечень стендов приведен на рис.1. В левой части рис.1 показаны стенды трех уровней.

На стендах первого уровня проводились исследования масштабных моделей воздухозаборных устройств с роторным воздухоочистителем.

На стендах второго уровня проводились исследования натуральных воздухозаборных устройств с воздухоочистителем совместно с ГТД.

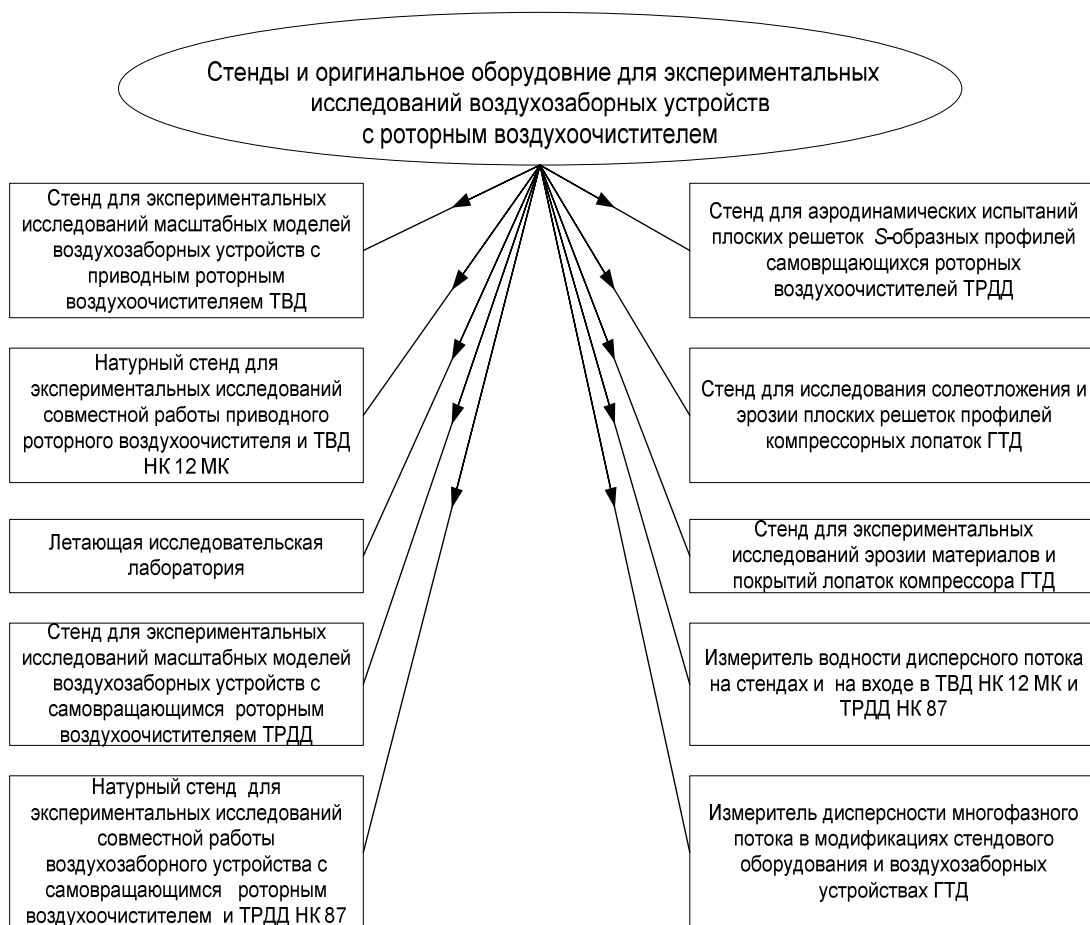


Рис. 1. Перечень стендов и оригинального оборудования для проведения экспериментальных исследований воздухозаборных устройств ГТД с воздухоочистителями

Стенды третьего уровня представляли собой летающие лаборатории. Натурные воздухозаборные устройства с роторным воздухоочистителем испытывались в составе силовой установки экраноплана в естественных условиях морской среды.

В правой части рис. 1 показаны стенды нулевого уровня, и оригинальное оборудование для измерения параметров дисперсной фазы. Указанная группа стендов позволяла проводить детальные исследования движения дисперсных потоков в проточной части ГТД, что не удавалось сделать на других стендах.

Оборудование стендов нулевого, первого и второго уровней позволяло менять в широком диапазоне режимные параметры: скорость потока; угловую частоту вращения; дисперсный состав, концентрацию и физические свойства частиц.

Были проведены экспериментальные исследования условий работы ТВД в морской среде и запыленной атмосфере и испытания приводного роторного воздухоочистителя маршевого двигателя НК-12 МК на стенде третьего уровня – летающей лаборатории «Орленок».

Стенды нулевого уровня: стенд для аэродинамических испытаний плоских решеток S-образных профилей самовращающихся роторных воздухоочистителей ТРДД; стенд для исследования солеотложения и эрозии плоских решеток профилей компрессорных лопаток ГТД; стенд для экспериментальных исследований эрозии материалов и покрытий лопаток компрессора ГТД. На указанных стендах были исследованы на плоских решетках аэродинамические характеристики новых S-образных профилей, выявлены закономерности солеотложения, изучен механизм эрозионного разрушения материалов и покрытий лопаток ГТД и получены количественные соотношения для интенсивности уноса материала в зависимости от времени воздействия абразивных частиц.

1.1. Стенд первого уровня для экспериментальных исследований масштабных моделей воздухозаборных устройств с приводным воздухоочистителем ТВД

Была разработана методика проведения экспериментальных исследований масштабных моделей приводных роторных воздухоочистителей ТВД на стенде (рис. 2). Экспериментально были получены эффективность воздухоочистителя,

коэффициент восстановления полного давления, радиальная и окружная неравномерность приведенного коэффициента скорости несущего потока в мерном сечении. Мерное сечение было препарировано и в нем установлены датчики полного давления и выполнены отверстия в наружной обечайке для измерения статического давления. Методика проведения и обработки результатов аэродинамических испытаний составлена на основании известных работ в области аэродинамического эксперимента. Определение коэффициента эффективности было выполнено с учетом баланса масс жидкой фазы. Попавшая в проточную часть модели жидкая фаза улавливалась жалюзийным воздухоочистителем, эффективность которого оставляла 99 %.

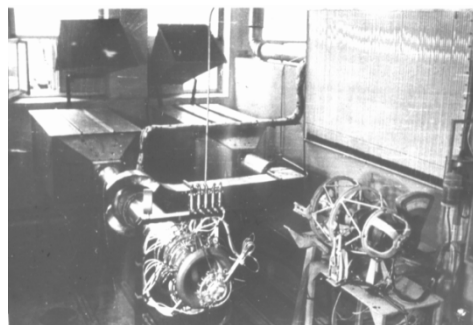


Рис. 2. Фотография стенда для испытания моделей роторных воздухоочистителей

Модельная часть стенда была выполнена в виде отдельного модуля и воспроизводила в масштабе 1:5 геометрию соосных винтов и входного устройства ТВД НК-12 (рис. 3).

Конструкция модели выполнена со съемным ротором воздухоочистителя и съемными лопастями винтов, что позволяло выполнить компоновку воздухозаборного устройства в трех вариантах: без лопастей винтов и рабочих лопаток воздухоочистителя; без рабочих лопаток воздухоочистителя; в компоновке с лопастями винтов и рабочим колесом воздухоочистителя.

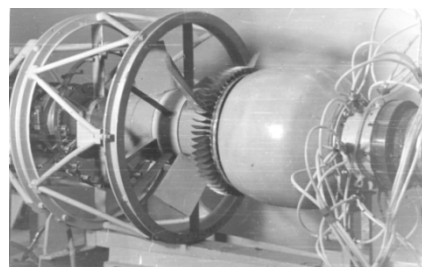


Рис. 3. Фотография модельной части стенда для испытания воздухозаборных устройств ТВД НК-12 с роторным воздухоочистителем

Испытания трех вариантов моделей позволило визуально наблюдать за движением дисперсного потока и оценивать вклад винтов и ротора воздухоочистителя в процесс отделения капель на входе в воздухозаборное устройство.

При отсутствующих лопастях винтов и не вращающемся роторе воздухоочистителя хорошо видно, как все капли засасываются в воздухозаборное устройство (рис. 4)

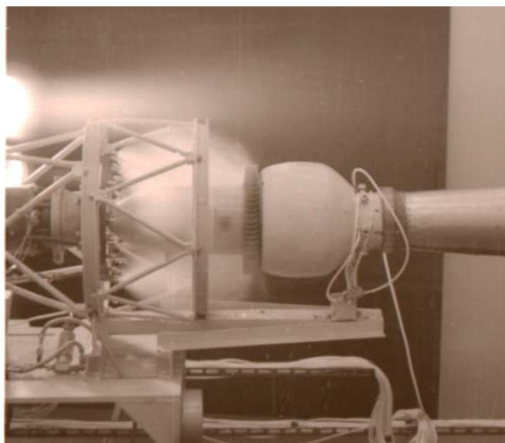


Рис. 4. Фотография движения дисперсного потока при отсутствии винтов и не вращающемся роторе воздухоочистителя

Картина движения дисперсного потока кардинально изменилась при вращении ротора воздухоочистителя (рис. 5). Капли улавливались рабочими лопатками, на поверхности которых образовывалась движущаяся пленка жидкости, которая под действием центробежных и кориолисовых сил сбрасывалась с торцов лопаток. Вновь образованные капли, двигались в радиальном направлении.

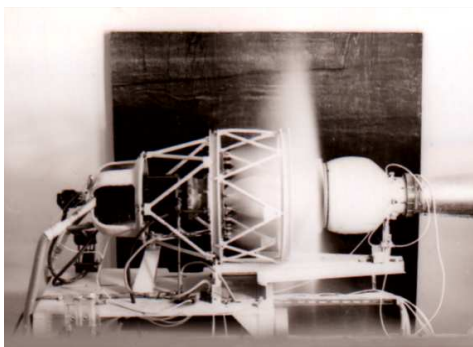


Рис. 5. Фотография движения дисперсного потока при вращающемся роторе воздухоочистителя

При работе винтов образовался горизонтальный поток, который сносил движущиеся в радиальном направлении капли (рис. 6).

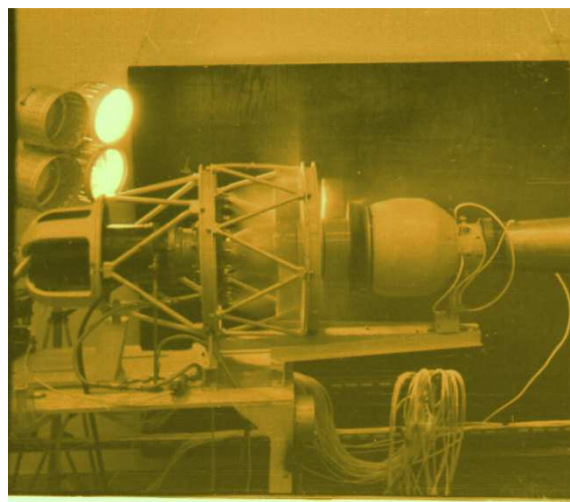


Рис. 6. Фотография движения дисперсного потока при вращающихся винтах и роторе воздухоочистителя

Как показали экспериментальные исследования, с увеличением скорости потока коэффициент эффективности плавно падает в исследуемом диапазоне режимных параметров (рис. 7). Причем снижение величины коэффициента эффективности тем меньше, чем больше густота решетки.

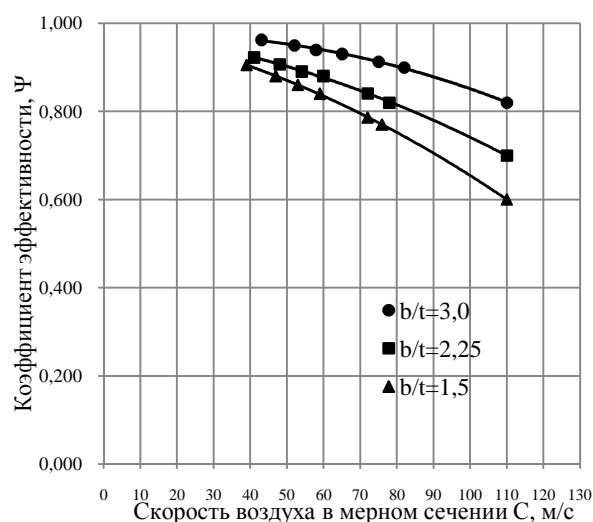


Рис. 7. График зависимости коэффициента эффективности модели приводного роторного воздухоочистителя ТВД НК-12 от скорости потока в сечении воздухозаборного устройства перед компрессором

С увеличением скорости потока наблюдалось снижение коэффициента восстановления полного давления при отсутствии винтов, причем тем больше, чем больше густота решетки (рис. 8). При работающих винтах потеря энергии компенсируется набегающим потоком воздуха и коэффициент восстановления полного давления несколько возрастает с увеличением скорости [4].

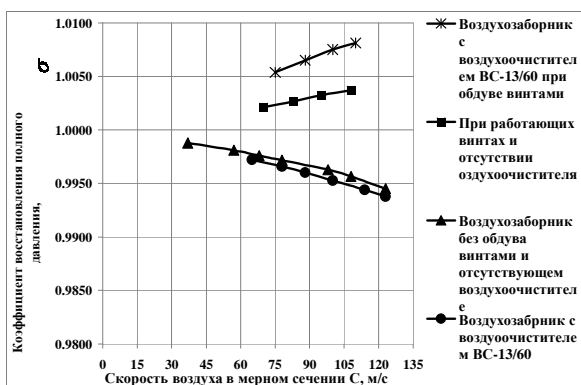


Рис. 8. Графики зависимости коэффициента восстановления полного давления от скорости потока

Относительная радиальная и окружная неравномерность приведенной скорости воздуха

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda_i}{\lambda_{cp}}$$

в сечении воздухозаборного устройства перед компрессором не превышает 2...4 % (рис. 9).

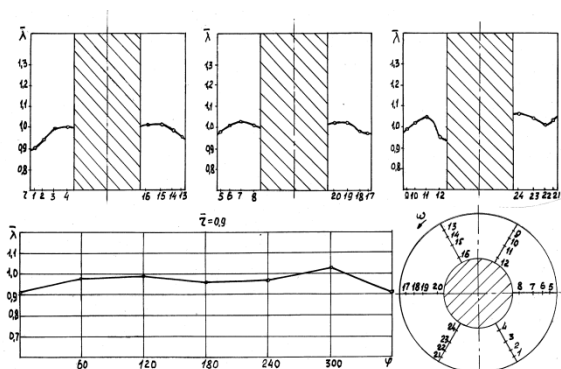


Рис. 9. Относительная радиальная и окружная неравномерность приведенной скорости воздуха

1.2. Стенд второго уровня для экспериментальных исследований натуральных воздухозаборных устройств с приводным воздухоочистителем при совместной работе с ТВД НК-12 МК

Натурный стенд, спроектированный и построенный в ЦКБ по СПК, позволял выполнить комплекс экспериментальных исследований ТВД, в том числе и с приводным роторным воздухоочистителем.

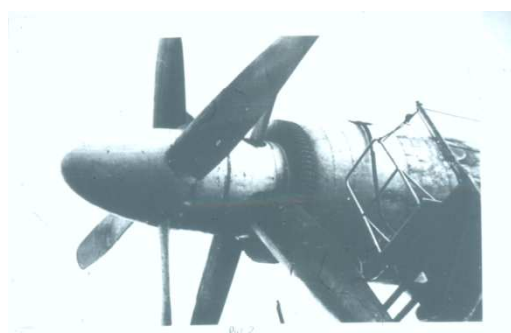


Рис. 10. Фотография натурального стенда для имитации морских условий при испытании турбовинтового двигателя НК-12 с роторным воздухоочистителем

Имитация морских условий осуществлялась впрыском на вход в двигатель искусственной морской воды. Подбором количества форсунок и давления впрыска обеспечивалась необходимая концентрация морской воды на входе в двигатель, что соответствовало реальным условиям эксплуатации.

Наряду с исследованиями роторного воздухоочистителя на стенде были выполнены испытания и доводка измерителя дисперсности и влажности, которые использовались впоследствии для замеров на экраноплане «Орленок».

В результате испытаний были получены уникальные сведения о совместной работе приводного роторного воздухоочистителя и ТВД НК-12 МК. Время работы двигателя было различным в зависимости от влажности потока, при ограничении температуры газов перед турбиной. Испытания проводились как с воздухоочистителем, так и без воздухоочистителя, что позволило вычислить коэффициент эффективности воздухоочистителя.

Зависимость изменения времени работы двигателя от влажности потока показана на рис. 11. С увеличением влажности потока время работы двигателя уменьшается. При работе двигателя с воздухоочистителем кривая зависимо-

сти времени работы двигателя от водности сместилась вправо. Пользуясь этой зависимостью, можно было определить коэффициент эффективности воздухоочистителя при любой начальной водности на входе в двигатель. Для этого задавались каким-либо значением начальной водности, и по соответствующему графику (рис. 11) определялось время работы двигателя с воздухоочистителем. Затем по графику для случая работы двигателя без воздухоочистителя находилась водность, при которой двигатель работал то же время.

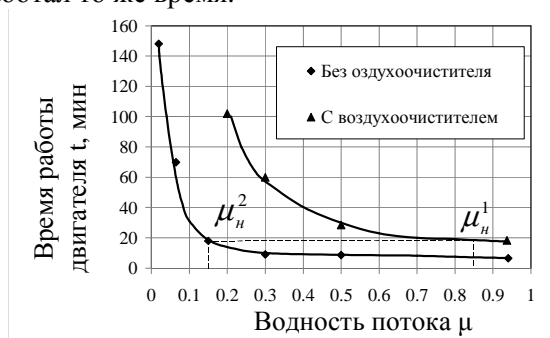


Рис. 11. Зависимость времени работы двигателя от начальной водности потока

Коэффициент эффективности воздухоочистителя определяется как отношение, разницы водности при одном и том же времени работы двигателя, к начальной водности.

$$\psi = \frac{\mu_n^1 - \mu_n^2}{\mu_n^2},$$

где μ_n^1 и μ_n^2 – начальные водности, при которых двигатель работал одно и то же время с воздухоочистителем и без него.

На рис. 12 приведены рассчитанные таким образом коэффициенты эффективности испытуемого воздухоочистителя.

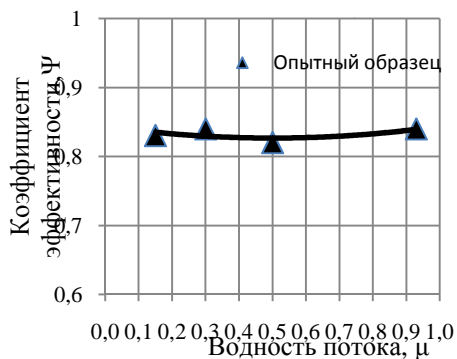


Рис. 12. Зависимость коэффициента эффективности ψ воздухоочистителя от начальной водности μ_n^i

Полученные на натурном стенде коэффициенты эффективности на 2,5 % меньше полученных при испытании масштабных моделей, что объясняется влиянием масштабного фактора.

1.3. Стенд третьего уровня для экспериментальных исследований воздухоочистителя в составе силовой установки экраноплана «Орленок»

Завершающим этапом экспериментальных исследований приводного роторного воздухоочистителя были испытания на экраноплане «Орленок». Воздухоочиститель был установлен на маршевом двигателе НК-12 МК и испытывался в реальных условиях эксплуатации (рис. 13). Критерием оценки эффективности воздухоочистителя явилось увеличившееся время между промывками двигателя

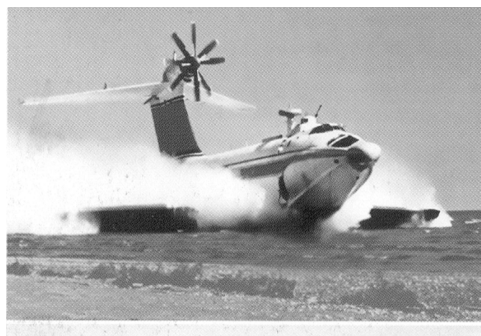


Рис. 13. Испытания воздухоочистителя на экраноплане «Орленок»

1.4. Стенд первого уровня для экспериментальных исследований воздухозаборного устройства с самовращающимся воздухоочистителем ТРДД

Отличительной особенностью стенда являлось наличие двух вентиляторов для имитации работы двух контуров ТРДД и двух жалюзийных воздухоочистителей на выходе, что позволяло вычислять баланс масс второй фазы в процессе эксперимента (рис. 14).

Масштабная модель воздухозаборного устройства ТРДД НК-87 была препарирована, что позволяло получать аэродинамические характеристики с воздухоочистителями различной геометрии (рис. 15). Впрыск воды осуществлялся из коллектора регулируемых пневматических форсунок. В процессе эксперимента можно было установить различную водность и дисперсность. Стенд был снабжен аппаратурой для измерения параметров двухфазного потока.

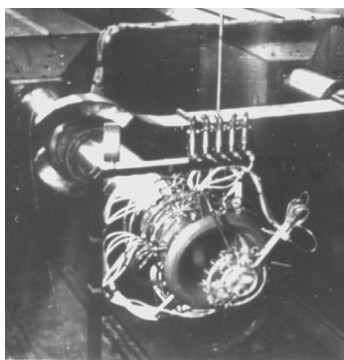


Рис. 14. Стенд для испытания масштабных моделей воздухозаборных устройств ТРДД с самовращающимся воздухоочистителем

Разработанная методика проведения и обработки результатов эксперимента позволяла с достаточной точностью получать аэродинамические характеристики и характеристики эффективности воздухозаборных устройств ТРДД с воздухоочистителем для различных геометрических и режимных параметров.

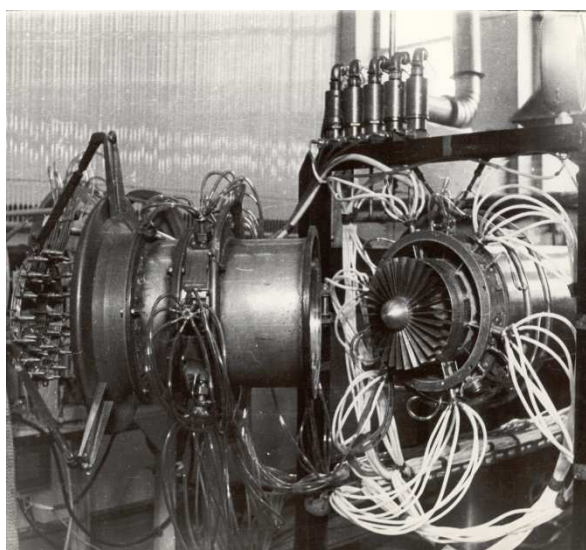


Рис. 15. Модель воздухозаборного устройства с воздухоочистителем

Были получены характеристики воздухозаборного устройства с самовращающимся воздухоочистителем.

Выявлено, что закономерность изменения зависимости коэффициента эффективности от скорости потока в сечении перед компрессором двигателя аналогична характеристике приводного роторного воздухоочистителя (рис. 16). Происходит плавное уменьшение коэффициента эффективности с увеличением скорости потока.

Коэффициент восстановления полного давления уменьшается по мере увеличения скорости потока из-за увеличения гидравлических потерь. Коэффициент восстановления полного давления первого контура ниже, чем второго контура. Объясняется это отбором энергии потока в первом контуре самовращающимся ротором воздухоочистителя.

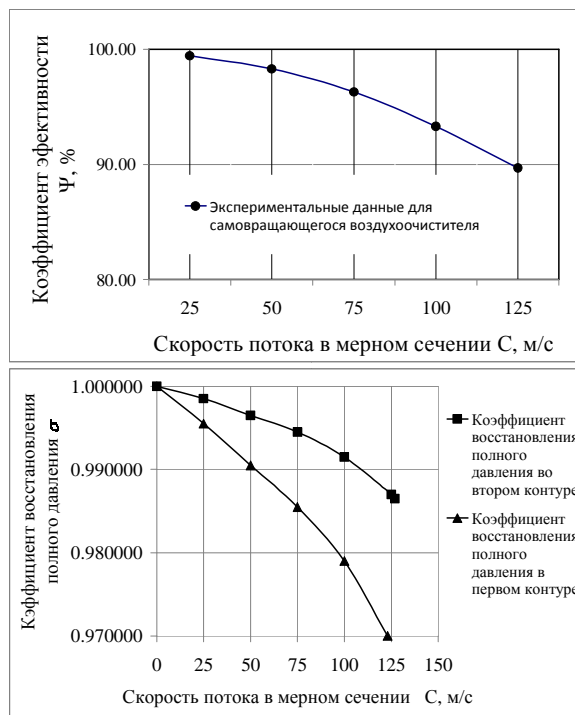


Рис. 16. Графики зависимости коэффициента эффективности и коэффициента восстановления полного давления от скорости потока в мерном сечении воздухозаборного устройства

1.5. Стенд первого уровня для экспериментальных исследований воздухозаборного устройства с самовращающимся воздухоочистителем ТВД-10

Экспериментальное исследование роторных воздухоочистителей при работе в запыленных условиях является весьма актуальным.

Для выполнения работ по количественной оценке коэффициента эффективности самовращающихся роторных воздухоочистителей при наличии пыли был изготовлен стенд первого уровня для испытания с подачей твердых частиц.

Была разработана методика проведения и обработки результатов эксперимента при подаче на вход пыли определенной концентрации

и дисперсного состава. По количеству пыли, поданной в воздухозаборник и задержанной в циклонном воздухоочистителе, составлялся баланс масс твердых частиц и выполнялся расчет коэффициента эффективности.

Фотография общего вида стенда приведена на рис.17.

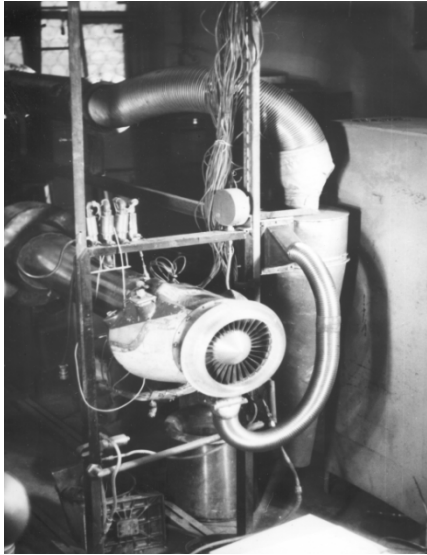


Рис. 17. Фотография общего вида стенда для имитации запыленной атмосферы на входе в газотурбинный двигатель

Модель самовращающегося воздухоочистителя имеет на периферии пылесборник. Пыль из пылесборника отсасывается вентилятором через циклон (рис. 18). Высокий коэффициент очистки воздуха в циклоне позволял улавливать почти всю пыль, попавшую в пылесборник.



Рис. 18. Фотография самовращающегося роторного воздухоочистителя, выполненного для испытаний с подачей пыли

Проведенные испытания выявили особенность протекания характеристик воздухоочистителя при очистке воздуха от пыли (рис. 19).

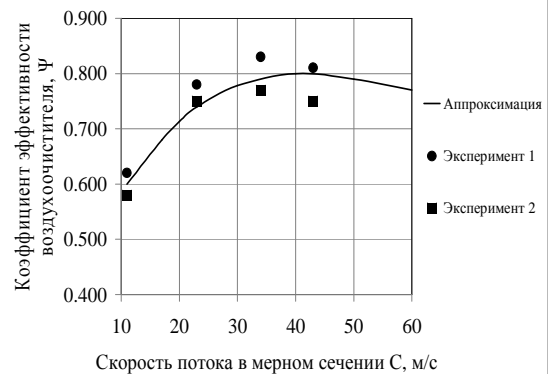


Рис. 19. График зависимости коэффициента эффективности от скорости потока

С увеличением скорости потока эффективность воздухоочистителя возрастает, достигая максимального значения, затем плавно снижается.

2. Стенды нулевого уровня для детальных исследований особенностей движения дисперсного потока в проточной части турбомшины

Особенностью стендов нулевого уровня является их направленность на решение узких задач рабочего процесса движения дисперсного потока в проточной части воздухозаборного устройства.

Например, стенд, фотография которого приведена на рис. 20, служил для параметрических исследований плоских решеток S-образных профилей и получения их аэродинамических характеристик.



Рис. 20. Стенд для аэродинамических исследований плоских решеток S-образных профилей

S-образные профили (рис. 21) впервые были использованы в рабочих колесах самовращающихся роторных воздухоочистителей. Их аэродинамические характеристики требовали детального изучения.

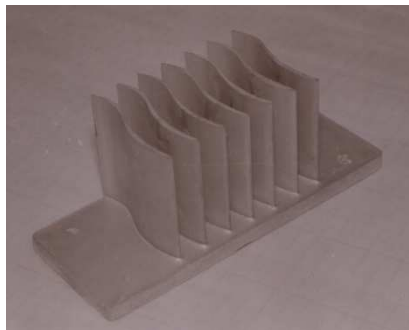


Рис. 21. Фотография плоской решетки S-образных профилей

В качестве примера на рис. 22 приведены графики зависимости коэффициента профильных потерь от густоты компрессорного участка профиля для двух расчетных значений лопаточного угла на входе. Для обоих вариантов решеток наблюдается увеличение профильных потерь с увеличением густоты решетки. Более интенсивный рост профильных потерь наблюдался для меньшего лопаточного угла на входе в решетку, что объясняется большим углом атаки.

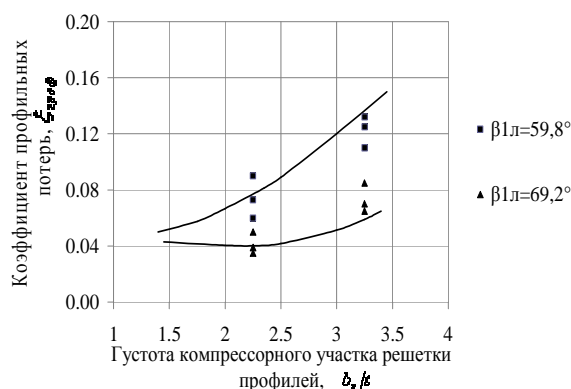


Рис. 22. Зависимость профильных потерь S-образной решетки от относительной густоты

На рис. 23 приведена фотография стенда для исследования солевого загрязнения лопаток компрессора. Исследования проводились на плоских решетках профилей. Стенд был оборудован подогревателем, что позволяло имитировать процессы отложения соли в различных температурных условиях.

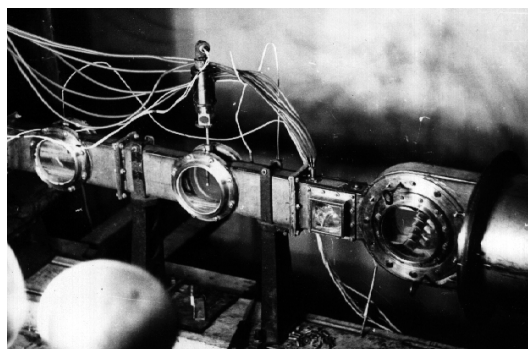


Рис. 23. Стенд для имитации процессов загрязнения плоских решеток профилей в условиях морской среды

Кварцевые окна давали возможность визуально наблюдать рост солевых отложений и деформацию геометрии профиля с течением времени.

На начальном этапе работ исследовались отложения соли на решетке, составленной из цилиндров, состоящих из двух частей (рис. 24). Периодически цилиндры вынимались и разбирались на две половины. В месте разреза в торце хорошо была видна солевая корка, толщина которой менялась в зависимости от параметров дисперсной среды. Толщина солевой корки фотографировалась под микроскопом, что позволяло следить за динамикой ее роста.

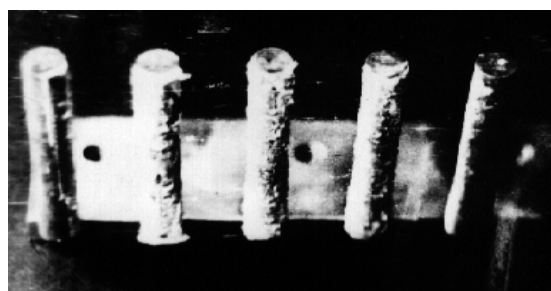


Рис. 24. Фотография отложения соли на телах простой формы

На следующем этапе исследовался процесс солевого загрязнения профилированных неподвижных лопаток. Фотографии лопаток приведены на рис. 25. В динамике наблюдались изменения состояния поверхности лопаток. При солевом загрязнении наблюдалось увеличение шероховатости поверхности лопаток и неравномерность отложений по профилю лопатки.



Рис. 25. Фотографии загрязненных морской солью лопаток компрессора

Полученная информация позволила глубже понять процессы, происходящие в компрессоре при солевом загрязнении.

Комплексный подход к решению задач защиты газотурбинных двигателей предполагает наряду с установкой воздухоочистителя подбор материалов и эрозионно-стойких и коррозионно-стойких покрытий для лопаток компрессора.

Оценка стойкости материалов и покрытий осуществлялась при сравнительных испытаниях образцов на баллистическом стенде, фотография которого приведена на рис. 26.



Рис. 26. Фотография стенда для сравнительных испытаний эрозионной стойкости материалов и покрытий

На стенде были проведены несколько серий сравнительных испытаний различных материалов и покрытий. Было выявлено, что стальные сплавы более подвержены эрозии, чем титановые сплавы. Образцы, с нанесенными ионной имплантацией многослойными покрытиями на основе нитридов титана и ванадия, оказались наиболее стойкими к эрозии.

ВЫВОДЫ

1. Предложенная методология экспериментальных исследований и разработанные на ее основе стенды показали возможность ступенчатой доводки роторных воздухоочистителей до испытания опытного образца в реальных условиях эксплуатации.

2. Выявлены физические процессы движения дисперсных потоков в проточной части воздухозаборного устройства с роторным воздухоочистителем, которые были использованы для разработки математических моделей.

3. Разработаны методики проведения и обработки результатов экспериментальных исследований, которые использованы для получения характеристик воздухозаборных устройств с приводным и самовращающимися роторными воздухоочистителями для ТВД НК-12, ТРДД НК-87 и ТВД-10.

4. Полученные результаты экспериментальных исследований явились основой для комплексного решения проблемы защиты ГТД при их эксплуатации в запыленной атмосфере и морской среде, которая заключается в установке на входе высокопроизводительных и эффективных воздухоочистителей и покрытия лопаток компрессора стойкими к эрозии и коррозии покрытиями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Еникеев Г. Г., Гузайров А. Р. Эффективность отделения жидких и твердых частиц во вращающихся воздухоочистителях воздушно-реактивных двигателей // Прогресс, качество, технология: Материалы третьего конгресса двигателестроителей Украины с иностранным участием. Киев – Харьков – Рыбачье, 1998. С. 495.
2. Guzairov A. R., Guzairov R. M., Yenikeev G. G. Dynamic behavior of solid particles suspended by air flow in axisymmetric inlets // Symposium on actual problems of aircraft engines construction. Ufa, Russia, April 1999. P. 75.
3. Защита ГТД от морских аэрозолей с помощью роторных воздухоочистителей / Г. Г. Еникеев [и др.] // Сб. трудов Уфимск. ордена Ленина авиац. ин. им. С. Орджоникидзе. Уфа: УАИ, 1992. С. 132.
4. Химич В. Л., Еникеев Г. Г. Очистка воздуха на входе в ГТД от жидких аэрозолей // Испытания авиационных двигателей. Уфа: УАИ, 1975. № 3. С. 79.

ОБ АВТОРЕ

Еникеев Галей Гумерович, доц. каф. прикл. гидромеханики. Дипл. инженер-механик по авиац. двигателям (УАИ, 1967). Канд. техн. наук по тепл. двигателям (УАИ, 1979). Иссл. в обл. механики многофазных сред.