

УДК 629.7.036

Б. Р. АБДУЛЛИН, В. П. АЛАТОРЦЕВ, А. В. ГУМЕРОВ, Х. С. ГУМЕРОВ**ОТНОСИТЕЛЬНОЕ ИЗМЕНЕНИЕ
ТЕРМОГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ТРДДФСМ
ПОСЛЕ РЕМОНТА ПО ВЫРАБОТКЕ РЕСУРСА**

Рассматривается метод решения задачи по оценке качества отремонтированных двигателей путем сравнения соответствующих термогазодинамических параметров после отладки отремонтированных и новых двигателей. *Авиационный газотурбинный двигатель ; ремонт ; проточная часть ; зазор ; эксплуатационный дефект*

Одной из целей решения проблемы безопасности полетов при эксплуатации летательных аппаратов является разработка технологий, увеличивающих время безопасной эксплуатации.

Применительно к силовой установке летательного аппарата в связи с этим возникает необходимость определения обоснованных допустимых отклонений основных параметров от номинальных значений на различных режимах работы, что дает возможность уточнять базовые характеристики применительно к индивидуальным двигателям, тем самым способствуя более точным оценкам развития повреждений проточной части двигателя. Воздушно-газовый тракт газотурбинного двигателя характеризуется большим количеством всевозможных размеров, контролируемых при изготовлении, сборке и разборке деталей и узлов. Существенная часть этих размеров связана с лопаточными машинами (с контролем аэродинамических поверхностей всех лопаток компрессора и турбины). Естественно, что влияние всех размеров на характеристики узлов и параметры двигателя в целом неравнозначно и, кроме того, изменение этих размеров в процессе наработки двигателя в эксплуатации также происходит различным образом. Выбор значимых геометрических факторов и построение аналитической модели двигателя с учетом выработки ресурса, регламента промовок и восстановительных мероприятий возможно только на основании комплексного исследования, обобщающего теоретические расчеты, статистические данные результатов кратковременных и длительных испытаний, прямых экс-

периментов на двигателе с имитацией влияния на характеристики двигателя достоверно установленных эксплуатационных дефектов.

Анализ проведенных к настоящему времени многочисленных теоретических и экспериментальных исследований [1] позволяет выделить по каждому из узлов двигателя перечень размеров, претендующих на включение в аналитическую модель двигателя. Сгруппированные по турбокомпрессорной части ГТД это следующие размеры:

- для осевых компрессоров:

- 1) радиальные зазоры по рабочим лопаткам;
- 2) размеры, характеризующие профили лопаток (рабочих и направляющих), такие как: относительная толщина профиля, толщина входной и выходной кромок, угол установки профиля в венце, угол изгиба средней линии профиля, распределение толщины профиля по хорде, форма средней линии профиля;
- 3) диаметры по торцам рабочих лопаток;
- 4) диаметры и зазоры по лабиринтным уплотнениям;
- 5) уступ по бандажным полкам;

- для турбин:

- 1) радиальные зазоры по рабочим лопаткам;
- 2) пропускная способность аппарата закрутки охлаждающего воздуха;
- 3) зазор между козырьком аппарата закрутки и внутренними полками блоков лопаток;
- 4) размеры, характеризующие качество изготовления пера и венца (толщина выходной кромки, угол установки профиля в решетке);
- 5) площадь критического сечения соплового аппарата (или пропускная способность).

В общем случае указанные размеры в проточной части турбомашин определяют действи-

тельные характеристики компрессоров и турбин двигателя и положение рабочей точки для определенного режима работы на этих характеристиках, и, как следствие, основные термогазодинамические параметры двигателя (тяга, расход топлива, расход воздуха, температуры и давления по тракту двигателя). Колебание перечисленных размеров в заданных по ТУ допусках и является причиной рассеивания термогазодинамических параметров новых серийных двигателей, а неслучайное изменение размеров в процессе наработки в эксплуатации – причиной тренда основных термогазодинамических параметров двигателя (рис. 1, 2).

Влияние малых изменений каждого из размеров на характеристики турбомашин и параметры изделия в целом достаточно сложно по физической природе и математическому описанию и, кроме того, неравноценно по количест-

венной величине. Например, выступание и утопание замков лопаток компрессора относительно трактовой поверхности и размеры, характеризующие качество профиля лопаток, по физическому влиянию имеют аналогию с производственными допусками на аэродинамические поверхности самолета (волнистость обшивки, уступы и зазоры).

Согласно [2] для одновального ТВД Т-56 фирмы Allison типичными эксплуатационными дефектами, влияющими на характеристики узлов и двигателя в целом, являются: эрозия соплового аппарата первой ступени турбины; отрицательная кривка рабочих лопаток первой ступени турбины; износ лабиринтных уплотнений компрессора; увеличение радиального зазора в лопатках первой и второй ступеней компрессора.

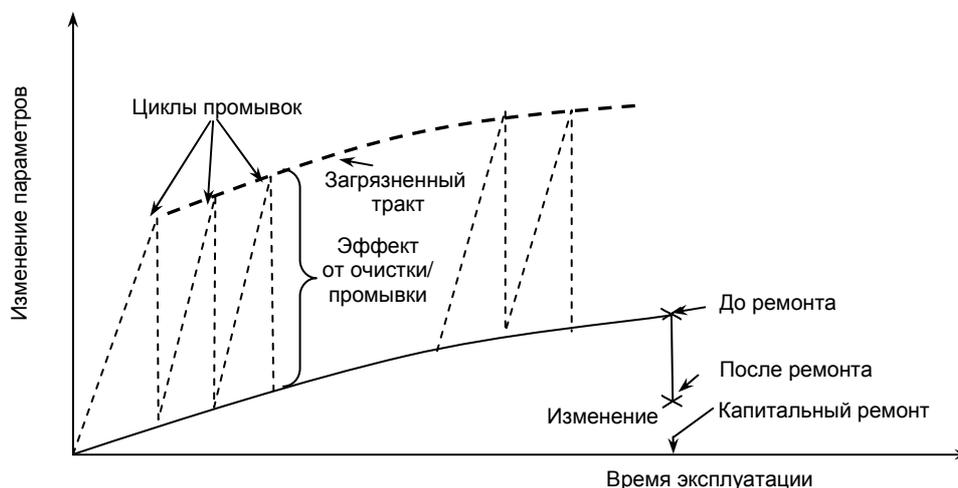


Рис. 1. Типичное изменение параметров двигателя в процессе эксплуатации

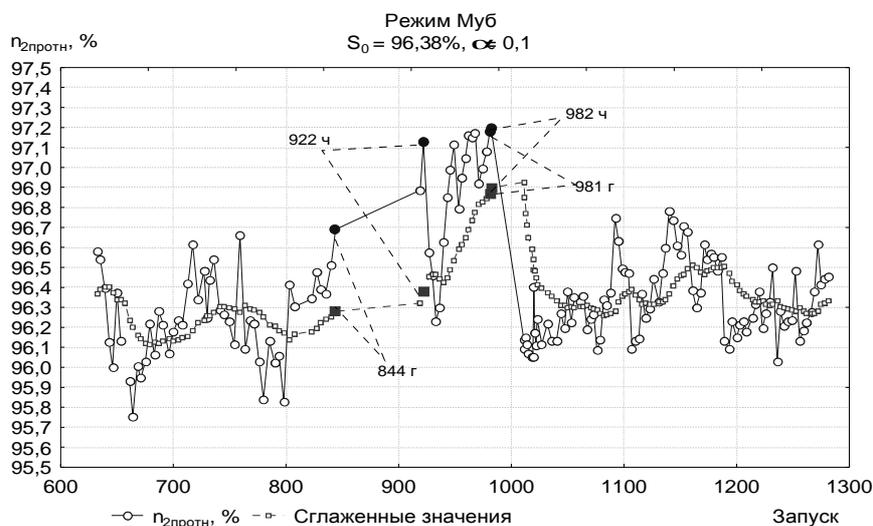


Рис. 2. Изменение параметров двигателя при длительных испытаниях

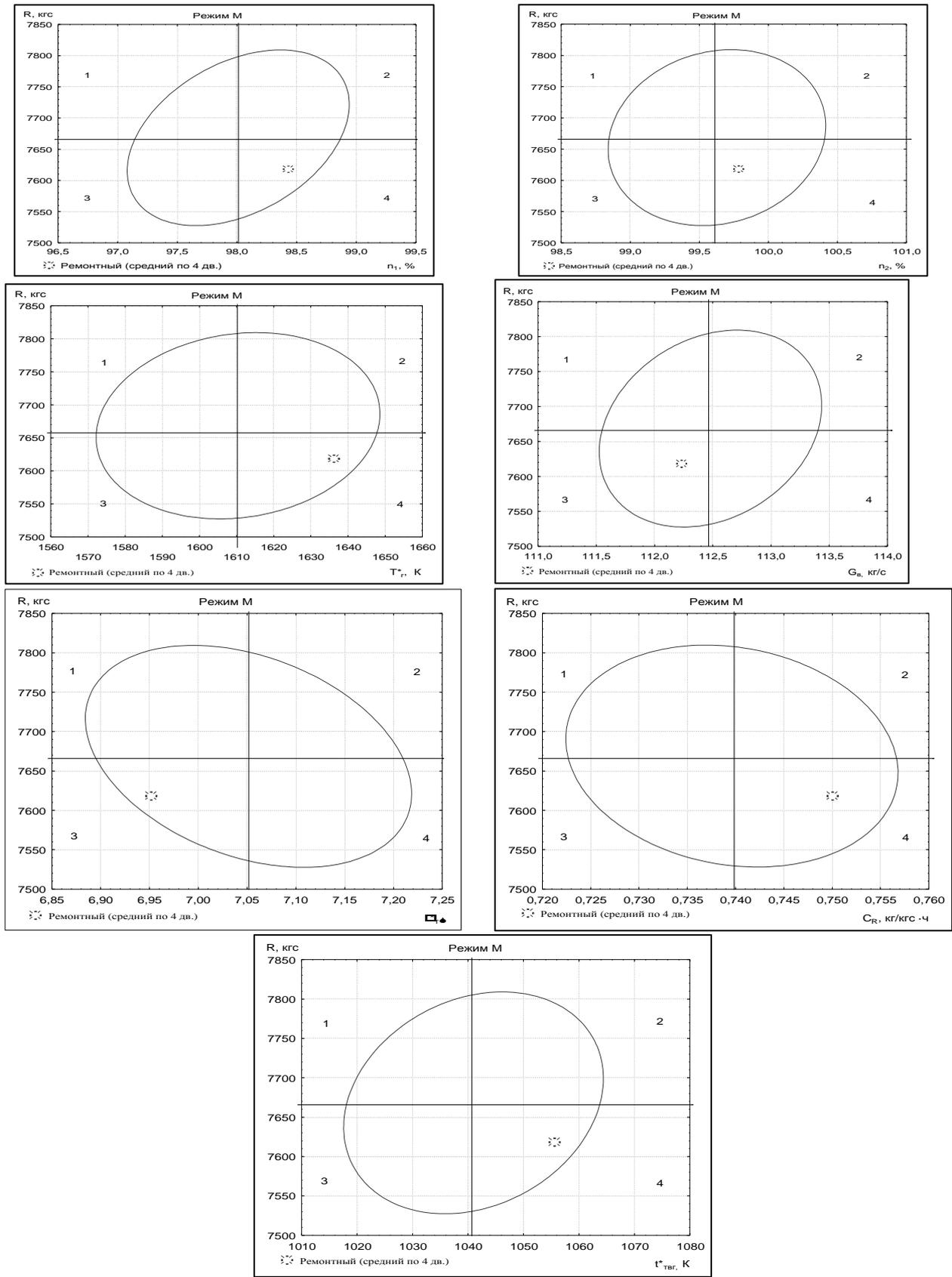


Рис. 3. Соотношение новых и отремонтированных двигателей на максимальном режиме

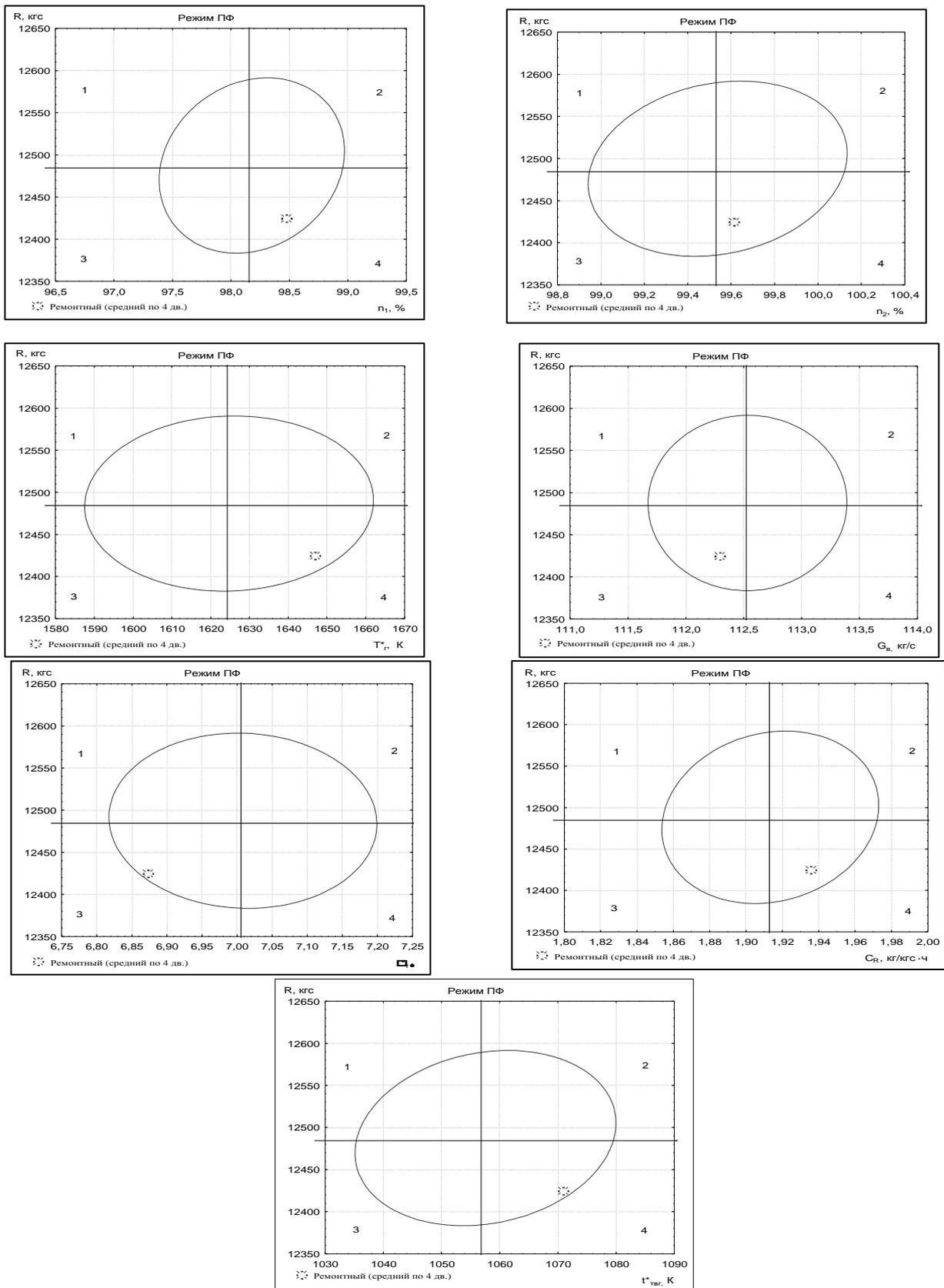


Рис. 4. Соотношение новых и отремонтированных двигателей на режиме полного форсирования

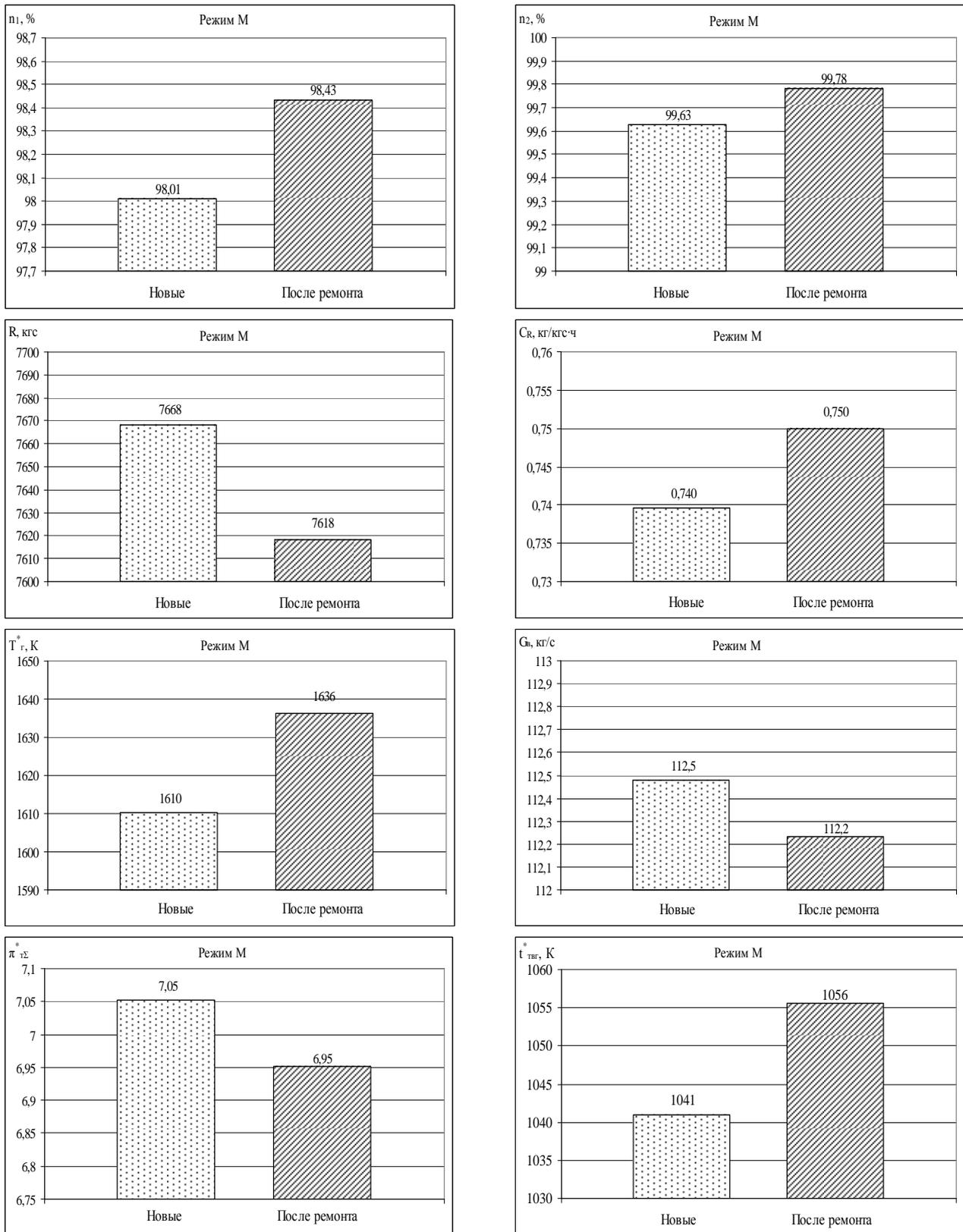


Рис. 5. Сравнительные термогазодинамические параметры новых и ремонтных двигателей на максимальном режиме

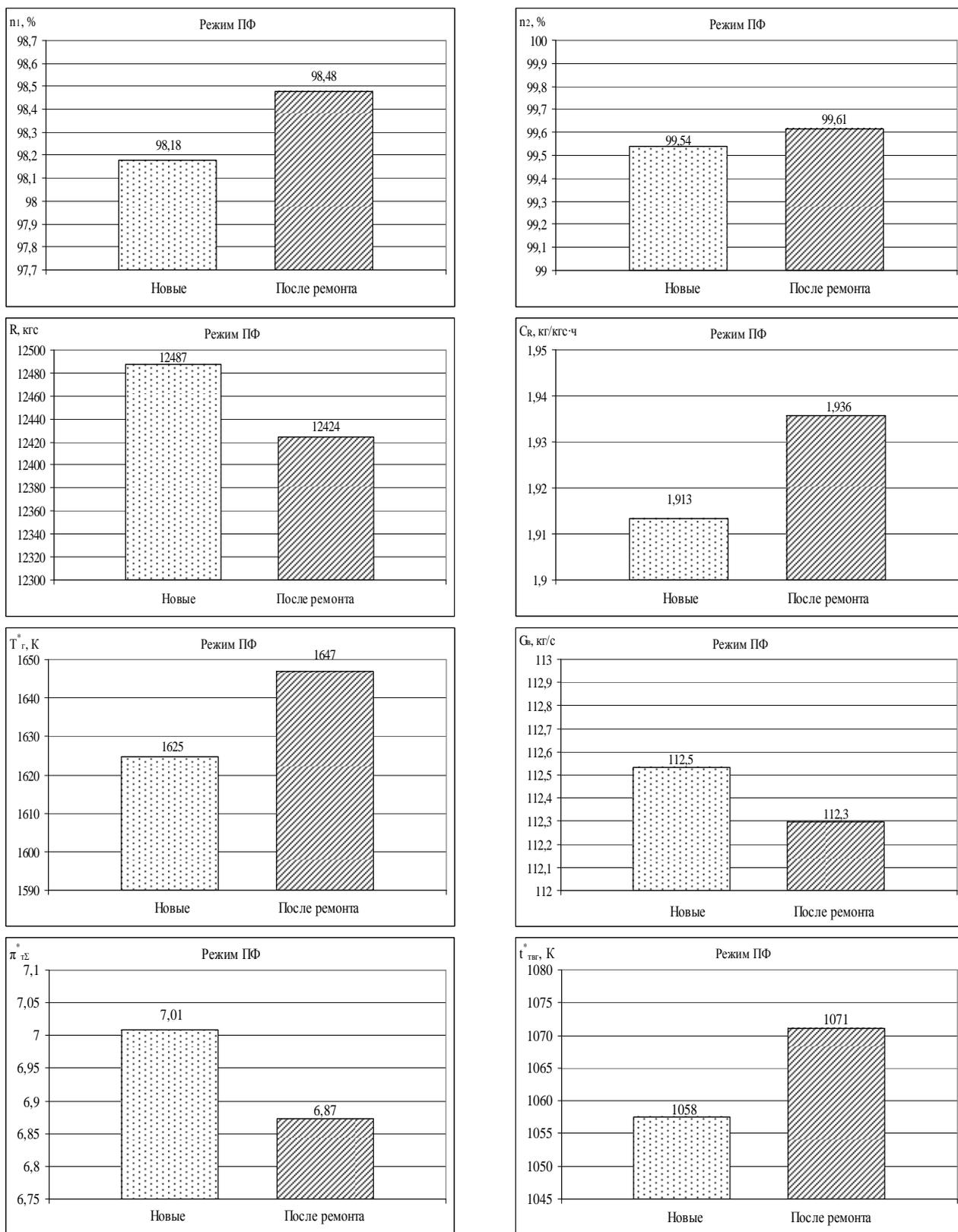


Рис. 6. Сравнительные термогазодинамические параметры новых и ремонтных двигателей на режиме полного форсажа

Для двигателей JT9D и CF6-6D определены типичные эксплуатационные дефекты, влияющие на топливную экономичность [3] (программа NASA: ACEE – Aircraft Energy Efficiency). В холодной части двигателя (одноступенчатый вентилятор и многоступенчатый компрессор) основным дефектом является нарушение качества поверхностей профилей лопаток – эрозия, шероховатость. В горячей части преобладающим дефектом является термическая деформация, вызывающая искривление лопаток турбины. Увеличение радиального зазора по концам лопаток турбомашин вследствие истирания наружного корпуса также связано с деформацией. Установлено косвенное влияние дефектов камеры сгорания. Так, нарушение заданных радиальной или окружной эпюр температурного поля могут вызвать перегрев и коробление корпуса и изменение радиального зазора лопаток турбины.

Статистическая информация по двигателям, прошедшим ремонт, и последующие испытания позволяют оценить качество отремонтированных двигателей сравнением соответствующих термогазодинамических параметров после отладки отремонтированных и новых двигателей. На рис. 3 и 4 приведены эллипсы рассеивания параметров новых двигателей на двух режимах работы (максимальном и полного форсирования), на фоне которых изображены средние параметры двигателей, прошедших ремонт по действующей технологии. Как видно из рис. 3 и 4, большинство параметров ремонтных двигателей находится в секторе эллипса рассеивания, логично отражающего ухудшение параметров и целенаправленное изменение отладочных параметров n_1 и π^*_T . На рис. 5 и 6 приведены сравнительные характеристики основных термогазодинамических параметров для двух статистических выборок (новых и отремонтированных) двигателей. На рис. 7–10 приведены результаты контроля значимых геометрических размеров одного из двигателей, прошедших ремонт, в сопоставлении с полем допуска.

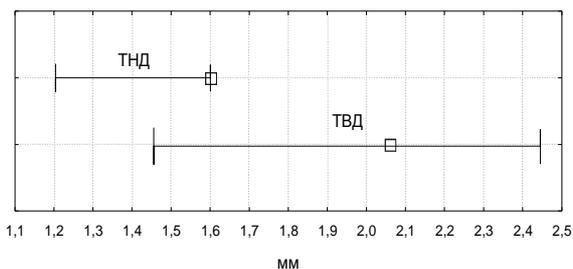


Рис. 7. Средний зазор по рабочим лопаткам ТВД и ТНД

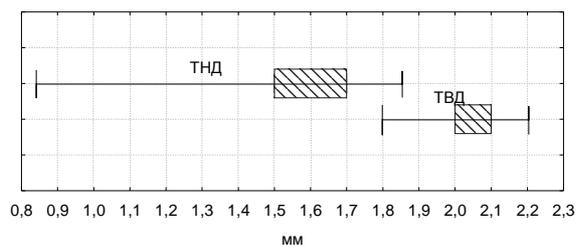


Рис. 8. Радиальный зазор по рабочим лопаткам ТВД и ТНД

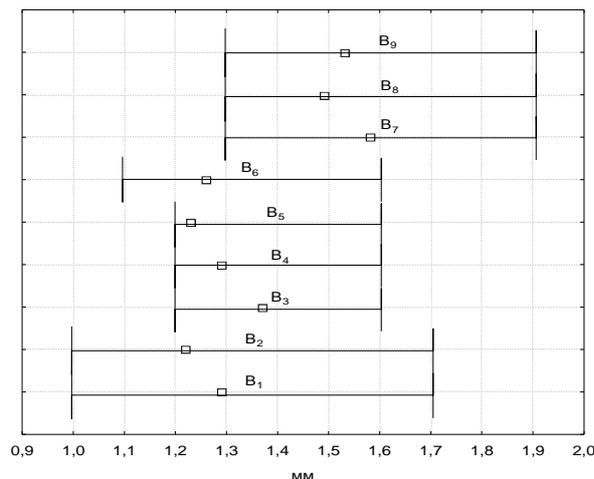


Рис. 9. Радиальный зазор по КВД

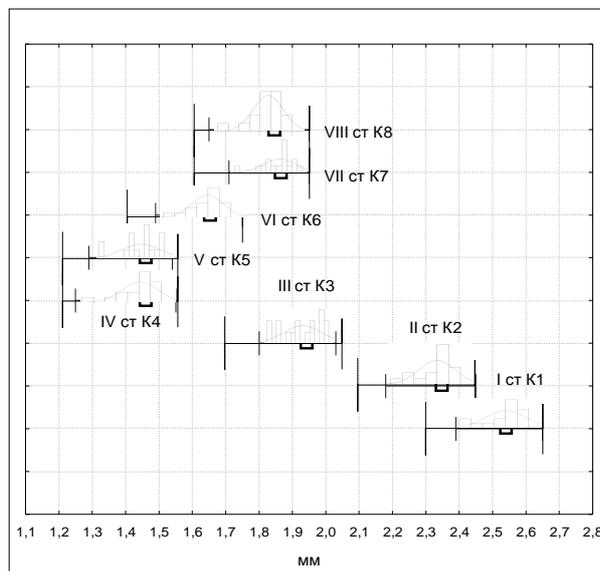


Рис. 10. Замеры радиальных зазоров К1-K8, распределения зазоров и их средние значения

ВЫВОДЫ

Приведенные результаты контроля значимых геометрических размеров (рис. 7–10) позволяют предположить, что основной причиной отмеченного изменения термогазодинамических параметров двигателей после ремонта является

состояние профиля лопаток турбомашин, в том числе радиальных зазоров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Magnus, G.** Theory for Turbomachinery Degradation and Monitoring Tools. Licentiate Thesis / G. Magnus [Электронный ресурс] (<http://www.scirus.com/publications>)

2. **Организация** эксплуатационного обслуживания и восстановительного ремонта ТРДД // Экспресс-информация. Поршневые и газотурбинные двигатели. М. : ВИНТИ, 1982. № 36. С. 12–17.

3. **Эксплуатационные** дефекты двигателей самолетов гражданских авиалиний // Экспресс-информация. Поршневые и газотурбинные двигатели. М. : ВИНТИ, 1982. № 8. С. 15–20.

ОБ АВТОРАХ



Абдуллин Булат Ринатович, ассист. каф. авиац. двигателей. Дипл. магистр техники и технологии (УГАТУ, 2000). Иссл. в обл. проектир. и доводки авиац. двигателей.



Алаторцев Владимир Петрович, доц. каф. авиац. двигателей. Дипл. инж.-мех. по авиац. двигателям (УАИ, 1964), канд. техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УАИ, 1971). Иссл. в обл. проектир. и доводки авиац. двигателей.



Гумеров Александр Витальевич, асп. каф. авиац. двигателей. Дипл. инженер по авиац. двигателям и энергоустановкам (УГАТУ, 2006). Иссл. в обл. проектир. и доводки авиац. двигателей.



Гумеров Хайдар Сагитович, проф. каф. авиац. двигателей. Дипл. инж.-мех. (УАИ, 1958). Д-р техн. наук по тепловым двигателям ЛА (УАИ, 1988), заслуж. деятель науки и техники РБ. Иссл. в обл. проектир. и доводки авиац. двигателей.